

O'REILLY®

C# 12

Справочник

Полное описание языка



Джозеф Албахари

C# 12

Справочник

Полное описание языка

C# 12 IN A NUTSHELL

THE DEFINITIVE REFERENCE

Joseph Albahari

Beijing · Boston · Farnham · Sebastopol · Tokyo

O'REILLY®

C# 12

Справочник

Полное описание языка

Джозеф Албахари



Москва · Санкт-Петербург
2024

ББК 32.973.26-018.2.75

А45

УДК 004.432

ООО “Диалектика”

Перевод с английского и редакция Ю.Н. Артеменко

По общим вопросам обращайтесь в издательство “Диалектика” по адресу:
info.dialektika@gmail.com, http://www.dialektika.com

Албахари, Джозеф.

A45 C# 12. Справочник. Полное описание языка. : Пер. с англ. — СПб. : ООО “Диалектика”, 2024. — 1104 с. : ил. — Парал. тит. англ.

ISBN 978-5-907705-47-0 (рус.)

ББК 32.973.26-018.2.75

Все права защищены.

Все названия программных продуктов являются зарегистрированными торговыми марками соответствующих фирм.

Никакая часть настоящего издания ни в каких целях не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, если на это нет письменного разрешения издательства O'Reilly Media, Inc.

Copyright © 2024 Joseph Albahari

All rights reserved including the right of reproduction in whole or in part in any form. This translation is published and sold by permission of O'Reilly Media, Inc., which owns or controls all rights to publish and sell the same.

Authorized translation from the English language edition of the C# 12 in a Nutshell: The Definitive Reference (ISBN 978-1-098-14744-0), published by O'Reilly Media, Inc.

No part of this work may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage or retrieval system, without the prior written permission of the copyright owner and the Publisher.

Научно-популярное издание

Джозеф Албахари

C# 12. Справочник. Полное описание языка

Выпускающий редактор	А.С. Тополенко
Ответственный редактор	М.С. Репин
Главный дизайнер	А.Г. Корнейчик
Корректор	Н.С. Войтенко
Рецензент	Н.К. Репина
Редактор	М.В. Дубовцева

Подписано в печать 14.08.2024. Формат 70x100/16

Усл. печ. л. 89,01. Уч.-изд. л. 63,2

Доп. тираж 400 экз. Заказ № 4873.

Отпечатано в АО “Первая Образцовая типография”

Филиал “Чеховский Печатный Двор”

142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д.1

Сайт: www.chpd.ru, E-mail: sales@chpd.ru, тел. 8(495)107-02-68

ООО “Диалектика”, 195027, г. Санкт-Петербург, ул. Магнитогорская, д. 30, литер А, пом. 828А, п/я 116

ISBN 978-5-907705-47-0 (рус.)

© ООО “Диалектика”, 2024,
перевод, оформление, макетирование

ISBN 978-1-098-14744-0 (англ.)

© 2024 Joseph Albahari

Оглавление

Предисловие	29
Глава 1. Введение в C# и .NET	35
Глава 2. Основы языка C#	67
Глава 3. Создание типов в языке C#	139
Глава 4. Дополнительные средства языка C#	211
Глава 5. Обзор .NET	317
Глава 6. Основы .NET	331
Глава 7. Коллекции	407
Глава 8. Запросы LINQ	463
Глава 9. Операции LINQ	517
Глава 10. LINQ to XML	569
Глава 11. Другие технологии XML и JSON	601
Глава 12. Освобождение и сборка мусора	631
Глава 13. Диагностика	659
Глава 14. Параллелизм и асинхронность	683
Глава 15. Потоки данных и ввод-вывод	749
Глава 16. Взаимодействие с сетью	797
Глава 17. Сборки	823
Глава 18. Рефлексия и метаданные	865
Глава 19. Динамическое программирование	921
Глава 20. Криптография	935
Глава 21. Расширенная многопоточность	949
Глава 22. Параллельное программирование	993
Глава 23. Span<T> и Memory<T>	1039
Глава 24. Способность к взаимодействию	1051
Глава 25. Регулярные выражения	1077
Предметный указатель	1098

Содержание

Об авторе	28
Предисловие	29
Предполагаемая читательская аудитория	29
Как организована эта книга	30
Что требуется для работы с этой книгой	30
Соглашения, используемые в этой книге	31
Использование примеров кода	32
Ждем ваших отзывов!	32
Благодарности	33
Глава 1. Введение в C# и .NET	35
Объектная ориентация	35
Безопасность в отношении типов	36
Управление памятью	37
Поддержка платформ	37
Общеязыковые исполняющие среды, библиотеки базовых классов и исполняющие среды	38
Общеязыковая исполняющая среда	38
Библиотека базовых классов	39
Исполняющие среды	39
Нишевые исполняющие среды	42
Краткая история языка C#	43
Нововведения версии C# 12	43
Нововведения версии C# 11	45
Нововведения версии C# 10	47
Нововведения версии C# 9.0	50
Нововведения версии C# 8.0	53
Нововведения версий C# 7.x	57
Нововведения версии C# 6.0	61
Нововведения версии C# 5.0	63
Нововведения версии C# 4.0	63
Нововведения версии C# 3.0	64
Нововведения версии C# 2.0	65
Глава 2. Основы языка C#	67
Первая программа на C#	67
Компиляция	68
Синтаксис	70
Идентификаторы и ключевые слова	70
Литералы, знаки пунктуации и операции	71
Комментарии	72
Основы типов	72
Примеры предопределенных типов	72

Специальные типы	73
Типы и преобразования	78
Типы значений и ссылочные типы	78
Классификация предопределенных типов	82
Числовые типы	83
Числовые литералы	84
Числовые преобразования	85
Арифметические операции	86
Операции инкремента и декремента	86
Специальные операции с целочисленными типами	87
8- и 16-битные целочисленные типы	89
Специальные значения float и double	89
Выбор между double и decimal	90
Ошибки округления вещественных чисел	91
Булевский тип и операции	91
Булевские преобразования	91
Операции сравнения и проверки равенства	92
Условные операции	92
Строки и символы	93
Символьные преобразования	94
Строковый тип	94
Строки UTF-8	97
Массивы	98
Стандартная инициализация элементов	99
Индексы и диапазоны	99
Многомерные массивы	100
Упрощенные выражения инициализации массивов	102
Проверка границ	103
Переменные и параметры	103
Стек и куча	103
Определенное присваивание	104
Стандартные значения	105
Параметры	106
Локальные ссылочные переменные	111
Возвращаемые ссылочные значения	112
Обявление неявно типизированных локальных переменных с помощью var	113
Выражения new целевого типа	114
Выражения и операции	114
Первичные выражения	115
Пустые выражения	115
Выражения присваивания	115
Приоритеты и ассоциативность операций	115
Таблица операций	116
Операции для работы со значениями null	116
Операция объединения с null	120

Операция присваивания с объединением с null	120
null-условная операция	120
Операторы	121
Операторы объявления	122
Операторы выражений	122
Операторы выбора	123
Операторы итераций	128
Операторы перехода	130
Смешанные операторы	131
Пространства имен	132
Пространства имен с областью видимости на уровне файлов	133
Директива <code>using</code>	133
Директива <code>global using</code>	133
Директива <code>using static</code>	134
Правила внутри пространства имен	134
Назначение псевдонимов типам и пространствам имен	136
Дополнительные возможности пространств имен	137
Глава 3. Создание типов в языке C#	139
Классы	139
Методы	142
Конструкторы экземпляров	144
Деконструкторы	146
Инициализаторы объектов	147
Ссылка <code>this</code>	149
Свойства	149
Индексаторы	154
Основные конструкторы (C# 12)	155
Статические конструкторы	159
Статические классы	160
Финализаторы	160
Частичные типы и методы	161
Операция <code>nameof</code>	162
Наследование	163
Полиморфизм	164
Приведение и ссылочные преобразования	164
Виртуальные функции-члены	167
Абстрактные классы и абстрактные члены	169
Скрытие унаследованных членов	169
Запечатывание функций и классов	170
Ключевое слово <code>base</code>	170
Конструкторы и наследование	171
Перегрузка и распознавание	174
Тип <code>object</code>	174
Упаковка и распаковка	175

Статическая проверка типов и проверка типов во время выполнения	176
Метод <code>GetType</code> и операция <code>typeof</code>	177
Метод <code>ToString</code>	177
Список членов <code>object</code>	178
Структуры	178
Семантика конструирования структур	179
Ссылочные структуры	180
Модификаторы доступа	181
Примеры	182
Дружественные сборки	183
Установление верхнего предела доступности	183
Ограничения, накладываемые на модификаторы доступа	183
Интерфейсы	184
Расширение интерфейса	185
Явная реализация членов интерфейса	185
Реализация виртуальных членов интерфейса	186
Повторная реализация члена интерфейса в подклассе	187
Интерфейсы и упаковка	188
Стандартные члены интерфейса	188
Статические члены интерфейса	189
Перечисления	191
Преобразования перечислений	192
Перечисления флагов	192
Операции над перечислениями	193
Проблемы безопасности типов	193
Вложенные типы	195
Обобщения	196
Обобщенные типы	196
Для чего предназначены обобщения	197
Обобщенные методы	198
Объявление параметров типа	199
Операция <code>typeof</code> и несвязанные обобщенные типы	200
Стандартное значение для параметра обобщенного типа	200
Ограничения обобщений	201
Создание подклассов для обобщенных типов	203
Самоссылающиеся объявления обобщений	203
Статические данные	204
Параметры типа и преобразования	204
Ковариантность	205
Контравариантность	208
Сравнение обобщений C# и шаблонов C++	209
Глава 4. Дополнительные средства языка C#	211
Делегаты	211
Написание подключаемых методов с помощью делегатов	212

Целевые методы экземпляра и статические целевые методы	213
Групповые делегаты	213
Обобщенные типы делегатов	215
Делегаты Func и Action	215
Сравнение делегатов и интерфейсов	216
Совместимость делегатов	217
События	219
Стандартный шаблон событий	221
Средства доступа к событию	224
Модификаторы событий	226
Лямбда-выражения	226
Явное указание типов параметров и возвращаемого типа лямбда-выражения	227
Стандартные параметры лямбда-выражений (C# 12)	228
Захватывание внешних переменных	228
Сравнение лямбда-выражений и локальных методов	231
Анонимные методы	232
Операторы try и исключения	233
Конструкция catch	235
Блок finally	236
Генерация исключений	238
Основные свойства класса System.Exception	239
Общие типы исключений	240
Шаблон методов TryXXX	241
Альтернативы исключениям	241
Перечисление и итераторы	242
Перечисление	242
Инициализаторы и выражения коллекций	243
Итераторы	244
Семантика итератора	245
Компоновка последовательностей	246
Типы значений, допускающие null	247
Структура Nullable<T>	248
Подъем операций	249
Тип bool? и операции & и	251
Типы значений, допускающие null, и операции для работы с null	251
Сценарии использования типов значений, допускающих null	252
Альтернативы типам значений, допускающим null	252
Ссылочные типы, допускающие null	253
null-терпимая операция	254
Разъединение контекстов с заметками и с предупреждениями	255
Трактовка предупреждений о допустимости значения null как ошибок	256
Расширяющие методы	256
Цепочки расширяющих методов	257
Неоднозначность и распознавание	257
Анонимные типы	259

Кортежи	260
Именование элементов кортежа	261
Назначение псевдонимов кортежам (C# 12)	263
Метод <code>ValueTuple.Create</code>	263
Деконструирование кортежей	264
Сравнение эквивалентности	264
Классы <code>System.Tuple</code>	265
Записи	265
Подоплека	265
Определение записи	266
Неразрушающее изменение	270
Проверка достоверности свойств	271
Вычисляемые поля и ленивая оценка	272
Основные конструкторы	274
Записи и сравнение эквивалентности	276
Шаблоны	277
Шаблон константы	278
Реляционные шаблоны	278
Комбинаторы шаблонов	279
Шаблон <code>var</code>	279
Шаблоны кортежей и позиционные шаблоны	279
Шаблоны свойств	280
Шаблоны списков	282
Атрибуты	282
Классы атрибутов	283
Именованные и позиционные параметры атрибутов	283
Применение атрибутов к сборкам и поддерживающим полям	284
Применение атрибутов к лямбда-выражениям	284
Указание нескольких атрибутов	285
Атрибуты информации о вызывающем компоненте	285
Атрибут <code>CallerArgumentExpression</code>	287
Динамическое связывание	287
Сравнение статического и динамического связывания	288
Специальное связывание	289
Языковое связывание	290
Исключение <code>RuntimeBinderException</code>	290
Представление типа <code>dynamic</code> во время выполнения	291
Динамические преобразования	292
Сравнение <code>var</code> и <code>dynamic</code>	292
Динамические выражения	292
Динамические вызовы без динамических получателей	293
Статические типы в динамических выражениях	294
Невызываемые функции	294
Перегрузка операций	296
Функции операций	296

Перегрузка операций эквивалентности и сравнения	298
Специальные неявные и явные преобразования	298
Перегрузка операций <code>true</code> и <code>false</code>	299
Статический полиморфизм	300
Полиморфные операции	301
Обобщенная математика	302
Небезопасный код и указатели	303
Основы указателей	303
Небезопасный код	303
Оператор <code>fixed</code>	304
Операция указателя на член	304
Ключевое слово <code>stackalloc</code>	305
Буферы фиксированных размеров	305
<code>void*</code>	306
Целочисленные типы с собственным размером	306
Указатели на функции	308
Атрибут <code>SkipLocalsInit</code>	309
Директивы препроцессора	310
Условные атрибуты	311
Директива <code>#pragma warning</code>	312
XML-документация	312
Стандартные XML-дескрипторы документации	313
Дескрипторы, определяемые пользователем	315
Перекрестные ссылки на типы или члены	315
Глава 5. Обзор .NET	317
Целевые платформы и TFM	319
.NET Standard	319
.NET Standard 2.0	320
Другие стандарты .NET Standard	320
Совместимость .NET Framework и .NET 8	320
Ссылочные сборки	321
Версии исполняющих сред и языка C#	321
Среда CLR и библиотека BCL	322
Системные типы	322
Обработка текста	322
Коллекции	322
Запросы	323
XML и JSON	323
Диагностика	323
Параллелизм и асинхронность	324
Потоки данных и ввод-вывод	324
Работа с сетями	324
Сборки, рефлексия и атрибуты	324
Динамическое программирование	325
Криптография	325

Расширенная многопоточность	325
Параллельное программирование	325
Span<T> и Memory<T>	325
Возможность взаимодействия с собственным кодом и COM	326
Регулярные выражения	326
Сериализация	326
Компилятор Roslyn	326
Прикладные слои	326
ASP.NET Core	327
Windows Desktop	328
MAUI	330
Глава 6. Основы .NET	331
Обработка строк и текста	331
Тип char	331
Тип string	333
Сравнение строк	337
Класс StringBuilder	340
Кодировка текста и Unicode	341
Дата и время	344
Структура TimeSpan	345
Структуры DateTime и DateTimeOffset	346
Структуры DateOnly и TimeOnly	352
Даты и часовые пояса	352
Структура DateTime и часовые пояса	353
Структура DateTimeOffset и часовые пояса	353
Класс TimeZoneInfo	354
Летнее время и структура DateTime	357
Форматирование и разбор	358
Методы ToString и Parse	358
Поставщики форматов	359
Стандартные форматные строки и флаги разбора	364
Форматные строки для чисел	364
Перечисление NumberStyles	367
Форматные строки для даты/времени	368
Перечисление DateTimeStyles	370
Форматные строки для перечислений	371
Другие механизмы преобразования	371
Класс Convert	372
Класс XmlConvert	373
Преобразователи типов	374
Класс BitConverter	375
Глобализация	375
Контрольный перечень глобализации	376
Тестирование	376

Работа с числами	377
Преобразования	377
Класс Math	377
Структура BigInteger	378
Структура Half	379
Структура Complex	380
Класс Random	380
Класс BitOperations	382
Перечисления	382
Преобразования для перечислений	382
Перечисление значений перечисления	385
Как работают перечисления	385
Структура Guid	386
Сравнение эквивалентности	386
Эквивалентность значений и ссылочная эквивалентность	387
Стандартные протоколы эквивалентности	388
Эквивалентность и специальные типы	392
Сравнение порядка	398
Интерфейсы IComparable	398
Операции > и <	399
Реализация интерфейсов IComparable	400
Служебные классы	401
Класс Console	401
Класс Environment	402
Класс Process	402
Класс ApplicationContext	405
Глава 7. Коллекции	407
Перечисление	408
Интерфейсы IEnumerable и IEnumerator	408
Интерфейсы IEnumerable<T> и IEnumerator<T>	409
Реализация интерфейсов перечисления	412
Интерфейсы ICollection и IList	415
Интерфейсы ICollection<T> и ICollection	416
Интерфейсы IList<T> и IList	417
Интерфейсы IReadOnlyCollection<T> и IReadOnlyList<T>	418
Класс Array	419
Конструирование и индексация	422
Перечисление	423
Длина и ранг	424
Поиск	424
Сортировка	425
Обращение порядка следования элементов	427
Копирование	427
Преобразование и изменение размера	427

Списки, очереди, стеки и наборы	428
Классы <code>List<T></code> и <code>ArrayList</code>	428
Класс <code>LinkedList<T></code>	431
Классы <code>Queue<T></code> и <code>Queue</code>	432
Классы <code>Stack<T></code> и <code>Stack</code>	433
Класс <code>BitArray</code>	434
Классы <code>HashSet<T></code> и <code>SortedSet<T></code>	435
Словари	436
Интерфейс <code>IDictionary< TKey, TValue ></code>	437
Интерфейс <code>IDictionary</code>	439
Классы <code>Dictionary< TKey, TValue ></code> и <code>Hashtable</code>	439
Класс <code>OrderedDictionary</code>	441
Классы <code>ListDictionary</code> и <code>HybridDictionary</code>	442
Отсортированные словари	442
Настраиваемые коллекции и посредники	444
Классы <code>Collection<T></code> и <code>CollectionBase</code>	444
Классы <code>KeyedCollection< TKey, TItem ></code> и <code>DictionaryBase</code>	446
Класс <code>ReadOnlyCollection<T></code>	449
Неизменяемые коллекции	450
Создание неизменяемых коллекций	451
Манипулирование неизменяемыми коллекциями	451
Построители	452
Неизменяемые коллекции и производительность	452
Замороженные коллекции	453
Подключение протоколов эквивалентности и порядка	454
Интерфейсы <code>IEqualityComparer</code> и <code>EqualityComparer</code>	455
Интерфейс <code>IComparer</code> и класс <code>Comparer</code>	457
Класс <code>StringComparer</code>	459
Интерфейсы <code>IStructuralEquatable</code> и <code>IStructuralComparable</code>	460
Глава 8. Запросы LINQ	463
Начало работы	463
Текущий синтаксис	466
Выстраивание в цепочки операций запросов	466
Составление лямбда-выражений	468
Естественный порядок	471
Другие операции	471
Выражения запросов	472
Переменные диапазона	474
Сравнение синтаксиса запросов и синтаксиса SQL	475
Сравнение синтаксиса запросов и текущего синтаксиса	475
Запросы со смешанным синтаксисом	476
Отложенное выполнение	476
Повторное вычисление	477
Захваченные переменные	478
Как работает отложенное выполнение	479

Построение цепочки декораторов	480
Каким образом выполняются запросы	481
Подзапросы	482
Подзапросы и отложенное выполнение	485
Стратегии композиции	486
Постепенное построение запросов	486
Ключевое слово <code>into</code>	487
Упаковка запросов	488
Стратегии проецирования	490
Инициализаторы объектов	490
Анонимные типы	490
Ключевое слово <code>let</code>	491
Интерпретируемые запросы	492
Каким образом работают интерпретируемые запросы	494
Комбинирование интерпретируемых и локальных запросов	496
Метод <code>AsEnumerable</code>	497
Инфраструктура EF Core	499
Сущностные классы EF Core	499
Объект <code>DbContext</code>	499
Отслеживание объектов	504
Отслеживание изменений	505
Навигационные свойства	506
Отложенное выполнение	509
Построение выражений запросов	511
Сравнение делегатов и деревьев выражений	511
Деревья выражений	513
Глава 9. Операции LINQ	517
Обзор	518
Последовательность → последовательность	519
Последовательность → элемент или значение	520
Ничего → последовательность	521
Выполнение фильтрации	521
<code>Where</code>	522
<code>Take</code> , <code>TakeLast</code> , <code>Skip</code> , <code>SkipLast</code>	524
<code>TakeWhile</code> и <code>SkipWhile</code>	525
<code>Distinct</code> и <code>DistinctBy</code>	525
Выполнение проецирования	526
<code>Select</code>	526
<code>SelectMany</code>	531
Выполнение соединения	538
<code>Join</code> и <code>GroupJoin</code>	539
Операция <code>Zip</code>	547
Упорядочение	547
<code>OrderBy</code> , <code>OrderByDescending</code> , <code>ThenBy</code> , <code>ThenByDescending</code>	547

Группирование	550
GroupBy	550
Chunk	553
Операции над множествами	554
Concat, Union, UnionBy	554
Intersect, IntersectBy, Except, ExceptBy	555
Методы преобразования	555
OfType и Cast	556
ToArray, ToList, ToDictionary, ToHashSet, ToLookup	558
AsEnumerable и AsQueryable	558
Операции над элементами	559
First, Last, Single	559
ElementAt	560
MinBy и MaxBy	560
DefaultIfEmpty	561
Методы агрегирования	561
Count и LongCount	561
Min и Max	562
Sum и Average	562
Aggregate	563
Квантификаторы	566
Contains и Any	566
All и SequenceEqual	567
Методы генерации	567
Empty	567
Range и Repeat	568
Глава 10. LINQ to XML	569
Обзор архитектуры	569
Что собой представляет DOM-модель	569
DOM-модель LINQ to XML	570
Обзор модели X-DOM	570
Загрузка и разбор	572
Сохранение и сериализация	573
Создание экземпляра X-DOM	573
Функциональное построение	574
Указание содержимого	575
Автоматическое глубокое копирование	576
Навигация и запросы	576
Навигация по дочерним узлам	576
Навигация по родительским узлам	580
Навигация по равноправным узлам	580
Навигация по атрибутам	581
Обновление модели X-DOM	581
Обновление простых значений	581
Обновление дочерних узлов и атрибутов	582
Обновление через родительский элемент	582

Работа со значениями	584
Установка значений	584
Получение значений	585
Значения и узлы со смешанным содержимым	586
Автоматическая конкатенация XText	586
Документы и объявления	587
XDocument	587
Объявления XML	589
Имена и пространства имен	590
Пространства имен в XML	591
Указание пространств имен в X-DOM	593
Модель X-DOM и стандартные пространства имен	594
Префиксы	595
Аннотации	596
Проектирование в модель X-DOM	597
Устранение пустых элементов	599
Потоковая передача проекции	600
Глава 11. Другие технологии XML и JSON	601
XmlReader	601
Чтение узлов	602
Чтение элементов	604
Чтение атрибутов	607
Пространства имен и префиксы	608
XmlWriter	609
Запись атрибутов	610
Запись других типов узлов	611
Пространства имен и префиксы	611
Шаблоны для использования XmlReader/XmlWriter	611
Работа с иерархическими данными	611
Смешивание XmlReader/XmlWriter с моделью X-DOM	615
Работа с JSON	616
Utf8JsonReader	617
Utf8JsonWriter	619
JsonDocument	620
Класс JsonNode	624
Глава 12. Освобождение и сборка мусора	631
IDisposable, Dispose и Close	631
Стандартная семантика освобождения	632
Когда выполнять освобождение	633
Очистка полей при освобождении	635
Анонимное освобождение	636
Автоматическая сборка мусора	637
Корневые объекты	639

Финализаторы	639
Вызов метода <code>Dispose</code> из финализатора	641
Восстановление	642
Как работает сборщик мусора	644
Приемы оптимизации	645
Принудительный запуск сборки мусора	649
Настройка сборки мусора во время выполнения	650
Нагрузка на память	650
Организация пула массивов	650
Утечки управляемой памяти	651
Таймеры	653
Диагностика утечек памяти	654
Слабые ссылки	654
Слабые ссылки и кеширование	656
Слабые ссылки и события	656
Глава 13. Диагностика	659
Условная компиляция	659
Сравнение условной компиляции и статических переменных-флагов	660
Атрибут <code>Conditional</code>	661
Классы <code>Debug</code> и <code>Trace</code>	663
<code>Fail</code> и <code>Assert</code>	663
<code>TraceListener</code>	664
Сброс и закрытие прослушивателей	666
Интеграция с отладчиком	666
Присоединение и останов	666
Атрибуты отладчика	667
Процессы и потоки процессов	667
Исследование выполняющихся процессов	667
Исследование потоков в процессе	668
<code>StackTrace</code> и <code>StackFrame</code>	668
Журналы событий Windows	670
Запись в журнал событий	671
Чтение журнала событий	672
Мониторинг журнала событий	672
Счетчики производительности	673
Перечисление доступных счетчиков производительности	673
Чтение данных счетчика производительности	675
Создание счетчиков и запись данных о производительности	676
Класс <code>Stopwatch</code>	677
Межплатформенные инструменты диагностики	678
<code>dotnet-counters</code>	678
<code>dotnet-trace</code>	679
<code>dotnet-dump</code>	681

Глава 14. Параллелизм и асинхронность	683
Введение	683
Многопоточная обработка	684
Создание потока	684
Join и Sleep	686
Блокирование	687
Локальное или совместно используемое состояние	688
Блокировка и безопасность потоков	690
Передача данных потоку	691
Обработка исключений	693
Потоки переднего плана или фоновые потоки	694
Приоритет потока	695
Передача сигналов	696
Многопоточность в обогащенных клиентских приложениях	696
Контексты синхронизации	698
Пул потоков	699
Задачи	701
Запуск задачи	702
Возвращение значений	704
Исключения	704
Продолжение	705
TaskCompletionSource	707
Task.Delay	710
Принципы асинхронности	710
Сравнение синхронных и асинхронных операций	710
Что собой представляет асинхронное программирование	711
Асинхронное программирование и продолжение	712
Важность языковой поддержки	714
Асинхронные функции в C#	716
Ожидание	716
Написание асинхронных функций	722
Асинхронные лямбда-выражения	727
Асинхронные потоки данных	728
Асинхронные методы в WinRT	730
Асинхронность и контексты синхронизации	731
Оптимизация	732
Асинхронные шаблоны	736
Отмена	736
Сообщение о ходе работ	738
Асинхронный шаблон, основанный на задачах	740
Комбинаторы задач	741
Асинхронное блокирование	745
Устаревшие шаблоны	745
Модель асинхронного программирования	745
Асинхронный шаблон на основе событий	746
BackgroundWorker	747

Глава 15. Потоки данных и ввод-вывод	749
Потоковая архитектура	749
Использование потоков	751
Чтение и запись	753
Поиск	754
Закрытие и сбрасывание	755
Тайм-ауты	755
Безопасность в отношении потоков управления	755
Потоки с опорными хранилищами	756
FileStream	756
MemoryStream	760
PipeStream	760
BufferedStream	765
Адаптеры потоков	765
Текстовые адаптеры	766
Двоичные адаптеры	771
Закрытие и освобождение адаптеров потоков	772
Потоки со сжатием	773
Сжатие в памяти	775
Сжатие файлов с помощью gzip в Unix	775
Работа с ZIP-файлами	776
Работа с файлами Tar	777
Операции с файлами и каталогами	778
Класс File	779
Класс Directory	783
FileInfo и DirectoryInfo	783
Path	784
Специальные папки	786
Запрашивание информации о томе	787
Перехват событий файловой системы	788
Безопасность, обеспечиваемая операционной системой	789
Выполнение под учетной записью стандартного пользователя	790
Повышение административных полномочий и виртуализация	791
Размещенные в памяти файлы	792
Размещенные в памяти файлы и произвольный файловый ввод-вывод	792
Размещенные в памяти файлы и совместно используемая память (Windows)	793
Межплатформенная память, совместно используемая процессами	794
Работа с аксессорами представлений	794
Глава 16. Взаимодействие с сетью	797
Сетевая архитектура	797
Адреса и порты	800
Идентификаторы URI	801
HttpClient	803
Прокси-серверы	807
Аутентификация	808

Аутентификация через заголовки	809
Заголовки	810
Строки запросов	810
Выгрузка данных формы	811
Cookie-наборы	811
Реализация HTTP-сервера	812
Использование DNS	815
Отправка сообщений электронной почты с помощью SmtpClient	816
Использование TCP	817
Параллелизм и TCP	819
Получение почты POP3 с помощью TCP	820
Глава 17. Сборки	823
Содержимое сборки	823
Манифест сборки	824
Манифест приложения (Windows)	825
Модули	826
Класс Assembly	826
Строгие имена и подписание сборок	828
Назначение сборке строгого имени	828
Имена сборок	829
Полностью заданные имена	829
Класс AssemblyName	830
Информационная и файловая версии сборки	831
Подпись Authenticode	831
Подписание с помощью системы Authenticode	832
Ресурсы и подчиненные сборки	834
Встраивание ресурсов напрямую	835
Файлы .resources	836
Файлы .resx	837
Подчиненные сборки	839
Культуры и подкультуры	841
Загрузка, распознавание и изолирование сборок	842
Контексты загрузки сборок	844
Стандартный контекст ALC	849
“Текущий” контекст ALC	851
Метод Assembly.Load и контекстные ALC	851
Загрузка и распознавание неуправляемых библиотек	854
Класс AssemblyDependencyResolver	855
Выгрузка контекстов ALC	856
Унаследованные методы загрузки	857
Реализация системы подключаемых модулей	858
Глава 18. Рефлексия и метаданные	865
Рефлексия и активизация типов	866
Получение экземпляра Type	866
Имена типов	868

Базовые типы и интерфейсы	869
Создание экземпляров типов	870
Обобщенные типы	872
Рефлексия и вызов членов	873
Типы членов	875
Сравнение членов C# и членов CLR	877
Члены обобщенных типов	879
Динамический вызов члена	879
Параметры методов	880
Использование делегатов для повышения производительности	882
Доступ к неоткрытым членам	883
Обобщенные методы	884
Анонимный вызов членов обобщенного интерфейса	884
Вызов статических виртуальных/абстрактных членов интерфейсов	887
Рефлексия сборок	888
Модули	889
Работа с атрибутами	889
Основы атрибутов	889
Атрибут AttributeUsage	891
Определение собственного атрибута	892
Извлечение атрибутов во время выполнения	893
Динамическая генерация кода	894
Генерация кода IL с помощью класса DynamicMethod	895
Стек вычислений	896
Передача аргументов динамическому методу	897
Генерация локальных переменных	898
Ветвление	899
Создание объектов и вызов методов экземпляра	899
Обработка исключений	901
Выпуск сборок и типов	902
Объектная модель Reflection.Emit	903
Выпуск членов типа	904
Выпуск методов	905
Выпуск полей и свойств	907
Выпуск конструкторов	908
Присоединение атрибутов	909
Выпуск обобщенных методов и типов	910
Определение обобщенных методов	910
Определение обобщенных типов	912
Сложности, связанные с генерацией	912
Несозданные закрытые обобщения	912
Циклические зависимости	913
Синтаксический разбор IL	915
Написание дизассемблера	916

Глава 19. Динамическое программирование	921
Исполняющая среда динамического языка	921
Динамическое распознавание перегруженных членов	923
Упрощение паттерна “Посетитель”	923
Анонимный вызов членов обобщенного типа	926
Реализация динамических объектов	930
DynamicObject	930
ExpandoObject	932
Взаимодействие с динамическими языками	933
Передача состояния между C# и сценарием	934
Глава 20. Криптография	935
Обзор	935
Защита данных Windows	935
Хеширование	937
Алгоритмы хеширования в .NET	938
Хеширование паролей	939
Симметричное шифрование	939
Шифрование в памяти	941
Соединение в цепочку потоков шифрования	943
Освобождение объектов шифрования	944
Управление ключами	944
Шифрование с открытым ключом и подписание	945
Класс RSA	946
Цифровые подписи	947
Глава 21. Расширенная многопоточность	949
Обзор синхронизации	950
Монопольное блокирование	950
Оператор lock	951
Monitor.Enter и Monitor.Exit	952
Выбор объекта синхронизации	953
Когда нужна блокировка	953
Блокирование и атомарность	955
Вложенное блокирование	955
Взаимоблокировки	956
Производительность	957
Mutex	958
Блокирование и безопасность к потокам	959
Безопасность к потокам и типы .NET	960
Безопасность к потокам в серверах приложений	962
Неизменяемые объекты	964
Немонопольное блокирование	965
Семафор	965
Блокировки объектов чтения/записи	968

Сигнализирование с помощью дескрипторов ожидания событий	973
AutoResetEvent	973
ManualResetEvent	977
CountdownEvent	978
Создание межпроцессного объекта EventWaitHandle	978
Дескрипторы ожидания и продолжение	979
WaitAny, WaitAll и SignalAndWait	980
Класс Barrier	981
Ленивая инициализация	982
Lazy<T>	983
LazyInitializer	984
Локальное хранилище потока	985
[ThreadStatic]	986
ThreadLocal<T>	986
GetData и SetData	987
AsyncLocal<T>	987
Таймеры	989
PeriodicTimer	989
Многопоточные таймеры	990
Однопоточные таймеры	992
Глава 22. Параллельное программирование	993
Для чего нужна инфраструктура PFX?	994
Концепции PFX	994
Компоненты PFX	995
Когда необходимо использовать инфраструктуру PFX?	996
PLINQ	997
Продвижение параллельного выполнения	999
PLINQ и упорядочивание	1000
Ограничения PLINQ	1001
Пример: параллельная программа проверки орфографии	1001
Функциональная чистота	1004
Установка степени параллелизма	1004
Отмена	1005
Оптимизация PLINQ	1006
Класс Parallel	1011
Parallel.Invoke	1012
Parallel.For и Parallel.ForEach	1013
Параллелизм задач	1018
Создание и запуск задач	1019
Ожидание на множестве задач	1021
Отмена задач	1021
Продолжение	1022
Планировщики задач	1027
TaskFactory	1027

Работа с AggregateException	1028
Flatten и Handle	1029
Параллельные коллекции	1031
IProducerConsumerCollection<T>	1032
ConcurrentBag<T>	1033
BlockingCollection<T>	1034
Реализация очереди производителей/потребителей	1035
Глава 23. Span<T> и Memory<T>	1039
Промежутки и нарезание	1040
CopyTo и TryCopyTo	1042
Поиск в промежутках	1043
Работа с текстом	1043
Memory<T>	1044
Однонаправленные перечислители	1046
Работа с выделяемой в стеке и неуправляемой памятью	1048
Глава 24. Способность к взаимодействию	1051
Обращение к низкоуровневым DLL-библиотекам	1051
Маршализация типов и параметров	1052
Маршализация общих типов	1052
Маршализация классов и структур	1054
Маршализация параметров <i>in</i> и <i>out</i>	1056
Соглашения о вызовах	1056
Обратные вызовы из неуправляемого кода	1057
Обратные вызовы с помощью указателей на функции	1057
Обратные вызовы с помощью делегатов	1059
Эмуляция объединения C	1060
Совместно используемая память	1061
Отображение структуры на неуправляемую память	1063
fixed и fixed { . . . }	1066
Взаимодействие с COM	1068
Назначение COM	1068
Основы системы типов COM	1068
Обращение к компоненту COM из C#	1070
Необязательные параметры и именованные аргументы	1071
Неявные параметры <i>ref</i>	1071
Индексаторы	1072
Динамическое связывание	1072
Внедрение типов взаимодействия	1073
Эквивалентность типов	1074
Открытие объектов C# для COM	1074
Включение COM без регистрации	1076

Глава 25. Регулярные выражения	1077
Основы регулярных выражений	1077
Скомпилированные регулярные выражения	1079
Перечисление флагов RegexOptions	1079
Отмена символов	1081
Наборы символов	1081
Квантификаторы	1082
Жадные или ленивые квантификаторы	1083
Утверждения нулевой ширины	1084
Просмотр вперед и просмотр назад	1084
Привязки	1085
Границы слов	1086
Группы	1087
Именованные группы	1087
Замена и разделение текста	1088
Делегат MatchEvaluator	1089
Разделение текста	1090
Рецептурный справочник по регулярным выражениям	1090
Рецепты	1090
Справочник по языку регулярных выражений	1093
Предметный указатель	1098

Об авторе

Джозеф Албахари — автор книг *C# 10 in a Nutshell* и *LINQ Pocket Reference*. Он также является создателем LINQPad — популярной утилиты для подготовки кода и проверки запросов LINQ.

Об иллюстрации на обложке

Животное, изображенное на обложке книги — это журавль-красавка (лат. *Grus virgo*), называемый так за свою грацию и гармоничность. Данный вид журавля считается местным для Европы и Азии; на зимний период его представители мигрируют в Индию, Пакистан и северо-восточную Африку.

Хотя журавли-красавки являются самыми маленькими среди семейства журавлиных, они защищают свои территории так же агрессивно, как и другие виды журавлей, громкими голосами предупреждая других особей о нарушении границы и при необходимости вступая в бой. Журавли-красавки гнездятся не в болотистой местности, а на возвышенностях. Они могут жить даже в пустынях при наличии воды на расстоянии от 200 до 500 м. Временами для кладки яиц журавли-красавки строят гнезда, окружая их мелкими камешками, но чаще откладывают яйца прямо на землю, довольствуясь защитой только со стороны растительности.

В некоторых странах журавли-красавки считаются символом удачи и иногда защищены законом. Многие животные, изображенные на обложках книг O'Reilly, находятся под угрозой уничтожения; все они важны для нашего мира.

Изображение на обложке основано на черно-белой гравюре из книги *Wood's Illustrated Natural History*.

Предисловие

Язык C# 12 представляет собой девятое крупное обновление флагманского языка программирования от Microsoft, позиционирующее C# как язык с невероятной гибкостью и широтой применения. С одной стороны, он предлагает высокоуровневые абстракции, подобные выражениям запросов и асинхронным продолжениям, а с другой стороны, обеспечивает низкоуровневую эффективность через такие конструкции, как специальные типы значений и необязательные указатели.

Платой за развитие становится относительно трудное освоение языка. Несмотря на то что инструменты вроде Microsoft IntelliSense (и онлайновых справочников) великолепно помогают в работе, они предполагают наличие концептуальных знаний. Настоящая книга предлагает такие знания в сжатой и унифицированной форме, не утомляя беспорядочными и длинными вступлениями.

Подобно предшествующим семи изданиям книга организована вокруг концепций и сценариев использования, что делает ее пригодной как для последовательного чтения, так и для просмотра в произвольном порядке. Хотя допускается наличие только базовых навыков, материал анализируется довольно глубоко, что делает книгу ориентированной на читателей средней и высокой квалификации.

В книге рассматриваются язык C#, общезыковая исполняющая среда (Common Language Runtime — CLR) и библиотека базовых классов .NET 8 (Base Class Library — BCL). Такой подход был выбран для того, чтобы оставить место для раскрытия сложных и обширных тем без ущерба в отношении глубины или читабельности. Функциональные возможности, недавно добавленные в C#, специально помечаются, поэтому настоящую книгу можно применять также в качестве справочника по версиям C# 11 и C# 10.

Предполагаемая читательская аудитория

Книга рассчитана на читателей средней и высокой квалификации. Предварительное знание языка C# не обязательно, но необходимо наличие общего опыта программирования. Для начинающих данная книга будет дополнить, но не заменять вводный учебник по программированию.

Эта книга является идеальным дополнением к любой из огромного множества книг, ориентированных на прикладные технологии, такие как ASP.NET Core или Windows Presentation Foundation (WPF). В данной книге подробно рассматриваются язык и платформа .NET, чему обычно в книгах, посвященных прикладным технологиям, уделяется мало внимания (и наоборот).

Если вы ищете книгу, в которой кратко описаны все технологии .NET, то данная книга не для вас. Она также не подойдет, если вы стремитесь изучить API-интерфейсы, применяемые при разработке приложений для мобильных устройств.

Как организована эта книга

В главах 2–4 внимание сосредоточено целиком на языке C#, начиная с описания основ синтаксиса, типов и переменных и заканчивая такими сложными темами, как небезопасный код и директивы препроцессора. Новички должны читать указанные главы последовательно.

Остальные главы посвящены библиотеке базовых классов .NET 8. В них раскрываются такие темы, как LINQ, XML, коллекции, параллелизм, ввод-вывод и работа в сети, управление памятью, рефлексия, динамическое программирование, атрибуты, криптография и собственная способность к взаимодействию. Большинство этих глав можно читать в произвольном порядке кроме глав 5 и 6, где закладывается фундамент для последующих тем. Три главы, посвященные LINQ, тоже лучше читать последовательно, а в некоторых главах предполагается наличие общих знаний параллелизма, который раскрывается в главе 14.

Что требуется для работы с этой книгой

Примеры, приводимые в книге, требуют наличия .NET 8. Также полезно иметь под рукой документацию по .NET от Microsoft, чтобы просматривать справочную информацию об отдельных типах и членах (документация доступна по ссылке <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/>).

Хотя исходный код можно писать в простом текстовом редакторе и компилировать программу в командной строке, намного продуктивнее работать с инструментом подготовки кода для немедленного тестирования фрагментов кода и с интегрированной средой разработки (Integrated Development Environment — IDE) для построения исполняемых файлов и библиотек.

В качестве инструмента подготовки кода для Windows загрузите LINQPad 8 из веб-сайта www.linqpad.net (он бесплатен). Инструмент LINQPad полностью поддерживает C# 12 и сопровождается автором книги.

В качестве IDE-среды для Windows загрузите Visual Studio 2022: подойдет любая редакция. В качестве межплатформенной IDE-среды загрузите Visual Studio Code.



Все листинги с кодом для всех глав доступны в виде интерактивных (редактируемых) примеров LINQPad. Для загрузки примеров перейдите на вкладку Samples (Примеры) в окне LINQPad, щелкните на ссылке Download/import more samples (Загрузить/импортировать дополнительные примеры) и затем в открывшемся окне щелкните на ссылке Download C# 12 in a Nutshell samples (Загрузить примеры C# 12 in a Nutshell).

Соглашения, используемые в этой книге

Для иллюстрации отношений между типами в книге применяется базовая система обозначений UML (рис. 0.1). Параллелограммом обозначается абстрактный класс, а окружностью — интерфейс. С помощью линии с незакрашенным треугольником обозначается наследование, причем треугольник указывает на базовый тип. Линия со стрелкой определяет одностороннюю ассоциацию, а линия без стрелки — двунаправленную ассоциацию.

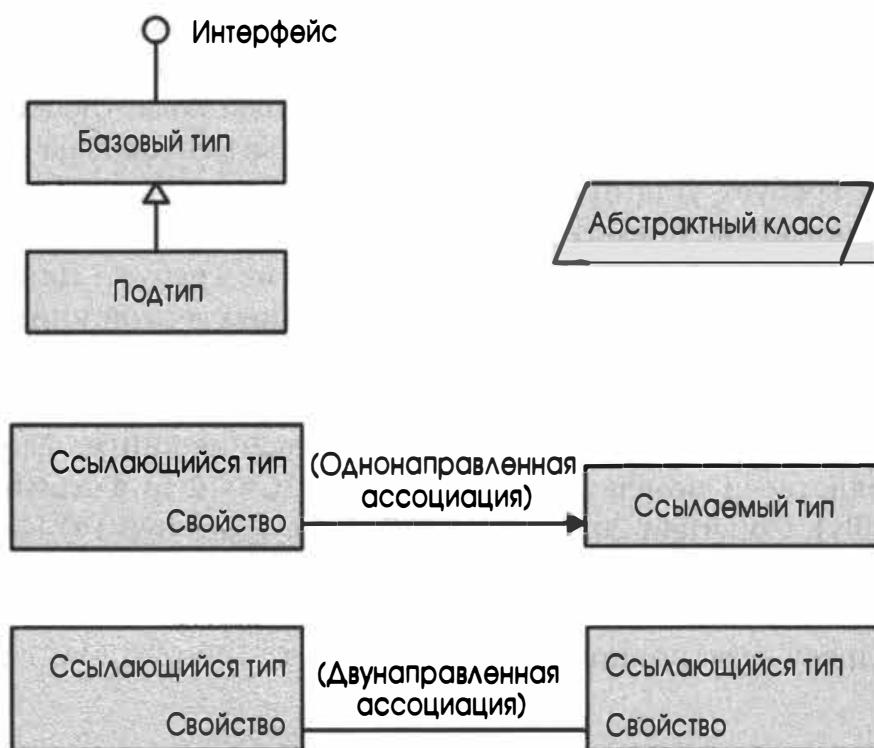


Рис. 0.1. Пример диаграммы

В книге также приняты следующие типографские соглашения.

Курсив

Применяется для новых терминов.

Моноширинный

Применяется для кода C#, ключевых слов и идентификаторов, а также вывода из программ.

Моноширинный полужирный

Применяется для выделения части кода.

Моноширинный курсив

Применяется для выделения текста, который должен быть заменен значениями, предоставленными пользователем.



Здесь приводится совет, указание или общее замечание.



Здесь приводится предупреждение или предостережение.

Использование примеров кода

Дополнительные материалы (примеры кода, упражнения и т.д.) доступны для загрузки по ссылке <http://www.albahari.com/nutshell>.

Настоящая книга призвана помочь вам выполнять свою работу. Обычно если в книге предлагается пример кода, то вы можете применять его в собственных программах и документации. Вы не обязаны обращаться к нам за разрешением, если только не используете значительную долю кода. Скажем, написание программы, в которой задействовано несколько фрагментов кода из этой книги, разрешения не требует. Для продажи или распространения кода примеров из книг O'Reilly разрешение обязательно. Ответ на вопрос путем цитирования данной книги и ссылки на пример кода разрешения не требует. Для встраивания значительного объема кода примеров, рассмотренных в этой книге, в документацию по вашему продукту разрешение обязательно.

Мы высоко ценим указание авторства, хотя в общем случае не требуем этого. Установление авторства обычно включает название книги, фамилию и имя автора, издательство и номер ISBN. Например: "C# 12 in a Nutshell by Joseph Albahari (O'Reilly). Copyright 2024, Joseph Albahari, 978-1-098-14744-0".

Если вам кажется, что способ использования вами примеров кода выходит за законные рамки или упомянутые выше разрешения, тогда свяжитесь с нами по следующему адресу электронной почты: permissions@oreilly.com.

Ждем ваших отзывов!

Вы, читатель этой книги, и есть главный ее критик. Мы ценим ваше мнение и хотим знать, что было сделано нами правильно, что можно было сделать лучше и что еще вы хотели бы увидеть изданным нами. Нам интересны любые ваши замечания в наш адрес.

Мы ждем ваших комментариев и надеемся на них. Вы можете прислать нам электронное письмо либо просто посетить наш веб-сайт и оставить свои замечания там. Одним словом, любым удобным для вас способом дайте нам знать, нравится ли вам эта книга, а также выскажите свое мнение о том, как сделать наши книги более интересными для вас.

Отправляя письмо или сообщение, не забудьте указать название книги и ее авторов, а также свой обратный адрес. Мы внимательно ознакомимся с вашим мнением и обязательно учтем его при отборе и подготовке к изданию новых книг.

Наши электронные адреса:

E-mail: info.dialektika@gmail.com

WWW: <http://www.dialektika.com>

Благодарности

Джозеф Албахари

С момента своего первого издания в 2007 году эта книга опиралась на мнения превосходных технических рецензентов. За вклад в последние издания я хотел бы выразить особую благодарность Стивену Таубу, Пауло Моргадо, Фреду Силбербергу, Витеку Карасу, Аарону Робинсону, Яну Ворличеку, Сэмю Джентайлу, Роду Стивенсу, Джареду Парсонсу, Метью Груву, Диксину Яну, Ли Коварду, Бонни Девитту, Вонсоку Чхэ, Лори Лалонду и Джеймсу Монтеманью.

За вклад в предыдущие издания я благодарю Эрика Липперта, Джона Скита, Стивена Тауба, Николаса Палдино, Криса Барроуза, Шона Фаркаса, Брайана Грюнкмейера, Маони Стивенс, Девида Де Винтера, Майка Барнетта, Мелитту Андерсен, Митча Вита, Брайана Пика, Кшиштофа Цвалина, Мэтта Уоррена, Джоэля Побара, Глин Гриффитс, Иона Василиана, Брэда Абрамса, Сэма Джинтайла и Адама Натана.

Я высоко ценю тот факт, что многие технические рецензенты являются состоявшимися личностями в компании Microsoft, и особенно благодарен им за то, что они уделили время, способствуя переходу настоящей книги на новый качественный уровень.

Хочу поблагодарить Бена Албахари и Эрика Иогансена, которые внесли свой вклад в предыдущие издания, а также команду O'Reilly — в особенности моего эффективного и отзывчивого редактора Корбина Коллинза. Наконец, я глубоко признателен моей замечательной жене Ли Албахари, чье присутствие делало меня счастливым на протяжении всего проекта.



Введение в C# и .NET

C# является универсальным, безопасным в отношении типов, объектно-ориентированным языком программирования. Цель C# заключается в обеспечении продуктивности работы программистов. Для этого в языке соблюдается баланс между простотой, выразительностью и производительностью. С самой первой версии главным архитектором языка C# был Андерс Хейлсберг (создатель Turbo Pascal и архитектор Delphi). Язык C# нейтрален в отношении платформ и работает с рядом исполняющих сред, специфичных для платформ.

Объектная ориентация

В языке C# предлагается расширенная реализация парадигмы объектной ориентации, которая включает *инкапсуляцию*, *наследование* и *полиморфизм*. Инкапсуляция означает создание вокруг *объекта* границы, предназначеннной для отделения внешнего (открытого) поведения от внутренних (закрытых) деталей реализации. Ниже перечислены отличительные особенности языка C# с объектно-ориентированной точки зрения.

- **Унифицированная система типов.** Фундаментальным строительным блоком в C# является инкапсулированная единица данных и функций, которая называется *типов*. Язык C# имеет *унифицированную систему типов*, где все типы в конечном итоге разделяют общий базовый тип. Это значит, что все типы, независимо от того, представляют они бизнес-объекты или примитивные сущности вроде чисел, совместно используют одну и ту же базовую функциональность. Например, экземпляр любого типа может быть преобразован в строку вызовом его метода *ToString*.
- **Классы и интерфейсы.** В рамках традиционной объектно-ориентированной парадигмы единственной разновидностью типа считается класс. В языке C# присутствуют типы других видов, одним из которых является *интерфейс*. Интерфейс похож на класс, не позволяющий хранить данные. Это означает, что он способен определять только *поведение* (но не *состояние*), что делает возможным множественное наследование, а также отделение спецификации от реализации.

- **Свойства, методы и события.** В чистой объектно-ориентированной парадигме все функции представляют собой *методы*. В языке C# методы являются только одной разновидностью функций-членов, куда также относятся *свойства и события* (помимо прочего). Свойства — это функции-члены, которые инкапсулируют фрагмент состояния объекта, такой как цвет кнопки или текст метки. События — это функции-члены, упрощающие выполнение действий при изменении состояния объекта.

Хотя C# — главным образом объектно-ориентированный язык, он также кое-что заимствует из парадигмы *функционального программирования*. Конкретные заимствования перечислены ниже.

- **Функции могут трактоваться как значения.** За счет применения *делегатов* язык C# позволяет передавать функции как значения в другие функции и получать их из других функций.
- **Для чистоты в C# поддерживаются шаблоны.** Основная черта функционального программирования заключается в том, чтобы избегать использования переменных, значения которых изменяются, отдавая предпочтение декларативным шаблонам. В языке C# имеются ключевые средства, содействующие таким шаблонам, в том числе возможность написания на лету неименованных функций, которые “захватывают” переменные (*лямбда-выражения*), и возможность спискового или реактивного программирования через *выражения запросов*. В C# также предоставляются записи, которые облегчают написание *неизменяемых* (допускающих только чтение) типов.

Безопасность в отношении типов

Прежде всего, C# является языком, *безопасным к типам*. Это означает, что экземпляры типов могут взаимодействовать только через определяемые ими протоколы, обеспечивая тем самым внутреннюю согласованность каждого типа. Например, C# не позволяет взаимодействовать со *строковым* типом так, как если бы он был *целочисленным* типом.

Говоря точнее, в C# поддерживается *статическая типизация*, при которой язык обеспечивает безопасность к типам *на этапе компиляции*, дополняя ею безопасность в отношении типов, навязываемую *во время выполнения*.

Статическая типизация ликвидирует обширную категорию ошибок еще до запуска программы. Она перекладывает бремя проверки того, что все типы в программе корректно подходят друг другу, с модульных тестов времени выполнения на компилятор. В результате крупные программы становятся намного более легкими в управлении, более предсказуемыми и более надежными. Кроме того, статическая типизация позволяет таким инструментам, как *IntelliSense* в *Visual Studio*, оказывать помощь в написании программы: поскольку тип заданной переменной известен, то известны и методы, которые можно вызывать с этой переменной. Инструменты подобного рода способны также повсюду в программе распознавать, что переменная, тип или метод используется, делая возможным надежный рефакторинг.



Язык C# также позволяет частям кода быть динамически типизированными через ключевое слово `dynamic`. Тем не менее, C# остается преимущественно статически типизированным языком.

Язык C# также называют *строго типизированным*, потому что его правила, касающиеся типов (применяемые как статически, так и во время выполнения), являются очень строгими. Например, невозможно вызвать функцию, которая предназначена для приема целого числа, с числом с плавающей точкой, не выполнив предварительно явное преобразование числа с плавающей точкой в целое. Это помогает предотвращать ошибки.

Управление памятью

В плане реализации автоматического управления памятью C# полагается на исполняющую среду. Общеязыковая исполняющая среда (Common Language Runtime — CLR) имеет сборщик мусора, выполняющийся как часть вашей программы; он восстанавливает память, занятую объектами, на которые больше нет ссылок. В итоге с программистов снимается обязанность по явному освобождению памяти для объекта, что устраняет проблему некорректных указателей, которая встречается в языках вроде C++.

Язык C# не исключает указатели: он просто делает их необязательными при решении большинства задач программирования. Для “горячих” точек, критичных к производительности, и возможности взаимодействия указатели и явное выделение памяти разрешены в блоках, которые явно помечены как `unsafe` (т.е. небезопасные).

Поддержка платформ

В C# имеются исполняющие среды, которые поддерживают следующие платформы:

- Windows 7+ Desktop (для обогащенных клиентских приложений, веб-приложений, серверных приложений и приложений командной строки);
- macOS (для веб-приложений и приложений командной строки, а также обогащенных клиентских приложений через Mac Catalyst);
- Linux (для веб-приложений и приложений командной строки);
- Android и iOS (для мобильных приложений);
- устройства Windows 10 (Xbox, Surface Hub и HoloLens) через UWP.

Существует также технология под названием *Blazor*, позволяющая компилировать код C# в веб-сборку, которая может выполняться в браузере.

Общеязыковые исполняющие среды, библиотеки базовых классов и исполняющие среды

Поддержка времени выполнения для программ C# состоит из *общезыковой исполняющей среды* и *библиотеки базовых классов*. Исполняющая среда может также включать *прикладной слой* более высокого уровня, который содержит библиотеки для разработки обогащенных клиентских, мобильных или веб-приложений (рис. 1.1). Доступны разные исполняющие среды, предназначенные для отличающихся видов приложений, а также различных платформ.

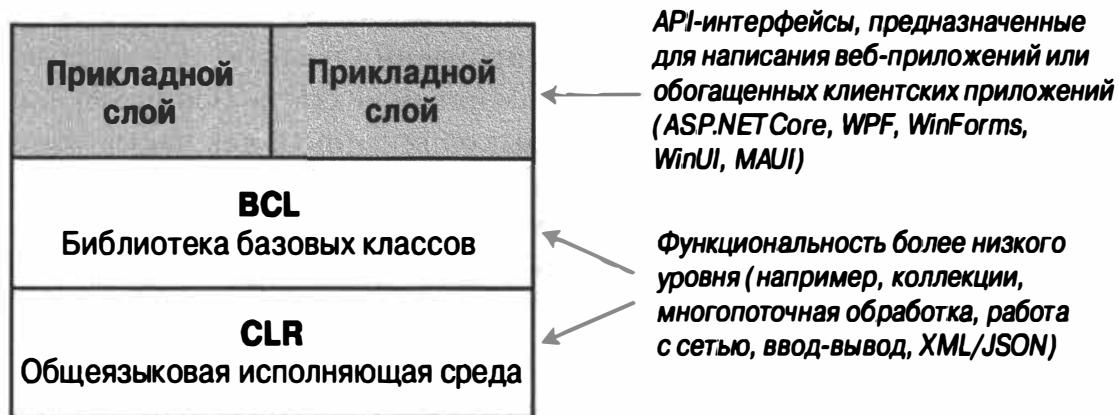


Рис. 1.1. Архитектура исполняющей среды

Общеязыковая исполняющая среда

Общеязыковая исполняющая среда (CLR) предоставляет важные службы времени выполнения, такие как автоматическое управление памятью и обработка исключений. (Понятие “общезыковая” относится к тому факту, что та же самая среда может использоваться другими управляемыми языками вроде F#, Visual Basic и Managed C++.)

C# называют *управляемым языком*, потому что его компилятор компилирует исходный код в управляемый код, который представлен на *промежуточном языке* (Intermediate Language — IL). Среда CLR преобразует код IL в собственный код машины, такой как X64 или X86, обычно прямо перед выполнением. Такое преобразование называется *оперативной* (Just-In-Time — JIT) компиляцией. Доступна также *ранняя* (Ahead-Of-Time — AOT) компиляция для улучшения показателей времени начального запуска в случае крупных сборок или устройств с ограниченными ресурсами (а также для удовлетворения правил хранилища приложений iOS при разработке мобильных приложений).

Контейнер для управляемого кода называется *сборкой* (assembly). Сборка содержит не только код IL, но также информацию о типах (*метаданные*). Наличие метаданных дает возможность сборкам ссылаться на типы в других сборках, не нуждаясь в дополнительных файлах.



Вы можете исследовать и дизассемблировать содержимое сборки посредством инструмента ildasm от Microsoft. А такие инструменты, как IL Spy или dotPeek от JetBrains, позволяют продвинуться еще дальше и декомпилировать код IL в C#. Поскольку по сравнению с собственным машинным кодом код IL является более высокоуровневым, декомпилятор способен проделать неплохую работу по воссозданию исходного кода C#.

Программа может запрашивать собственные метаданные (*рефлексия*) и даже генерировать новый код IL во время выполнения (`Reflection.Emit`).

Библиотека базовых классов

Среда CLR всегда поставляется с комплектом сборок, который называется *библиотекой базовых классов* (Base Class Library — BCL). Библиотека BCL предлагает программистам основную функциональность, такую как коллекции, ввод-вывод, обработка текста, поддержка XML/JSON, работа с сетью, шифрование, возможность взаимодействия и параллельное программирование. В библиотеке BCL также реализованы типы, которые требуются самому языку C# (для средств, подобных перечислению, запрашиванию и асинхронности) и позволяют явно получать доступ к средствам CLR вроде рефлексии и управления памятью.

Исполняющие среды

Исполняющая среда (также называемая *инфраструктурой*) — это развертываемая единица, которую вы можете загрузить и установить. Исполняющая среда состоит из среды CLR (со своей библиотекой BCL) плюс необязательного *прикладного слоя*, специфичного для того типа приложения, которое вы пишете — веб-приложение, мобильное приложение, обогащенное клиентское приложение и т.д. (При написании консольного приложения командной строки или библиотеки, не предназначенной для пользовательского интерфейса, прикладной слой не нужен.)

Когда вы пишете приложение, то *нацеливаетесь* на конкретную исполняющую среду, т.е. ваше приложение использует и зависит от функциональности, которую обеспечивает исполняющая среда. Выбор исполняющей среды также определяет, какие платформы будет поддерживать приложение.

В следующей таблице перечислены основные варианты исполняющих сред.

Прикладной слой	CLR/BCL	Типы программ	Среды выполнения
ASP.NET	.NET 8	Веб-приложение	Windows, Linux, macOS
Windows Desktop	.NET 8	Приложение для Windows	Windows 10+
WinUI 3	.NET 8	Приложение для Windows	Windows 10+
MAUI	.NET 8	Мобильное приложение, настольное приложение	iOS, Android, macOS, Windows 10+
.NET Framework	.NET Framework	Веб-приложение, приложение для Windows	Windows 7+

На рис. 1.2 приведена графическая иллюстрация изложенных сведений, которая также служит путеводителем по темам, раскрываемым в настоящей книге.

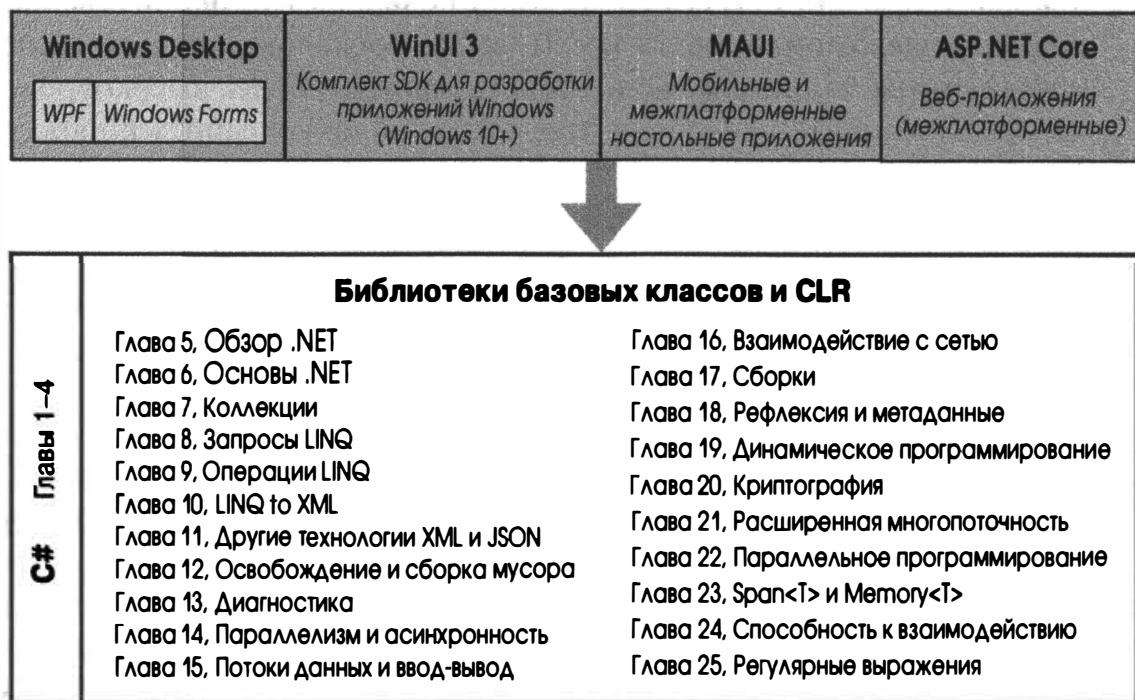


Рис. 1.2. Исполняющие среды для C#

.NET 8

.NET 8 — это флагманская исполняющая среда с открытым кодом производства Microsoft. Вы можете создавать веб-приложения и консольные приложения, которые выполняются под управлением Windows, Linux и macOS, обогащенные клиентские приложения, выполняемые под управлением Windows 10+ и macOS, а также мобильные приложения, которые выполняются под управлением iOS и Android. Основное внимание в книге уделяется CLR и BCL из .NET 8.

В отличие от .NET Framework исполняющая среда .NET 8 на машинах Windows заранее не устанавливается. Если вы попытаетесь запустить приложение .NET 8 в отсутствие корректной исполняющей среды, тогда отобразится сообщение, направляющее на веб-страницу, где можно загрузить исполняющую среду. Вы можете исключить попадание в такую ситуацию, создав *автономное развертывание*, которое включает части исполняющей среды, необходимые приложению.



Хронология обновлений .NET выглядит следующим образом: .NET Core 1.x → .NET Core 2.x → .NET Core 3.x → .NET 5 → .NET 6 → .NET 7 → .NET 8. После выхода .NET Core 3 в Microsoft решили удалить слово “Core” из названия и пропустить версию 4, чтобы избежать путаницы со средой .NET Framework 4.x, которая предшествует всем предыдущим исполняющим средам, но все еще поддерживается и широко используется. Это означает, что сборки, которые компилировались в версиях от .NET Core 1.x до .NET 7, в большинстве случаев будут функционировать без каких-либо изменений под управлением .NET 8. Напротив, сборки, скомпилированные в .NET Framework (любой версии), обычно несовместимы с .NET 8.

Windows Desktop и WinUI 3

При написании обогащенных клиентских приложений, которые выполняются под управлением Windows 10 и последующих версий, можно выбирать между классическими API-интерфейсами Windows Desktop (Windows Forms и WPF) и WinUI 3. API-интерфейсы Windows Desktop являются частью исполняющей среды .NET Desktop, а WinUI 3 — частью комплекта SDK для разработки приложений Windows (*Windows App SDK*), который должен загружаться отдельно.

Классические API-интерфейсы Windows Desktop существуют с 2006 года и пользуются великолепной поддержкой сторонними библиотеками, а также сопровождаются многочисленными ответами на вопросы на сайтах, подобных StackOverflow. Версия WinUI 3 была выпущена в 2022 году и предназначена для написания современных иммерсивных приложений с новейшими элементами управления Windows 10+. Она является преемником универсальной платформы Windows (*Universal Windows Platform* — UWP).

MAUI

Пользовательский интерфейс многоплатформенных приложений (Multi-platform App UI — MAUI) предназначен в первую очередь для создания мобильных приложений, работающих в средах iOS и Android, хотя его также можно применять для построения настольных приложений, функционирующих под управлением macOS и Windows через Mac Catalyst и WinUI 3. MAUI — это развитие Xamarin и позволяет нацеливать один проект на несколько платформ.



Для создания межплатформенных настольных приложений альтернативой MAUI является сторонняя библиотека по имени Avalonia, которая также запускается в среде Linux и архитектурно проще MAUI (поскольку работает без слоя косвенности Catalyst/WinUI). Avalonia имеет API-интерфейс, аналогичный WPF, и предлагает коммерческое дополнение под названием XPF, обеспечивающее почти полную совместимость с WPF.

.NET Framework

.NET Framework — это первоначальная исполняющая среда Microsoft, поддерживающая исключительно Windows, которая предназначена для написания веб-приложений и обогащенных клиентских приложений, запускаемых (только) на настольном компьютере или сервере Windows. Никаких крупных новых выпусков не планируется, хотя в Microsoft продолжат поддержку и сопровождение текущего выпуска 4.8 из-за обилия существующих приложений.

В .NET Framework среда CLR и библиотека BCL интегрированы с прикладным слоем. Приложения, написанные в .NET Framework, можно перекомпилировать в .NET 8, хотя обычно они требуют внесения ряда изменений. Некоторые средства .NET Framework отсутствуют в .NET 8 (и наоборот).

Исполняющая среда .NET Framework заранее установлена в Windows и автоматически обновляется через центр обновления Windows. В случае нацеливания на .NET Framework 4.8 вы можете использовать функциональные средства C# 7.3 и предшествующих версий. (Вы можете указать в файле проекта более

новую версию языка, что разблокирует все новейшие возможности языка, за исключением тех, которые требуют поддержки со стороны более новой среды выполнения.)



Слово “.NET” уже давно применяется в качестве широкого термина для обозначения любой технологии, которая включает “.NET” (.NET Framework, .NET Core, .NET Standard и т.д.).

Это означает, что переименование .NET Core в .NET создало досадную неоднозначность. Чтобы не возникало путаницы, новая платформа .NET в книге будет называться *.NET 5+*, а для ссылки на .NET Core и преемников будет использоваться фраза “.NET Core и .NET 5+”.

Усугубляя путаницу, .NET (5+) является инфраструктурой (framework), но она сильно отличается от .NET Framework. Таким образом, в книге по возможности будет применяться термин *исполняющая среда*, а не *инфраструктура*.

Нишевые исполняющие среды

Следующие исполняющие среды все еще доступны:

- .NET Core 3.0 и 3.1 (заменена .NET 5);
- .NET Core 1.x и 2.x (только для веб-приложений и приложений командной строки);
- Windows Runtime для Windows 8/8.1 (теперь UWP);
- Microsoft XNA для разработки игр (теперь UWP);

Существуют также нишевые исполняющие среды, которые перечислены ниже.

- Unity является платформой для разработки игр, которая позволяет описывать логику игры с помощью C#.
- Универсальная платформа Windows (UWP) была спроектирована для написания сенсорных приложений, которые работают на настольных компьютерах и устройствах под управлением Windows 10+, включая Xbox, Surface Hub и HoloLens. Приложения UWP помещаются в песочницу и поставляются через Магазин Windows. UWP использует версию .NET Core 2.2 CLR/BCL, и маловероятно, что эта зависимость будет обновлена; взамен в Microsoft рекомендуют пользователям перейти на современную замену UWP — WinUI 3. Но поскольку WinUI 3 поддерживает только рабочий стол Windows, с UWP по-прежнему связано нишевое применение для Xbox, Surface Hub и HoloLens.
- .NET Micro Framework предназначена для выполнения кода .NET на встроенных устройствах с крайне ограниченными ресурсами (менее одного мегабайта).

Возможно также выполнение управляемого кода внутри SQL Server. Благодаря интеграции CLR с SQL Server вы можете писать специальные функции, хранимые процедуры и агрегации на языке C# и затем вызывать их в коде SQL. Такой прием работает в сочетании с .NET Framework и специальной “размещенной” средой CLR, которая обеспечивает песочницу для защиты целостности процесса SQL Server.

Краткая история языка C#

Ниже приведена обратная хронология появления новых средств в каждой версии C#, которая будет полезна читателям, знакомым с более старыми версиями языка.

Нововведения версии C# 12

Версия C# 12 поставляется вместе с *Visual Studio 2022* и используется в случае нацеливания на .NET 8.

Выражения коллекций

Вместо того чтобы инициализировать массив следующим образом:

```
char[] vowels = {'a', 'e', 'i', 'o', 'u'};
```

теперь можно применять квадратные скобки (*выражение коллекции*):

```
char[] vowels = ['a', 'e', 'i', 'o', 'u'];
```

Выражения коллекций дают два основных преимущества. Во-первых, тот же самый синтаксис работает и с другими типами коллекций, такими как списки и наборы (и даже с низкоуровневыми типами диапазонов):

```
List<char> list      = ['a', 'e', 'i', 'o', 'u'];
HashSet<char> set     = ['a', 'e', 'i', 'o', 'u'];
ReadOnlySpan<char> span = ['a', 'e', 'i', 'o', 'u'];
```

Во-вторых, они имеют *целевую типизацию*, а это значит, что вы можете опустить тип в других сценариях, где компилятор способен его определить, например, при вызове методов:

```
Foo(['a', 'e', 'i', 'o', 'u']);
void Foo(char[] letters) { ... }
```

Дополнительные сведения ищите в разделе “Инициализаторы и выражения коллекций” в главе 4.

Основные конструкторы в классах и структурах

Начиная с версии C# 12, список параметров можно помещать непосредственно после объявления класса (или структуры):

```
class Person (string firstName, string lastName)
{
    public void Print() => Console.WriteLine (firstName + " " + lastName);
}
```

Такой код инструктирует компилятор о необходимости автоматического создания **основного конструктора**, позволяющего выполнять следующее действие:

```
Person p = new Person ("Alice", "Jones");
p.Print()                                // Alice Jones
```

Данное средство существует, начиная с введения записей в C# 9, где оно ведет себя несколько по-другому. В случае использования записей компилятор (по умолчанию) генерирует для каждого параметра основного конструктора открытое свойство, допускающее только инициализацию. К классам и структурам это не относится; для достижения того же результата свойства должны определяться явно:

```
class Person (string firstName, string lastName)
{
    public string FirstName { get; set; } = firstName;
    public string LastName { get; set; } = lastName;
}
```

Основные конструкторы хорошо работают в простых сценариях. Связанные с ними нюансы и ограничения будут описаны в разделе “Основные конструкторы (C# 12)” главы 3.

Параметры со стандартными значениями в лямбда-выражениях

Точно так же, как в обычных методах могут быть определены параметры со стандартными значениями:

```
void Print (string message = "") => Console.WriteLine (message);
```

их также можно определять в лямбда-выражениях:

```
var print = (string message = "") => Console.WriteLine (message);
print ("Hello");
print ();
```

Это средство полезно при работе с такими библиотеками, как ASP.NET Minimal API.

Снабжение псевдонимом любого типа

Язык C# всегда позволял снабжать псевдонимом простой или обобщенный тип с помощью директивы `using`:

```
using ListOfInt = System.Collections.Generic.List<int>;
var list = new ListOfInt();
```

Начиная с версии C# 12, такой подход работает и с типами других видов вроде массивов и кортежей:

```
using NumberList = double[];
using Point = (int X, int Y);

NumberList numbers = { 2.5, 3.5 };
Point p = (3, 4);
```

Прочие новые средства

В версии C# 12 также поддерживаются *встроенные массивы* через атрибут [System.Runtime.CompilerServices.InlineArray]. В результате появляется возможность создания массивов фиксированного размера в структуре без необходимости применения небезопасного контекста. Средство предназначено в первую очередь для использования в API-интерфейсах исполняющей среды.

Нововведения версии C# 11

Версия C# 11 поставляется вместе с *Visual Studio 2022* и используется в случае нацеливания на .NET 7.

Необработанные строковые литералы

Помещение строки в три или более символов кавычек приводит к созданию *необработанного строкового литерала*, который может содержать практически любую последовательность символов без необходимости в управляющих символах или удвоении. Это упрощает представление литералов JSON, XML и HTML, а также регулярных выражений и исходного кода:

```
string raw = """<file path="c:\temp\test.txt"></file>""";
```

Необработанные строковые литералы могут занимать несколько строчек и допускают интерполяцию через префикс \$:

```
string multiLineRaw = $$"
Line 1
Line 2
The date and time is {DateTime.Now}
""";
```

Использование двух (или большего количества) символов \$ в префиксе необработанной строки изменяет последовательность интерполяции с одной фигурной скобки на две и большее число фигурных скобок, что позволяет включать фигурные скобки в саму строку:

```
Console.WriteLine ($$""{ "TimeStamp": "{DateTime.Now}" }""");
// Вывод: { "TimeStamp": "01/01/2024 12:13:25 PM" }
```

Нюансы данного средства раскрываются в разделах “*Необработанные строковые литералы (C# 11)*” и “*Интерполяция строк*” главы 2.

Строки UTF-8

С помощью суффикса u8 создаются строковые литералы, закодированные в UTF-8, а не в UTF-16. Это средство предназначено для сложных сценариев, таких как низкоуровневая обработка текста JSON в горячих точках производительности:

```
ReadOnlySpan<byte> utf8 = "ab→cd"u8; // Символ стрелки занимает 3 байта
Console.WriteLine (utf8.Length); // 7
```

Лежащим в основе типом является *ReadOnlySpan<byte>* (глава 23), который можно преобразовать в массив байтов, вызвав его метод *ToArray()*.

Шаблоны списков

Шаблоны списков соответствуют последовательности элементов в квадратных скобках и работают с любыми типами коллекций, которые поддерживают подсчет (с помощью свойства Count или Length) и индексацию (посредством индексатора типа int или System.Index):

```
int[] numbers = { 0, 1, 2, 3, 4 };
Console.WriteLine (numbers is [0, 1, 2, 3, 4]); // True
```

Подчеркивание соответствует одному элементу с любым значением, а две точки — нулю или большему количеству элементов (срезу):

```
Console.WriteLine (numbers is [_, 1, .., 4]); // True
```

За срезом может следовать шаблон var — детали ищите в разделе “Шаблоны списков” главы 4.

Обязательные члены

Применение модификатора required к полю или свойству заставляет потребителей этого класса или структуры заполнять такой член через инициализатор объекта при его конструировании:

```
Asset a1 = new Asset { Name = "House" }; // Нормально
Asset a2 = new Asset(); // Ошибка: не скомпилируется!

class Asset { public required string Name; }
```

Благодаря данному средству можно избежать написания конструкторов с длинными списками параметров, что способствует упрощению создания подклассов. Если вы также хотите написать конструктор, то можете применить атрибут [SetsRequiredMembers], чтобы обойти ограничение на обязательный член для этого конструктора — детали ищите в разделе “Обязательные члены (C# 11)” главы 3.

Статические виртуальные/абстрактные члены интерфейсов

Начиная с версии C# 11, в интерфейсах можно объявлять члены как static virtual (статические виртуальные) или static abstract (статические абстрактные):

```
public interface IParsable<TSelf>
{
    static abstract TSelf Parse (string s);
}
```

Такие члены реализованы в виде статических функций в классах или структурах и могут вызываться полиморфно через ограниченный параметр типа:

```
T ParseAny<T> (string s) where T : IParsable<T> => T.Parse (s);
```

Функции операций также можно объявлять как static virtual или static abstract. Дополнительные сведения представлены в разделе “Статические виртуальные/абстрактные члены интерфейсов” главы 3 и в разделе “Статический полиморфизм” главы 4. Кроме того, в разделе “Вызов статических виртуальных/абстрактных членов интерфейсов” главы 18 объясняется, как вызывать статические абстрактные члены через рефлексию.

Операция обобщенной математики

Интерфейс `System.Numerics.INumber<TSelf>` (появившийся в .NET 7) унифицирует арифметические операции для всех числовых типов, позволяя писать обобщенные методы следующего вида:

```
T Sum<T> (T[] numbers) where T : INumber<T>
{
    T total = T.Zero;
    foreach (T n in numbers)
        total += n;      // Вызывает операцию сложения для любого числового типа
    return total;
}

int intSum = Sum (3, 5, 7);
double doubleSum = Sum (3.2, 5.3, 7.1);
decimal decimalSum = Sum (3.2m, 5.3m, 7.1m);
```

`INumber<TSelf>` реализуется всеми вещественными и целочисленными числовыми типами в .NET (а также типом `char`) и включает в себя несколько интерфейсов, содержащих определения статических абстрактных операций, например:

```
static abstract TResult operator + (TSelf left, TOther right);
```

Данная тема будет раскрыта в разделах “Полиморфные операции” и “Обобщенная математика” главы 4.

Прочие новые средства

Доступ к типу с модификатором доступности `file` возможен только из того же самого файла, и он предназначен для использования в генераторах исходного кода:

```
file class Foo { ... }
```

В C# 11 также появились проверяемые операции (см. раздел “Проверяемые операции” главы 4) для определения функций операций, которые будут вызываться внутри блоков `checked` (это требовалось для полной реализации обобщенной математики). В C# 11 также было ослаблено требование к заполнению каждого поля в конструкторе структуры (см. раздел “Семантика конструирования структур” главы 3).

Наконец, целочисленные типы с собственным размером `nint` и `nuint`, которые были введены в C# 9 для соответствия адресному пространству процесса во время выполнения (32 или 64 бита), в версии C# 11 были улучшены в случае нацеливания на .NET 7 или последующую версию. В частности, различие на этапе компиляции между этими типами и их базовыми типами времени выполнения (`IntPtr` и `UIntPtr`) устранено при нацеливании на .NET 7+. Подробное обсуждение ищите в разделе “Целочисленные типы с собственным размером” главы 4.

Нововведения версии C# 10

Версия C# 10 поставляется вместе с *Visual Studio 2022* и используется в случае нацеливания на .NET 6.

Пространства имен с областью видимости на уровне файлов

В общем случае, когда все типы в файле определены в одном пространстве имен, объявление пространства имен с областью видимости на уровне файла в C# 10 уменьшает беспорядок и устраниет ненужный уровень отступов:

```
namespace MyNamespace; //Применяется ко всему, что находится далее в файле
class Class1 {}          // внутри MyNamespace
class Class2 {}          // внутри MyNamespace
```

Директива `global using`

В случае добавления к директиве `using` ключевого слова `global` директива применяется ко всем файлам в проекте:

```
global using System;
global using System.Collections.Generic;
```

Это позволяет избежать повторения одних и тех же директив в каждом файле. Директивы `global using` работают с `using static`.

Кроме того, проекты .NET 6 теперь поддерживают *неявные директивы global using*: если для элемента `ImplicitUsings` в файле проекта установлено значение `true`, тогда автоматически импортируются наиболее часто используемые пространства имен (в зависимости от типа проекта SDK). Более подробную информацию ищите в разделе “Директива `global using`” главы 2.

Неразрушающее изменение для анонимных типов

В C# 9 появилось ключевое слово `with` для выполнения неразрушающего изменения записей. В C# 10 ключевое слово `with` работает также с анонимными типами:

```
var a1 = new { A = 1, B = 2, C = 3, D = 4, E = 5 };
var a2 = a1 with { E = 10 };
Console.WriteLine (a2);      // { A = 1, B = 2, C = 3, D = 4, E = 10 }
```

Новый синтаксис деконструирования

В C# 7 был введен синтаксис деконструирования кортежей (или любого типа, имеющего метод `Deconstruct`). В C# 10 данный синтаксис развивает дальше, позволяя смешивать присваивание и объявление в одном действии деконструирования:

```
var point = (3, 4);
double x = 0;
(x, double y) = point;
```

Инициализаторы полей и конструкторы без параметров в структурах

Начиная с версии C# 10, в структуры можно включать инициализаторы полей и конструкторы без параметров (см. раздел “Структуры” в главе 3). Они выполняются только в случае явного вызова конструктора, поэтому их можно легко обойти, например, с помощью ключевого слова `default`. Данное средство было введено в первую очередь для нужд структур типа записей.

Структуры типа записей

Записи появились в версии C# 9, где они выступали в качестве расширяемого на этапе компиляции класса. В версии C# 10 записи также могут быть структурами:

```
record struct Point (int X, int Y);
```

В остальном правила похожи: *структуры типа записей* обладают почти такими же функциями, как и *структуры типа классов* (см. раздел “Записи” в главе 4). Исключением является то, что свойства структур типа записей, генерируемые компилятором, доступны для изменения, если только перед объявлением записи не указано ключевое слово `readonly`.

Усовершенствования в лямбда-выражениях

Синтаксис лямбда-выражений был усовершенствован в нескольких отношениях. Во-первых, разрешена неявная типизация (`var`):

```
var greeter = () => "Hello, world";
```

Неявным типом лямбда-выражения является делегат `Action` или `Func`, поэтому в данном случае `greeter` имеет тип `Func<string>`. Типы параметров должны быть заданы явно:

```
var square = (int x) => x * x;
```

Во-вторых, в лямбда-выражении можно указывать возвращаемый тип:

```
var sqr = int (int x) => x;
```

Это сделано в первую очередь для улучшения производительности компилятора при обработке сложных вложенных лямбда-выражений.

В-третьих, лямбда-выражение можно передавать в параметре метода типа `object`, `Delegate` или `Expression`:

```
M1 () => "test"; // Неявно типизируется как Func<string>
M2 () => "test"; // Неявно типизируется как Func<string>
M3 () => "test"; // Неявно типизируется как Expression<Func<string>>

void M1 (object x) {}
void M2 (Delegate x) {}
void M3 (Expression x) {}
```

Наконец, к сгенерированному компилятором целевому методу лямбда-выражения (а также к его параметрам и возвращаемому значению) можно применять атрибуты:

```
Action a = [Description("test")] () => { };
```

За деталями обращайтесь в раздел “Применение атрибутов к лямбда-выражениям” главы 4.

Шаблоны вложенных свойств

В версии C# 10 допустим следующий упрощенный синтаксис для сопоставления с шаблонами вложенных свойств (см. раздел “Шаблоны свойств” в главе 4):

```
var obj = new Uri ("https://www.linqpad.net");
if (obj is Uri { Scheme.Length: 5 }) ...
```

А вот его эквивалент:

```
if (obj is Uri { Scheme: { Length: 5 } }) ...
```

Атрибут `CallerArgumentExpression`

Параметр метода, к которому применяется атрибут `[CallerArgumentExpression]`, захватывает выражение аргумента из места вызова:

```
Print (Math.PI * 2);
void Print (double number,
            [CallerArgumentExpression("number")] string expr = null)
    => Console.WriteLine (expr);
// Вывод: Math.PI * 2
```

Это средство предназначено в первую очередь для библиотек проверки и утверждений (см. раздел “Атрибут `CallerArgumentExpression`” в главе 4).

Остальные новые средства

Директива `#line` в версии C# 10 была усовершенствована и теперь позволяет указывать колонку и диапазон.

Интерполированные строки в C# 10 могут быть константами, если интерполированные значения являются константами.

Записи в версии C# 10 могут запечатывать метод `ToString()`.

Анализ определенного присваивания в C# был улучшен, и теперь работают выражения вроде показанного ниже:

```
if(foo?.TryParse ("123", out var number) ?? false)
    Console.WriteLine (number);
```

(До версии C# 10 компилятор выдавал ошибку “Use of unassigned local variable ‘number’” (Использование локальной переменной `number`, которой не было присвоено значение).)

Нововведения версии C# 9.0

Версия C# 9.0 поставляется вместе с *Visual Studio 2019* и используется в случае нацеливания на .NET 5.

Операторы верхнего уровня

С помощью *операторов верхнего уровня* (см. врезку “Операторы верхнего уровня” в главе 2) вы можете писать программу без метода `Main` и класса `Program`:

```
using System;
Console.WriteLine ("Hello, world");
```

Операторы верхнего уровня могут включать методы (которые действуют как локальные методы). Кроме того, можно получать доступ к аргументам командной строки через “магическую” переменную `args` и возвращать значение вызывающему компоненту. За операторами верхнего уровня могут следовать объявления типов и пространств имен.

Средства доступа только для инициализации

Средство доступа только для инициализации (см. раздел “Средства доступа только для инициализации” в главе 3) в объявлении свойства использует ключевое слово `init` вместо `set`:

```
class Foo { public int ID { get; init; } }
```

Такое свойство ведет себя подобно свойству только для чтения, но также может устанавливаться через инициализатор объектов:

```
var foo = new Foo { ID = 123 };
```

Это позволяет создавать неизменяемые (допускающие только чтение) типы, которые можно заполнять посредством инициализатора объекта, а не конструктора, и помогает избавляться от конструкторов, принимающих большое количество необязательных параметров. Кроме того, средства доступа только для инициализации делают возможным *неразрушающее изменение* в случае применения в записях.

Записи

Запись (см. раздел “Записи” в главе 4) является специальным видом класса, который предназначен для эффективной работы с неизменяемыми данными. Его наиболее характерная особенность заключается в том, что он поддерживает *неразрушающее изменение* через новое ключевое слово (`with`):

```
Point p1 = new Point (2, 3);
Point p2 = p1 with { Y = 4 }; // p2 - копия p1, но с полем Y, установленным в 4
Console.WriteLine (p2);      // Point { X = 2, Y = 4 }

record Point
{
    public Point (double x, double y) => (X, Y) = (x, y);
    public double X { get; init; }
    public double Y { get; init; }
}
```

В простых случаях запись позволяет также избавиться от написания стереотипного кода определения свойств, конструктора и деструктора. Определение записи `Point` можно заменить следующим определением, не утрачивая функциональности:

```
record Point (double X, double Y);
```

Как и кортежи, по умолчанию записи поддерживают структурную эквивалентность. Записи могут быть подклассами других записей и включать конструкции, которые допускаются в классах. Во время выполнения компилятор реализует записи в виде классов.

Улучшения в сопоставлении с образцом

Реляционный шаблон (см. раздел “Шаблоны” в главе 4) разрешает применять в шаблонах операции `<`, `>`, `<=` и `>=`:

```
string GetWeightCategory (decimal bmi) => bmi switch {
    < 18.5m => "underweight",
    < 25m => "normal",
    < 30m => "overweight",
    _ => "obese" };
```

С помощью комбинаторов шаблонов шаблоны можно объединять посредством трех новых ключевых слов (`and`, `or` и `not`):

```
bool IsVowel (char c) => c is 'a' or 'e' or 'i' or 'o' or 'u';
bool IsLetter (char c) => c is >= 'a' and <= 'z'
                           or >= 'A' and <= 'Z';
```

Подобно операциям `&&` и `||` комбинатор `and` имеет более высокий приоритет, чем комбинатор `or`. Приоритеты можно переопределять с использованием круглых скобок.

Комбинатор `not` можно использовать с *шаблоном типа* для проверки, имеет объект указанный тип или нет:

```
if (obj is not string) ...
```

Выражения `new` целевого типа

При конструировании объекта в C# 9 разрешено опускать имя типа, если компилятор способен однозначно его вывести:

```
System.Text.StringBuilder sb1 = new();
System.Text.StringBuilder sb2 = new ("Test");
```

Это особенно удобно, когда объявление и инициализация переменной находятся в разных частях кода:

```
class Foo
{
    System.Text.StringBuilder sb;
    public Foo (string initialValue) => sb = new (initialValue);
}
```

И в следующем сценарии:

```
MyMethod (new ("test"));
void MyMethod (System.Text.StringBuilder sb) { ... }
```

Дополнительные сведения ищите в разделе “Выражения `new` целевого типа” главы 2.

Улучшения в возможностях взаимодействия

В C# 9 появились *указатели на функции* (см. раздел “Указатели на функции” в главе 4 и раздел “Обратные вызовы с помощью указателей на функции” в главе 24). Основная их цель — позволить неуправляемому коду вызывать статические методы в C# без накладных расходов на создание экземпляра делегата, с возможностью обхода уровня `P/Invoke`, когда типы аргументов и возвращаемые типы являются *преобразуемыми* (*blittable*), т.е. представляются идентично с каждой стороны.

В C# 9 также введены целочисленные типы с собственным размером `nint` и `nuint` (см. раздел “Целочисленные типы с собственным размером” в главе 4), которые во время выполнения отображаются на `System.IntPtr` и `System.UIntPtr`. На этапе компиляции они ведут себя подобно числовым типам с поддержкой арифметических операций.

Остальные новые средства

Добавок версия C# 9 позволяет:

- переопределять метод или свойство, доступное только для чтения, чтобы возвращался более производный тип (см. раздел “Ковариантные возвращаемые типы” в главе 3);
- применять атрибуты к локальным функциям (см. раздел “Атрибуты” в главе 4);
- применять ключевое слово `static` к лямбда-выражениям или локальным функциям для гарантирования того, что не произойдет случайный захват локальных переменных или переменных экземпляра (см. раздел “Статические лямбда-выражения” в главе 4);
- заставлять любой тип работать с оператором `foreach` за счет написания расширяющего метода `GetEnumerator`;
- определять метод *инициализатора модуля*, который выполняется один раз при первой загрузке сборки, применяя атрибут `[ModuleInitializer]` к статическому методу `void` без параметров;
- использовать “отбрасывание” (символ подчеркивания) в качестве аргумента лямбда-выражения;
- создавать *расширенные частичные методы*, которые обязательны для реализации, делая возможными сценарии, такие как новые генераторы исходного кода Roslyn (см. раздел “Расширенные частичные методы” в главе 3);
- применять атрибут к методам, типам или модулям, чтобы предотвращать инициализацию локальных переменных исполняющей средой (см. раздел “Атрибут `SkipLocalsInit`” в главе 4).

Нововведения версии C# 8.0

Версия C# 8.0 впервые поставлялась вместе с *Visual Studio 2019* и по-прежнему используется в наши дни при нацеливании на .NET Core 3 или .NET Standard 2.1.

Индексы и диапазоны

Индексы и диапазоны упрощают работу с элементами или порциями массива (либо с низкоуровневыми типами `Span<T>` и `ReadOnlySpan<T>`).

Индексы позволяют ссылаться на элементы относительно конца массива с применением операции `^`. Например, `^1` ссылается на последний элемент, `^2` ссылается на предпоследний элемент и т.д.:

```
char[] vowels = new char[] {'a', 'e', 'i', 'o', 'u'};
char lastElement = vowels [^1]; // 'u'
char secondToLast = vowels [^2]; // 'o'
```

Диапазоны позволяют “нарезать” массив посредством операции . . .

```
char[] firstTwo = vowels [..2];           // 'a', 'e'  
char[] lastThree = vowels [2..];          // 'i', 'o', 'u'  
char[] middleOne = vowels [2..3]           // 'i'  
char[] lastTwo =     vowels [^2..];         // 'o', 'u'
```

Индексы и диапазоны реализованы в C# с помощью типов Index и Range:

```
Index last = ^1;  
Range firstTwoRange = 0..2;  
char[] firstTwo = vowels [firstTwoRange]; // 'a', 'e'
```

Вы можете поддерживать индексы и диапазоны в собственных классах, определяя индексатор с типом параметра Index или Range:

```
class Sentence  
{  
    string[] words = "The quick brown fox".Split();  
    public string this [Index index] => words [index];  
    public string[] this [Range range] => words [range];  
}
```

За дополнительной информацией обращайтесь в раздел “Индексы и диапазоны” главы 2.

Присваивание с объединением с null

Операция ??= присваивает значение переменной, только если она равна null. Вместо кода:

```
if (s == null) s = "Hello, world";
```

теперь можно записывать такой код:

```
s ??= "Hello, world";
```

Объявления using

Если опустить круглые скобки и блок операторов, следующий за оператором using, то он становится *объявлением using*. В результате ресурс освобождается, когда поток управления выходит за пределы включающего блока операторов:

```
if (File.Exists ("file.txt"))  
{  
    using var reader = File.OpenText ("file.txt");  
    Console.WriteLine (reader.ReadLine());  
    ...  
}
```

В этом случае память для reader будет освобождена, как только поток выполнения окажется вне блока оператора if.

Члены, предназначенные только для чтения

В C# 8 разрешено применять модификатор readonly к функциям структуры. Это гарантирует, что если функция попытается модифицировать любое поле, то генерируется ошибка на этапе компиляции:

```
struct Point
{
    public int X, Y;
    public readonly void ResetX() => X = 0; // Ошибка!
}
```

Если функция `readonly` вызывает функцию не `readonly`, тогда компилятор генерирует предупреждение (и защитным образом копирует структуру во избежание возможности изменения).

Статические локальные методы

Добавление модификатора `static` к локальному методу не позволяет ему видеть локальные переменные и параметры объемлющего метода, что помогает ослабить связность и разрешить локальному методу объявлять переменные по своему усмотрению без риска возникновения конфликта с переменными в объемлющем методе.

Стандартные члены интерфейса

В C# 8 к члену интерфейса можно добавлять стандартную реализацию, делая его необязательным для реализации:

```
interface ILogger
{
    void Log (string text) => Console.WriteLine (text);
}
```

В итоге появляется возможность добавлять член к интерфейсу, не нарушая работу реализаций. Стандартные реализации должны вызываться явно через интерфейс:

```
((ILogger)new Logger()).Log ("message");
```

В интерфейсах также можно определять статические члены (включая поля), к которым возможен доступ из кода внутри стандартных реализаций:

```
interface ILogger
{
    void Log (string text) => Console.WriteLine (Prefix + text);
    static string Prefix = "";
}
```

либо из кода за рамками интерфейса, если только доступ к ним не ограничен посредством модификатора доступности для статического члена интерфейса (такого как `private`, `protected` или `internal`):

```
ILogger.Prefix = "File log: ";
```

Поля экземпляров запрещены. Дополнительные сведения ищите в разделе “Стандартные члены интерфейса” главы 3.

Выражения `switch`

Начиная с версии C# 8, конструкцию `switch` можно использовать в контексте выражения:

```

string cardName = cardNumber switch // Предполагается, что cardNumber -
                                    // целое число
{
    13 => "King",                  // Король
    12 => "Queen",                // Дама
    11 => "Jack",                 // Валет
    _   => "Pip card"             // Нефигурная карта; эквивалент default
};

```

Дополнительные примеры приведены в разделе “Выражения switch” главы 2.

Шаблоны кортежей, позиционные шаблоны и шаблоны свойств

В C# 8 поддерживаются три новых шаблона по большей части в интересах операторов/выражений `switch` (см. раздел “Шаблоны” в главе 4). Шаблоны кортежей позволяют переключаться по множеству значений:

```

int cardNumber = 12; string suite = "spades";
string cardName = (cardNumber, suite) switch
{
    (13, "spades") => "King of spades",
    (13, "clubs")  => "King of clubs",
    ...
};

```

Позиционные шаблоны допускают похожий синтаксис для объектов, которые предоставляют деконструктор, а *шаблоны свойств* позволяют делать сопоставление со свойствами объекта. Все шаблоны можно применять как в операторах/выражениях `switch`, так и в операции `is`. В следующем примере используется шаблон свойств для проверки, является ли `obj` строкой с длиной 4:

```
if (obj is string { Length: 4 }) ...
```

Сылочные типы, допускающие null

В то время как *типы значений, допускающие null*, наделяют типы значений способностью принимать значение `null`, *сылочные типы, допускающие null*, делают противоположное и привносят в сылочные типы возможность (в определенной степени) *не быть null*, что помогает предотвращать ошибки `NullReferenceException`. Сылочные типы, допускающие `null`, обеспечивают уровень безопасности, который навязывается исключительно компилятором в форме предупреждений и ошибок, когда он обнаруживает код, подверженный риску генерации `NullReferenceException`.

Сылочные типы, допускающие `null`, могут быть включены либо на уровне проекта (через элемент `Nullable` в файле проекта `.csproj`), либо в коде (через директиву `#nullable`). После их включения компилятор делает недопустимость `null` правилом по умолчанию: если вы хотите, чтобы сырочный тип принимал значения `null`, тогда должны применять суффикс `?` для указания *сырочного типа, допускающего null*:

```

(nullable enable) // Начиная с этого места, включить
                  // сырочные типы, допускающие null
string s1 = null; // Компилятор генерирует предупреждение!
                  // (s1 не допускает null)
string? s2 = null; // Нормально: s2 имеет сырочный тип, допускающий null

```

Неинициализированные поля также приводят к генерации предупреждения (если тип не помечен как допускающий null), как и разыменование ссылочного типа, допускающего null, если компилятор сочтет, что может возникнуть исключение NullReferenceException:

```
void Foo (string? s) => Console.Write (s.Length); // Предупреждение (.Length)
```

Чтобы убрать предупреждение, можно использовать *null-терпимую* (null-forgiving) операцию (!):

```
void Foo (string? s) => Console.Write (s!.Length);
```

Полное обсуждение ищите в разделе “Ссылочные типы, допускающие null” главы 4.

Асинхронные потоки данных

До выхода версии C# 8 вы могли применять `yield return` для написания *итератора* или `await` для написания *асинхронной функции*. Но делать и то, и другое с целью написания итератора, который ожидает, асинхронно выдавая элементы, было невозможно. В версии C# 8 ситуация исправлена за счет введения *асинхронных потоков данных*:

```
async IAsyncEnumerable<int> RangeAsync (
    int start, int count, int delay)
{
    for (int i = start; i < start + count; i++)
    {
        await Task.Delay (delay);
        yield return i;
    }
}
```

Оператор `await foreach` потребляет асинхронный поток данных:

```
await foreach (var number in RangeAsync (0, 10, 100))
    Console.WriteLine (number);
```

За дополнительными сведениями обращайтесь в раздел “Асинхронные потоки данных” главы 14.

Нововведения версий C# 7.x

Версии C# 7.x впервые поставлялись вместе с Visual Studio 2017. В настоящее время версия C# 7.3 все еще используется в Visual Studio 2019 при нацеливании на .NET Core 2, .NET Framework 4.6–4.8 или .NET Standard 2.0.

C# 7.3

В C# 7.3 произведены незначительные улучшения существующих средств, такие как возможность использования операций эквивалентности с кортежами, усовершенствованное распознавание перегруженных версий и возможность применения атрибутов к поддерживающим полям автоматических свойств:

```
[field:NonSerialized]
public int MyProperty { get; set; }
```

Кроме того, версия C# 7.3 построена на основе расширенных программных средств низкоуровневого выделения памяти C# 7.2 с возможностью повторного присваивания значений *локальным ссылочным переменным* (*ref local*) без необходимости в закреплении при индексации полей *fixed* и поддержкой инициализаторов полей с помощью *stackalloc*:

```
int* pointer = stackalloc int[] {1, 2, 3};  
Span<int> arr = stackalloc [] {1, 2, 3};
```

Обратите внимание, что память, распределенная в стеке, может присваиваться прямо *Span<T>*. Мы опишем интервалы и причины их использования в главе 23.

C# 7.2

В C# 7.2 были добавлены модификатор *private protected* (*пересечение internal и protected*), возможность указания именованных аргументов с позиционными аргументами при вызове методов, а также структуры *readonly*. Структура *readonly* обязывает все поля быть *readonly*, чтобы помочь заявить о намерении и предоставить компилятору большую свободу в оптимизации:

```
readonly struct Point  
{  
    public readonly int X, Y;           // X и Y обязаны быть readonly  
}
```

В C# 7.2 также добавлены специализированные возможности, содействующие микрооптимизации и программированию с низкоуровневым выделением памяти: см. разделы “Модификатор *in*”, “Локальные ссылочные переменные” и “Возвращаемые ссылочные значения” в главе 2 и раздел “Ссылочные структуры” в главе 3.

C# 7.1

Начиная с версии C# 7.1, в случае применения ключевого слова *default* тип допускается не указывать, если он может быть выведен:

```
decimal number = default;           // number является десятичным
```

Кроме того, C# 7.1 ослабляет правила для операторов *switch* (так что для параметров обобщенных типов можно использовать сопоставление с образцом), позволяет методу *Main* программы быть асинхронным и разрешает выводить имена элементов кортежей:

```
var now = DateTime.Now;  
var tuple = (now.Hour, now.Minute, now.Second);
```

Усовершенствования числовых литералов

Для улучшения читабельности числовые литералы в C# 7 могут включать символы подчеркивания, называемые *разделителями групп разрядов*, которые компилятор игнорирует:

```
int million = 1_000_000;
```

С помощью префикса *0b* могут указываться *двоичные литералы*:

```
var b = 0b1010_1011_1100_1101_1110_1111;
```

Переменные `out` и отбрасывание

В версии C# 7 облегчен вызов методов, содержащих параметры `out`. Прежде всего, теперь вы можете объявлять *переменные out* на лету (см. раздел “Переменные `out` и отбрасывание” в главе 2):

```
bool successful = int.TryParse ("123", out int result);
Console.WriteLine (result);
```

А при вызове метода с множеством параметров `out` с помощью символа подчеркивания вы можете *отбрасывать* те из них, которые вам не интересны:

```
SomeBigMethod (out _, out _, out _, out int x, out _, out _, out _);
Console.WriteLine (x);
```

Шаблоны типов и шаблонные переменные

Посредством операции `is` вы также можете вводить переменные на лету. Они называются *шаблонными переменными* (см. раздел “Введение шаблонной переменной” в главе 3):

```
void Foo (object x)
{
    if (x is string s)
        Console.WriteLine (s.Length);
}
```

Оператор `switch` поддерживает шаблоны типов, поэтому вы можете переключаться на основе *типа* и на основе констант (см. раздел “Переключение по типам” в главе 2). Вы можете указывать условия в конструкции `when` и также переключаться по значению `null`:

```
switch (x)
{
    case int i:
        Console.WriteLine ("It's an int!"); // Это целочисленное значение!
        break;
    case string s:
        Console.WriteLine (s.Length);      // Можно использовать переменную s
        break;
    case bool b when b == true: // Соответствует, только когда b равно true
        Console.WriteLine ("True");
        break;
    case null:
        Console.WriteLine ("Nothing");   // Ничего
        break;
}
```

Локальные методы

Локальный метод — это метод, объявленный внутри другой функции (см. раздел “Локальные методы” в главе 3):

```
void WriteCubes()
{
    Console.WriteLine (Cube (3));
    Console.WriteLine (Cube (4));
```

```
Console.WriteLine (Cube (5));
int Cube (int value) => value * value * value;
}
```

Локальные методы видны только вмещающей функции и могут захватывать локальные переменные тем же способом, что и лямбда-выражения.

Больше членов, сжатых до выражений

В версии C# 6 появился синтаксис сжатия до выражений (`=>`) для методов, свойств только для чтения, операций и индексаторов. В версии C# 7 он был расширен на конструкторы, свойства для чтения/записи и финализаторы:

```
public class Person
{
    string name;

    public Person (string name) => Name = name;
    public string Name
    {
        get => name;
        set => name = value ?? "";
    }
    ~Person () => Console.WriteLine ("finalize"); // финализировать
}
```

Деконструкторы

В версии C# 7 появился шаблон **деконструирования** (см. раздел “Деконструкторы” в главе 3). В то время как конструктор обычно принимает набор значений (в качестве параметров) и присваивает их полям, **деконструктор** делает противоположное, присваивая поля обратно набору переменных. Деконструктор для класса Person из предыдущего примера можно было бы написать следующим образом (обработка исключений опущена):

```
public void Deconstruct (out string firstName, out string lastName)
{
    int spacePos = name.IndexOf (' ');
    firstName = name.Substring (0, spacePos);
    lastName = name.Substring (spacePos + 1);
}
```

Деконструкторы вызываются с помощью специального синтаксиса:

```
var joe = new Person ("Joe Bloggs");
var (first, last) = joe; // Деконструирование
Console.WriteLine (first); // Joe
Console.WriteLine (last); // Bloggs
```

Кортежи

Пожалуй, самым заметным усовершенствованием, внесенным в версию C# 7, стала явная поддержка **кортежей** (см. раздел “Кортежи” в главе 4). Кортежи предоставляют простой способ хранения набора связанных значений:

```
var bob = ("Bob", 23);
Console.WriteLine (bob.Item1); // Bob
Console.WriteLine (bob.Item2); // 23
```

Кортежи в C# являются “синтаксическим сахаром” для использования обобщенных структур `System.ValueTuple<...>`. Но благодаря магии компилятора элементы кортежа могут быть именованными:

```
var tuple = (name:"Bob", age:23);
Console.WriteLine (tuple.name); // Bob
Console.WriteLine (tuple.age); // 23
```

С появлением кортежей у функций появилась возможность возвращения множества значений без обращения к параметрам `out` или добавочному типу:

```
static (int row, int column) GetFilePosition() => (3, 10);
static void Main()
{
    var pos = GetFilePosition();
    Console.WriteLine (pos.row); // 3
    Console.WriteLine (pos.column); // 10
}
```

Кортежи неявно поддерживают шаблон деконструирования, поэтому их легко деконструировать в индивидуальные переменные:

```
static void Main()
{
    (int row, int column) = GetFilePosition(); // Создает две локальные
                                                // переменные
    Console.WriteLine (row); // 3
    Console.WriteLine (column); // 10
}
```

Выражения `throw`

До выхода версии C# 7 конструкция `throw` всегда была оператором. Теперь она может также появляться как выражение в функциях, сжатых до выражения:

```
public string Foo() => throw new NotImplementedException();
```

Выражение `throw` может также находиться внутри тернарной условной операции:

```
string Capitalize (string value) =>
    value == null ? throw new ArgumentException ("value") :
    value == "" ? "" :
    char.ToUpper (value[0]) + value.Substring (1);
```

Нововведения версии C# 6.0

Особенностью версии C# 6.0, поставляемой в составе *Visual Studio 2015*, стал компилятор нового поколения, который был реализован полностью на языке C#.

Известный как проект Roslyn, новый компилятор делает видимым весь конвейер компиляции через библиотеки, позволяя проводить кодовый анализ для произвольного исходного кода. Сам компилятор представляет собой проект с открытым кодом, и его исходный код доступен по ссылке <http://github.com/dotnet/roslyn>.

Кроме того, в версии C# 6.0 появилось несколько небольших, но важных усовершенствований, направленных главным образом на сокращение беспорядка в коде.

null-условная операция (или элвис-операция), рассматриваемая в главе 2, устраняет необходимость в явной проверке на равенство null перед вызовом метода или доступом к члену типа. В следующем примере вместо генерации исключения NullReferenceException переменная result получает значение null:

```
System.Text.StringBuilder sb = null;  
string result = sb?.ToString(); // Переменная result равна null
```

Функции, сжатые до выражений (expression-bodied function), которые обсуждаются в главе 3, дают возможность записывать методы, свойства, операции и индексаторы, содержащие единственное выражение, более компактно в стиле лямбда-выражений:

```
public int TimesTwo (int x) => x * 2;  
public string SomeProperty => "Property value";
```

Инициализаторы свойств (глава 3) позволяют присваивать начальные значения автоматическим свойствам:

```
public DateTime Created { get; set; } = DateTime.Now;
```

Инициализируемые свойства также могут быть допускающими только чтение:

```
public DateTime Created { get; } = DateTime.Now;
```

Свойства, предназначенные только для чтения, можно также устанавливать в конструкторе, что облегчает создание неизменяемых (допускающих только чтение) типов.

Инициализаторы индексов (глава 4) делают возможной инициализацию за один шаг для любого типа, который открывает доступ к индексатору:

```
new Dictionary<int, string>()  
{  
    [3] = "three",  
    [10] = "ten"  
}
```

Интерполяция строк (см. раздел “Строковый тип” в главе 2) предлагает лаконичную альтернативу вызову метода string.Format:

```
string s = $"It is {DateTime.Now.DayOfWeek} today";
```

Фильтры исключений (см. раздел “Операторы try и исключения” в главе 4) позволяют применять условия к блокам catch:

```
string html;
try
{
    html = await new HttpClient().GetStringAsync ("http://asef");
}
catch (WebException ex) when (ex.Status == WebExceptionStatus.Timeout)
{
    ...
}
```

Директива `using static` (см. раздел “Пространства имен” в главе 2) позволяет импортировать все статические члены типа, так что такими членами можно пользоваться без уточнения имени типа:

```
using static System.Console;
...
WriteLine ("Hello, world"); // WriteLine вместо Console.WriteLine
```

Операция `nameof` (глава 3) возвращает имя переменной, типа или другого символа в виде строки, что препятствует нарушению работы кода, когда какой-то символ переименовывается в Visual Studio:

```
int capacity = 123;
string x = nameof (capacity); // x имеет значение "capacity"
string y = nameof (Uri.Host); // y имеет значение "Host"
```

Наконец, в C# 6.0 разрешено применять `await` внутри блоков `catch` и `finally`.

Нововведения версии C# 5.0

Крупным нововведением версии C# 5.0 была поддержка асинхронных функций с помощью двух новых ключевых слов, `async` и `await`. Асинхронные функции делают возможными асинхронные продолжения, которые облегчают написание быстрореагирующих и безопасных к потокам обогащенных клиентских приложений. Они также упрощают написание эффективных приложений с высоким уровнем параллелизма и интенсивным вводом-выводом, которые не связывают потоковый ресурс при выполнении операций. Асинхронные функции подробно рассматриваются в главе 14.

Нововведения версии C# 4.0

В C# 4.0 появились четыре основных усовершенствования.

- *Динамическое связывание* (главы 4 и 19) откладывает связывание — процесс распознавания типов и членов — с этапа компиляции до времени выполнения и полезно в сценариях, которые иначе требовали бы сложного кода рефлексии. Динамическое связывание также удобно при взаимодействии с динамическими языками и компонентами СОМ.
- *Необязательные параметры* (глава 2) позволяют функциям указывать стандартные значения параметров, так что в вызывающем коде аргументы можно опускать. *Именованные аргументы* дают возможность вызывающему коду идентифицировать аргумент по имени, а не по позиции.

- Правила *вариантности типов* в C# 4.0 были ослаблены (главы 3 и 4), так что параметры типа в обобщенных интерфейсах и обобщенных делегатах могут помечаться как *ковариантные* или *контравариантные*, делая возможными более естественные преобразования типов.
- *Взаимодействие с COM* (глава 24) в C# 4.0 было улучшено в трех отношениях. Во-первых, аргументы могут передаваться по ссылке без ключевого свойства `ref` (что особенно удобно в сочетании с необязательными параметрами). Во-вторых, сборки, которые содержат типы взаимодействия с COM, можно *связывать*, а не *ссыльаться* на них. Связанные типы взаимодействия поддерживают эквивалентность типов, устранив необходимость в наличии *основных сборок взаимодействия* (Primary Interop Assembly) и положив конец мучениям с ведением версий и развертыванием. В-третьих, функции, которые возвращают COM-типы `variant` из связанных типов взаимодействия, отображаются на тип `dynamic`, а не `object`, ликвидировав потребность в приведении.

Нововведения версии C# 3.0

Средства, добавленные в версию C# 3.0, по большей части были сосредоточены на возможностях языка *интегрированных запросов* (Language Integrated Query — LINQ). Язык LINQ позволяет записывать запросы прямо внутри программы C# и *статически* проверять их корректность, при этом допуская запросы как к локальным коллекциям (вроде списков или документов XML), так и к удаленным источникам данных (наподобие баз данных). Средства, которые были добавлены в версию C# 3.0 для поддержки LINQ, включают в себя неявно типизированные локальные переменные, анонимные типы, инициализаторы объектов, лямбда-выражения, расширяющие методы, выражения запросов и деревья выражений.

Неявно типизированные локальные переменные (ключевое слово `var`; см. главу 2) позволяют опускать тип переменной в операторе объявления, разрешая компилятору выводить его самостоятельно. Это уменьшает беспорядок, а также делает возможными *анонимные типы* (глава 4), которые представляют собой простые классы, создаваемые на лету и обычно применяемые в финальном выводе запросов LINQ. Массивы тоже могут быть неявно типизированными (см. главу 2).

Инициализаторы объектов (глава 3) упрощают конструирование объектов, позволяя устанавливать свойства прямо в вызове конструктора. Инициализаторы объектов работают как с именованными, так и с анонимными типами.

Лямбда-выражения (глава 4) — это миниатюрные функции, создаваемые компилятором на лету, которые особенно удобны в “текучем” синтаксисе запросов LINQ (глава 8).

Расширяющие методы (глава 4) расширяют существующий тип новыми методами (не изменяя определение типа) и делают статические методы похожими на методы экземпляра. Операции запросов LINQ реализованы как расширяющие методы.

Выражения запросов (глава 8) предоставляют высокоуровневый синтаксис для написания запросов LINQ, которые могут быть существенно проще при работе с множеством последовательностей или переменных диапазонов.

Деревья выражений (глава 8) — это миниатюрные кодовые модели документных объектов (Document Object Model — DOM), которые описывают лямбда-выражения, присвоенные переменным специального типа `Expression<TDelegate>`. Деревья выражений позволяют запросам LINQ выполняться удаленно (например, на сервере базы данных), поскольку их можно анализировать и транслировать во время выполнения (скажем, в оператор SQL).

В C# 3.0 также были добавлены автоматические свойства и частичные методы.

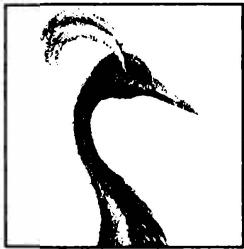
Автоматические свойства (глава 3) сокращают работу по написанию свойств, которые просто читают и устанавливают закрытое поддерживающее поле, заставляя компилятор делать все автоматически. *Частичные методы* (глава 3) позволяют автоматически сгенерированному частичному классу представлять настраиваемые привязки для ручного написания кода, который “исчезает” в случае, если не используется.

Нововведения версии C# 2.0

Крупными нововведениями в версии C# 2 были обобщения (глава 3), типы, допускающие значение `null` (глава 4), итераторы (глава 4) и анонимные методы (предшественники лямбда-выражений). Перечисленные средства подготовили почву для введения LINQ в версии C# 3.

В C# 2 также была добавлена поддержка частичных классов, статических классов и множества мелких разносторонних средств, таких как уточнитель псевдонима пространства имен, дружественные сборки и буферы фиксированных размеров.

Введение обобщений потребовало новой среды CLR (CLR 2.0), поскольку обобщения поддерживают полную точность типов во время выполнения.



Основы языка C#

В настоящей главе вы ознакомитесь с основами языка C#.



Почти все листинги кода, приведенные в настоящей книге, доступны в виде интерактивных примеров для LINQPad. Проработка примеров в сочетании с чтением книги ускоряет процесс изучения, т.к. вы можете редактировать код примеров и немедленно видеть результаты без необходимости в настройке проектов и решений в Visual Studio.

Для загрузки примеров перейдите на вкладку Samples (Примеры) в окне LINQPad и щелкните на ссылке Download/import more samples (Загрузить/импортировать дополнительные примеры). Утилита LINQPad бесплатна и доступна для загрузки по ссылке <http://www.linqpad.net>.

Первая программа на C#

Ниже показана программа, которая перемножает 12 и 30, после чего выводит на экран результат 360. Двойная косая черта (//) указывает на то, что остаток строки является комментарием:

```
int x = 12 * 30;                      // Оператор 1
System.Console.WriteLine (x);           // Оператор 2
```

Программа состоит из двух *операторов*. Операторы в C# выполняются последовательно и завершаются точкой с запятой. Первый оператор вычисляет выражение $12 * 30$ и сохраняет результат в *переменной* по имени x, которая имеет 32-битный целочисленный тип (int). Второй оператор вызывает метод *WriteLine* класса Console, который определен в пространстве имен System. В итоге значение переменной x выводится в текстовое окно на экране.

Метод выполняет функцию; класс группирует функции-члены и данные-члены с целью формирования объектно-ориентированного строительного блока. Класс Console группирует члены, которые поддерживают функциональность ввода-вывода в командной строке, такие как *WriteLine*. Класс является разновидностью типа, что будет обсуждаться в разделе “Основы типов” далее в главе.

На самом внешнем уровне типы организованы в *пространства имен*. Многие часто применяемые типы, включая класс Console, находятся в пространстве имен System. Библиотеки .NET организованы в виде вложенных пространств имен. Например, пространство имен System.Text содержит типы для обработки текста, а System.IO — типы для ввода-вывода.

Уточнение класса `Console` пространством имен `System` приводит к перегруженности кода. Директива `using` позволяет избежать такой перегруженности, импортируя пространство имен:

```
using System;           // Импортировать пространство имен System.  
int x = 12 * 30;  
Console.WriteLine (x); // Нет необходимости указывать System.
```

Базовая форма многократного использования кода предусматривает написание функций более высокого уровня, которые вызывают функции более низкого уровня. Мы можем провести *рефакторинг* программы, выделив пригодный к многократному применению метод по имени `FeetToInches`, который умножает целое число на 12:

```
using System;  
Console.WriteLine (FeetToInches (30));      // 360  
Console.WriteLine (FeetToInches (100));      // 1200  
int FeetToInches (int feet)  
{  
    int inches = feet * 12;  
    return inches;  
}
```

Наш метод содержит последовательность операторов, заключенных в пару фигурных скобок. Такая конструкция называется *блоком операторов*. За счет указания *параметров* метод может получать *входные* данные из вызывающего кода, а за счет указания *возвращаемого типа* — передавать *выходные* данные обратно в вызывающий код. Наш метод `FeetToInches` имеет параметр для входного значения в футах и возвращаемый тип для выходного значения в дюймах:

```
int FeetToInches (int feet)  
...
```

Литералы 30 и 100 — это *аргументы*, передаваемые методу `FeetToInches`.

Если метод не принимает входные данные, то нужно использовать пустые круглые скобки. Если метод ничего не возвращает, тогда следует применять *ключевое слово void*:

```
using System;  
SayHello();  
void SayHello()  
{  
    Console.WriteLine ("Hello, world");  
}
```

Методы являются одним из нескольких видов функций в C#. Другим видом функции, задействованным в примере программы, была *операция **, которая выполняет умножение. Существуют также *конструкторы, свойства, события, индексаторы и финализаторы*.

Компиляция

Компилятор C# транслирует исходный код (набор файлов с расширением `.cs`) в *сборку (assembly)*. Сборка — это единица упаковки и развертывания в .NET. Сборка может быть либо *приложением*, либо *библиотекой*. Нормальное

консольное или Windows-приложение имеет *точку входа*, тогда как библиотека — нет. Библиотека предназначена для вызова (ссылки) приложением или другими библиотеками. Сама платформа .NET представляет собой набор сборок (плюс исполняющую среду).

Программы в предыдущем разделе начинались непосредственно с последовательности операторов (называемых *операторами верхнего уровня*). Присутствие операторов верхнего уровня неявно создает точку входа для консольного или Windows-приложения. (Когда операторов верхнего уровня нет, точку входа приложения обозначает *метод Main* — см. раздел “Специальные типы” далее в главе.)



В отличие от сборок .NET Framework сборки .NET 8 не имеют расширения .exe. Файл .exe, который вы можете видеть после построения приложения .NET 8, является специфичным к платформе собственным загрузчиком, отвечающим за запуск сборки .dll вашего приложения. .NET 8 также позволяет создавать автономное развертывание, которое включает загрузчик, ваши сборки и обязательные части исполняющей среды .NET — все в одном файле .exe. Вдобавок .NET 8 допускает раннюю (AOT) компиляцию, при которой исполняемый файл содержит предварительно скомпилированный собственный код для более быстрого запуска и снижения потребления памяти.

Инструмент dotnet (dotnet.exe в Windows) помогает управлять исходным кодом .NET и двоичными сборками из командной строки. Вы можете применять его для построения и запуска своей программы в качестве альтернативы использованию интегрированной среды разработки (Integrated Development Environment — IDE), такой как Visual Studio или Visual Studio Code.

Вы можете получить инструмент dotnet, установив комплект .NET 8 SDK или Visual Studio. По умолчанию он находится в %ProgramFiles%\dotnet в Windows или в /usr/bin/dotnet в Ubuntu Linux.

Для компиляции приложения инструменту dotnet требуется *файл проекта*, а также один или большее количество файлов кода C#. Следующая команда генерирует шаблон нового консольного проекта (создает его базовую структуру):

```
dotnet new Console -n MyFirstProgram
```

Команда создает подкаталог по имени MyFirstProgram, содержащий файл проекта по имени MyFirstProgram.csproj и файл кода C# по имени Program.cs с методом, который выводит “Hello, world”.

Чтобы скомпилировать и запустить свою программу, введите приведенную ниже команду в подкаталоге MyFirstProgram:

```
dotnet run MyFirstProgram
```

Или введите такую команду, если вы хотите только скомпилировать программу, не запуская ее:

```
dotnet build MyFirstProgram.csproj
```

Выходная сборка будет сохранена в подкаталоге внутри bin\debug. Сборки подробно рассматриваются в главе 17.

Синтаксис

На синтаксис C# оказал влияние синтаксис языков С и С++. В этом разделе будут описаны элементы синтаксиса C# с применением в качестве примера следующей программы:

```
using System;  
int x = 12 * 30;  
Console.WriteLine (x);
```

Идентификаторы и ключевые слова

Идентификаторы представляют собой имена, которые программисты выбирают для своих классов, методов, переменных и т.д. Ниже перечислены идентификаторы из примера программы в порядке их появления:

System x Console WriteLine

Идентификатор должен быть целостным словом, которое состоит из символов Unicode и начинается с буквы или символа подчеркивания. Идентификаторы в C# чувствительны к регистру символов. По соглашению для параметров, локальных переменных и закрытых полей должен применяться “верблюжий” стиль (вроде myVariable), а для всех остальных идентификаторов — стиль Pascal (наподобие MyMethod). Ключевые слова являются именами, которые имеют для компилятора особый смысл. В примере программы присутствуют два ключевых слова — using и int. Большинство ключевых слов зарезервировано, а это означает, что их нельзя использовать в качестве идентификаторов. Вот полный список зарезервированных ключевых слов в языке C#:

abstract	event	new	string
as	explicit	null	struct
base	extern	object	switch
bool	false	operator	this
break	finally	out	throw
byte	fixed	override	true
case	float	params	try
catch	for	private	typeof
char	foreach	protected	uint
checked	goto	public	ulong
class	if	readonly	unchecked
const	implicit	record	unsafe
continue	in	ref	ushort
decimal	int	return	using
default	interface	sbyte	virtual
delegate	internal	sealed	void
do	is	short	volatile
double	lock	sizeof	while
else	long	stackalloc	
enum	namespace	static	

Если вам действительно нужен идентификатор с именем, которое конфликтует с ключевым словом, то к нему необходимо добавить префикс @. Например:

```
int using = 123;           // Не допускается
int @using = 123;          // Разрешено
```

Символ @ не является частью самого идентификатора. Таким образом, @myVariable — то же самое, что и myVariable.

Контекстные ключевые слова

Некоторые ключевые слова являются **контекстными**, т.е. их можно использовать также в качестве идентификаторов — без символа @:

add	file	nameof	required
alias	from	nint	select
and	get	not	set
ascending	global	notnull	unmanaged
async	group	nuint	value
await	init	on	var
by	into	or	with
descending	join	orderby	when
dynamic	let	partial	where
equals	managed	remove	yield

Неоднозначность с контекстными ключевыми словами не может возникать внутри контекста, в котором они используются.

Литералы, знаки пунктуации и операции

Литералы — это элементарные порции данных, лексически встраиваемые в программу. В рассматриваемом примере программы присутствуют литералы 12 и 30.

Знаки пунктуации помогают размечать структуру программы. Примером может служить символ точки с запятой, который завершает оператор. Операторы могут записываться в нескольких строках:

```
Console.WriteLine
(1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 + 10);
```

Операция преобразует и объединяет выражения. Большинство операций в C# обозначаются с помощью некоторого символа, скажем, * для операции умножения. Мы обсудим операции более подробно позже в главе. Ниже перечислены операции, задействованные в примере программы:

```
=    *    .    ()
```

Точка обозначает членство (или десятичную точку в числовых литералах). Круглые скобки используются при объявлении или вызове метода; пустые круглые скобки указываются, когда метод не принимает аргументов. (Позже в главе вы увидите, что круглые скобки имеют и другие предназначения.) Знак “равно” выполняет *присваивание*. (Двойной знак “равно”, ==, производит сравнение эквивалентности.)

Комментарии

В C# поддерживаются два разных стиля документирования исходного кода: *однострочные комментарии* и *многострочные комментарии*. Однострочный комментарий начинается с двойной косой черты и продолжается до конца строки, например:

```
int x = 3; // Комментарий относительно присваивания 3 переменной x
```

Многострочный комментарий начинается с символов `/*` и заканчивается символами `*/`, например:

```
int x = 3; /* Это комментарий, который  
занимает две строчки */
```

В комментарии могут быть встроены XML-дескрипторы документации, которые объясняются в разделе “XML-документация” главы 4.

Основы типов

Тип определяет шаблон для значения. В следующем примере применяются два литерала типа `int` со значениями 12 и 30. Кроме того, объявляется *переменная* типа `int` по имени `x`:

```
int x = 12 * 30;  
Console.WriteLine (x);
```



Поскольку в большинстве листингов кода, приведенных в этой книге, требуются типы из пространства имен `System`, впредь оператор `using System;` будет опускаться кроме случаев, когда иллюстрируется какая-то концепция, связанная с пространствами имен.

Переменная обозначает ячейку в памяти, которая с течением времени может содержать разные значения. Напротив, константа всегда представляет одно и то же значение (подробнее об этом — позже):

```
const int y = 360;
```

Все значения в C# являются экземплярами какого-то типа. Смысл значения и набор возможных значений, которые способна иметь переменная, определяются ее типом.

Примеры предопределенных типов

Предопределенные типы — это типы, которые имеют специальную поддержку в компиляторе. Тип `int` является предопределенным типом для представления набора целых чисел, которые умещаются в 32 бита памяти, от -2^{31} до $2^{31}-1$, и стандартным типом для числовых литералов в рамках указанного диапазона. С экземплярами типа `int` можно выполнять функции, например, арифметические:

```
int x = 12 * 30;
```

Еще один предопределенный тип в C# — `string`. Тип `string` представляет последовательность символов, такую как ".NET" или "http://oreilly.com". Со строками можно работать, вызывая для них функции следующим образом:

```
string message = "Hello world";
string upperMessage = message.ToUpper();
Console.WriteLine (upperMessage);           // HELLO WORLD
int x = 2024;
message = message + x.ToString();
Console.WriteLine (message);                // Hello world2024
```

В этом примере вызывается `x.ToString()` для получения строкового представления целочисленного значения `x`. Вызывать метод `ToString` можно для переменной практически любого типа. Предопределенный тип `bool` поддерживает в точности два возможных значения: `true` и `false`. Тип `bool` обычно используется для условного разветвления потока выполнения с помощью оператора `if`:

```
bool simpleVar = false;
if (simpleVar)
    Console.WriteLine ("This will not print"); // Это не выводится
int x = 5000;
bool lessThanAMile = x < 5280;
if (lessThanAMile)
    Console.WriteLine ("This will print");      // Это будет выведено
```



В языке C# предопределенные типы (также называемые *встроенным типами*) распознаются по ключевым словам C#. Пространство имен `System` в .NET содержит много важных типов, которые не являются предопределенными в C# (например, `DateTime`).

Специальные типы

Точно так же, как можно записывать собственные методы, допускается создавать и свои типы. В следующем примере определяется специальный тип по имени `UnitConverter` — класс, который служит шаблоном для преобразования единиц:

```
UnitConverter feetToInchesConverter = new UnitConverter (12);
UnitConverter milesToFeetConverter = new UnitConverter (5280);
Console.WriteLine (feetToInchesConverter.Convert(30)); // 360
Console.WriteLine (feetToInchesConverter.Convert(100)); // 1200
Console.WriteLine (feetToInchesConverter.Convert(
    milesToFeetConverter.Convert(1))); // 63360

public class UnitConverter
{
    int ratio;                                // Поле
    public UnitConverter (int unitRatio)        // Конструктор
    {
        ratio = unitRatio;
    }
    public int Convert (int unit)                // Метод
    {
        return unit * ratio;
    }
}
```



В приведенном примере определение класса находится в том же файле, где располагаются операторы верхнего уровня. Поступать так законно — при условии, что сначала идут операторы верхнего уровня — и приемлемо при написании небольших тестовых программ. Стандартный подход для более крупных программ предусматривает помещение определения класса в отдельный файл, скажем, UnitConverter.cs.

Члены типа

Тип содержит *данные-члены* и *функции-члены*. Данными-членами в типе UnitConverter является поле по имени ratio. Функции-члены в типе UnitConverter — это метод Convert и конструктор UnitConverter.

Симметричность предопределенных и специальных типов

Привлекательный аспект языка C# связан с тем, что между предопределенными и специальными типами имеется лишь несколько отличий. Предопределенный тип int служит шаблоном для целых чисел. Он содержит данные — 32 бита — и предоставляет функции-члены, работающие с этими данными, такие как ToString. Аналогичным образом наш специальный тип UnitConverter действует в качестве шаблона для преобразований единиц. Он хранит данные — коэффициент (ratio) — и предоставляет функции-члены для работы с этими данными.

Конструкторы и создание экземпляров

Данные создаются путем *создания экземпляров* типа. Создавать экземпляры предопределенных типов можно просто за счет применения литерала вроде 12 или "Hello world". Экземпляры специального типа создаются через операцию new. Мы объявляли и создавали экземпляр типа UnitConverter с помощью следующего оператора:

```
UnitConverter feetToInchesConverter = new UnitConverter (12);
```

Немедленно после того, как операция new создала объект, вызывается *конструктор* объекта для выполнения инициализации. Конструктор определяется подобно методу за исключением того, что вместо имени метода и возвращаемого типа указывается имя типа, к которому относится конструктор:

```
public UnitConverter (int unitRatio) { ratio = unitRatio; }
```

Члены экземпляра и статические члены

Данные-члены и функции-члены, которые оперируют на *экземпляре* типа, называются *членами экземпляра*. Примерами членов экземпляра могут служить метод Convert в типе UnitConverter и метод ToString в типе int. По умолчанию члены являются членами экземпляра.

Данные-члены и функции-члены, которые не оперируют на экземпляре типа, можно помечать как *статические* (static). Для ссылки на статический член за пределами его типа указывается имя *типа*, а не *экземпляра*. Примером может служить метод WriteLine класса Console. Из-за того, что он статический, мы используем вызов Console.WriteLine(), но не new Console().WriteLine().

(В действительности Console объявлен как *статический класс*, т.е. все его члены являются статическими; создавать экземпляры класса Console никогда не придется.)

В следующем коде поле экземпляра Name принадлежит экземпляру класса Panda, представляющего панд, тогда как поле Population относится к набору всех экземпляров класса Panda. Ниже создаются два экземпляра класса Panda, выводятся их клички (поле Name) и популяция (поле Population):

```
Panda p1 = new Panda ("Pan Dee");
Panda p2 = new Panda ("Pan Dah");

Console.WriteLine (p1.Name);           // Pan Dee
Console.WriteLine (p2.Name);           // Pan Dah

Console.WriteLine (Panda.Population);   // 2

public class Panda
{
    public string Name;                // Поле экземпляра
    public static int Population;       // Статическое поле
    public Panda (string n)           // Конструктор
    {
        Name = n;                    // Присвоить значение полю экземпляра
        Population = Population + 1; // Инкрементировать значение
                                       // статического поля Population
    }
}
```

Попытка вычисления p1.Population или Panda.Name приведет к возникновению ошибки на этапе компиляции.

Ключевое слово **public**

Ключевое слово **public** открывает доступ к членам со стороны других классов. Если бы в рассматриваемом примере поле Name класса Panda не было помечено как **public**, то оно стало бы закрытым, и доступ к нему извне класса оказался бы невозможным. Пометка члена как открытого (**public**) означает, что данный тип разрешает другим типам видеть этот член, а все остальное будет относиться к закрытым деталям реализации. В рамках объектно-ориентированной терминологии говорят, что открытые члены *инкапсулируют* закрытые члены класса.

Определение пространств имен

В крупных программах имеет смысл организовывать типы в виде пространств имен. Вот как определить класс Panda внутри пространства имен **Animals**:

```
using System;
using Animals;

Panda p = new Panda ("Pan Dee");
Console.WriteLine (p.Name);

namespace Animals
{
```

```
public class Panda
{
    ...
}
```

В этом примере также *импортируется* пространство имен **Animals**, чтобы операторы верхнего уровня могли получать доступ к его типам, не уточняя их. Без такого импортирования пришлось бы поступать следующим образом:

```
Animals.Panda p = new Animals.Panda ("Pan Dee");
```

Пространства имен подробно обсуждаются в конце главы (в разделе “Пространства имен”).

Определение метода **Main**

До сих пор во всем примерах применялись операторы верхнего уровня (нововведение версии C# 9).

Без операторов верхнего уровня простое консольное или Windows-приложение выглядело бы так:

```
using System;
class Program
{
    static void Main() // Точка входа в программу
    {
        int x = 12 * 30;
        Console.WriteLine (x);
    }
}
```

В отсутствие операторов верхнего уровня компилятор C# ищет статический метод по имени **Main**, который становится точкой входа. Метод **Main** можно определять внутри любого класса (и допускается существование только одного метода **Main**).

Метод **Main** может дополнительно возвращать целочисленное значение (вместо **void**) для исполняющей среды (причем ненулевое значение обычно указывает на ошибку). Кроме того, метод **Main** может необязательно принимать в качестве параметра массив строк (который будет заполняться аргументами, переданными исполняющему файлу). Например:

```
static int Main (string[] args) {...}
```



Массив (наподобие **string[]**) представляет фиксированное количество элементов определенного типа. Массивы указываются за счет помещения квадратных скобок после типа элементов. Они будут описаны в разделе “Массивы” далее в главе.

(Метод **Main** может быть объявлен асинхронным и возвращать объект **Task** или **Task<int>** для поддержки асинхронного программирования, как объясняется в главе 14.)

Операторы верхнего уровня

Операторы верхнего уровня (введенные в версии C# 9) позволяют избежать багажа статического метода Main и содержащего его класса. Файл с операторами верхнего уровня состоит из трех частей в следующем порядке.

1. (Необязательные) директивы using.
2. Последовательность операторов, необязательно смешанная с объявлениями методов.
3. (Необязательные) объявления типов и пространства имен.

Вот пример:

```
using System;                                // Часть 1
Console.WriteLine ("Hello, world");           // Часть 2
void SomeMethod1() { ... }                   // Часть 2
Console.WriteLine ("Hello again!");           // Часть 2
void SomeMethod2() { ... }                   // Часть 2
class SomeClass { ... }                      // Часть 3
namespace SomeNamespace { ... }               // Часть 3
```

Поскольку CLR явно не поддерживает операторы верхнего уровня, компилятор транслирует такой код следующим образом:

```
using System;                                // Часть 1
static class Program$ // Специальное имя, сгенерированное компилятором
{
    static void Main$ (string[] args) // Специальное имя,
                                      // сгенерированное компилятором
    {
        Console.WriteLine ("Hello, world"); // Часть 2
        void SomeMethod1() { ... }       // Часть 2
        Console.WriteLine ("Hello again!"); // Часть 2
        void SomeMethod2() { ... }       // Часть 2
    }
}
class SomeClass { ... }                      // Часть 3
namespace SomeNamespace { ... }               // Часть 3
```

Обратите внимание, что весь код из части 2 помещен внутрь метода Main\$. Это значит, что SomeMethod1 и SomeMethod2 действуют как *локальные методы*. В разделе “Локальные методы” главы 3 мы обсудим все последствия, самое важное из которых заключается в том, что локальные методы (если только они не объявлены статическими) могут получать доступ к переменным, объявленным внутри содержащего метода:

```
int x = 3;
LocalMethod();
void LocalMethod() { Console.WriteLine (x); } // Можно получать доступ к x
```

Еще одно последствие состоит в том, что к методам верхнего уровня нельзя обращаться из других классов или типов.

Операторы верхнего уровня могут дополнительно возвращать целочисленное значение вызывающему модулю и получать доступ к “магической” переменной типа string [] по имени args, которая соответствует аргументам командной строки, переданным вызывающим компонентом.

Так как программа может иметь только одну точку входа, в проекте C# допускается наличие не более одного файла с операторами верхнего уровня.

Типы и преобразования

В C# возможны преобразования между экземплярами совместимых типов. Преобразование всегда создает новое значение из существующего. Преобразования могут быть либо *неявными*, либо *явными*: неявные преобразования происходят автоматически, в то время как явные преобразования требуют *приведения*. В следующем примере мы *неявно* преобразуем тип `int` в `long` (который имеет в два раза больше битов, чем `int`) и *явно* приводим тип `int` к `short` (который имеет в половину меньше битов, чем `int`):

```
int x = 12345;           // int - 32-битное целое
long y = x;              // Неявное преобразование в 64-битное целое
short z = (short)x;      // Явное преобразование в 16-битное целое
```

Неявные преобразования разрешены, когда удовлетворяются перечисленные ниже условия:

- компилятор может гарантировать, что они всегда будут проходить успешно;
- в результате преобразования никакая информация не утрачивается¹.

И наоборот, явные преобразования требуются, когда справедливо одно из следующих утверждений:

- компилятор не может гарантировать, что они всегда будут проходить успешно;
- в результате преобразования информация может быть утрачена.

(Если компилятор способен определить, что преобразование будет терпеть неудачу *всегда*, то оба вида преобразования запрещаются. Преобразования, в которых участвуют обобщения, в определенных обстоятельствах также могут потерпеть неудачу; об этом пойдет речь в разделе “Параметры типа и преобразования” главы 3.)



Числовые преобразования, которые мы только что видели, встроены в язык. Вдобавок в C# поддерживаются *ссылочные преобразования* и *упаковывающие преобразования* (см. главу 3), а также *специальные преобразования* (см. раздел “Перегрузка операций” в главе 4). Компилятор не навязывает упомянутые выше правила для специальных преобразований, поэтому неудачно спроектированные типы могут вести себя по-другому.

Типы значений и ссылочные типы

Все типы C# делятся на следующие категории:

- типы значений;
- ссылочные типы;
- параметры обобщенных типов;
- типы указателей.

¹ Небольшое предостережение: очень высокие значения `long` после преобразования в `double` теряют в точности.



В этом разделе будут описаны типы значений и ссылочные типы. Параметры обобщенных типов будут рассматриваться в разделе “Обобщения” главы 3, а типы указателей — в разделе “Небезопасный код и указатели” главы 4.

Типы значений включают большинство встроенных типов (а именно — все числовые типы, тип `char` и тип `bool`), а также специальные типы `struct` и `enum`.

Ссылочные типы включают все классы, массивы, делегаты и интерфейсы. (Сюда также входит предопределенный тип `string`.)

Фундаментальное отличие между типами значений и ссылочными типами связано с тем, каким образом они хранятся в памяти.

Типы значений

Содержимым переменной или константы, относящейся к типу значения, является просто значение. Например, содержимое встроенного типа значения `int` — 32 бита данных.

С помощью ключевого слова `struct` можно определить специальный тип значения (рис. 2.1):

```
public struct Point { public int X; public int Y; }
```

или более лаконично:

```
public struct Point { public int X, Y; }
```

Структура Point

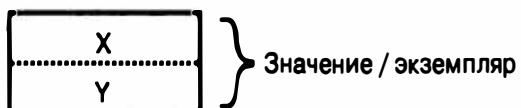


Рис. 2.1. Экземпляр типа значения в памяти

Присваивание экземпляра типа значения всегда приводит к **копированию** этого экземпляра, например:

```
Point p1 = new Point();
p1.X = 7;

Point p2 = p1;           // Присваивание приводит к копированию
Console.WriteLine (p1.X); // 7
Console.WriteLine (p2.X); // 7

p1.X = 9;               // Изменить p1.X
Console.WriteLine (p1.X); // 9
Console.WriteLine (p2.X); // 7
```

На рис. 2.2 видно, что экземпляры `p1` и `p2` хранятся независимо друг от друга.

Структура Point

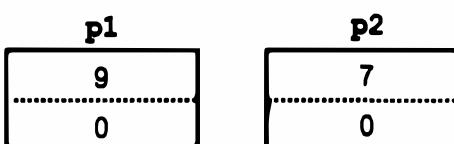


Рис. 2.2. Присваивание копирует экземпляр типа значения

Ссылочные типы

Ссылочный тип сложнее типа значения из-за наличия двух частей: *объекта* и *ссылки* на этот объект. Содержимым переменной или константы ссылочного типа является ссылка на объект, который содержит значение. Ниже приведен тип Point из предыдущего примера, переписанный в виде класса (рис. 2.3):

```
public class Point { public int X, Y; }
```

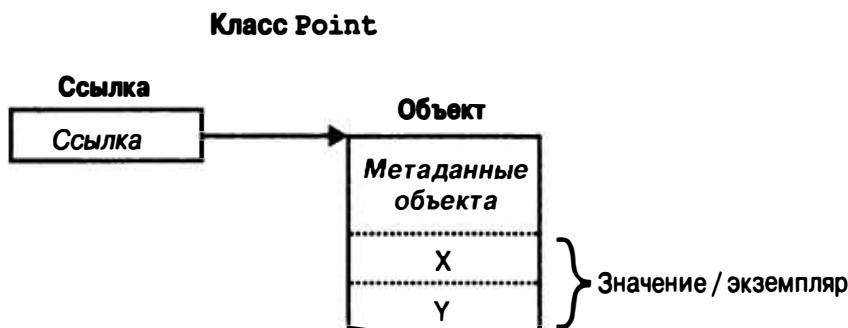


Рис. 2.3. Экземпляр ссылочного типа в памяти

Присваивание переменной ссылочного типа вызывает копирование ссылки, но не экземпляра объекта. В результате множество переменных могут ссылаться на один и тот же объект — то, что с типами значений обычно невозможно. Если повторить предыдущий пример при условии, что Point теперь является классом, тогда операция над p1 будет воздействовать на p2:

```
Point p1 = new Point();
p1.X = 7;

Point p2 = p1; // Копирует ссылку на p1
Console.WriteLine (p1.X); // 7
Console.WriteLine (p2.X); // 7

p1.X = 9; // Изменить p1.X
Console.WriteLine (p1.X); // 9
Console.WriteLine (p2.X); // 9
```

На рис. 2.4 видно, что p1 и p2 — две ссылки, указывающие на один и тот же объект.

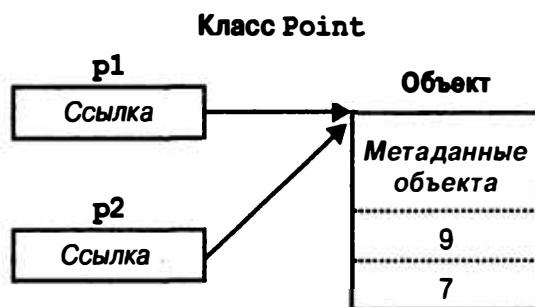


Рис. 2.4. Операция присваивания копирует ссылку

Значение null

Ссылке можно присваивать литерал `null`, который отражает тот факт, что ссылка не указывает на какой-либо объект:

```
Point p = null;
Console.WriteLine (p == null);    // True
// Следующая строка вызывает ошибку времени выполнения
// (генерируется исключение NullReferenceException):
Console.WriteLine (p.X);
class Point {...}
```



В разделе “Сылочные типы, допускающие `null`” главы 4 будет описано средство языка C#, которое помогает сократить количество случайных ошибок `NullReferenceException`.

Напротив, тип значения обычно не может иметь значение `null`:

```
Point p = null; // Ошибка на этапе компиляции
int x = null;   // Ошибка на этапе компиляции
struct Point {...}
```



В C# также имеется специальная конструкция под названием *типы значений, допускающие `null`*, которая предназначена для представления `null` в типах значений (см. раздел “Типы значений, допускающие `null`” в главе 4).

Накладные расходы, связанные с хранением

Экземпляры типов значений занимают в точности столько памяти, сколько необходимо для хранения их полей. В рассматриваемом примере `Point` требует 8 байтов памяти:

```
struct Point
{
    int x;        // 4 байта
    int y;        // 4 байта
}
```



Формально среда CLR располагает поля внутри типа по адресу, кратному размеру полей (выровненному максимум до 8 байтов). Таким образом, следующая структура в действительности потребляет 16 байтов памяти (с семью байтами после первого поля, которые “тратятся впустую”):

```
struct A { byte b; long l; }
```

Это поведение можно переопределить с помощью атрибута `StructLayout` (см. раздел “Отображение структуры на неуправляемую память” в главе 24).

Ссылочные типы требуют раздельного выделения памяти для ссылки и объекта. Объект потребляет столько памяти, сколько необходимо его полям, плюс дополнительный объем на административные нужды. Точный объем накладных расходов зависит от реализации исполняющей среды .NET, но составляет минимум 8 байтов, которые применяются для хранения ключа к типу объекта, а также временной информации, такой как его состояние блокировки при многопоточной обработке и флаг для указания, был ли объект закреплен, чтобы он не перемещался сборщиком мусора. Каждая ссылка на объект требует дополнительных 4 или 8 байтов в зависимости от того, на какой платформе функционирует исполняющая среда .NET — 32- или 64-разрядной.

Классификация предопределенных типов

Предопределенные типы в C# классифицируются следующим образом.

Типы значений

- Числовой
 - Целочисленный со знаком (`sbyte`, `short`, `int`, `long`)
 - Целочисленный без знака (`byte`, `ushort`, `uint`, `ulong`)
 - Вещественный (`float`, `double`, `decimal`)
- Булевский (`bool`)
- Символьный (`char`)

Ссылочные типы

- Строковый (`string`)
- Объектный (`object`)

Предопределенные типы C# являются псевдонимами типов .NET в пространстве имен `System`. Показанные ниже два оператора отличаются только синтаксисом:

```
int i = 5;  
System.Int32 i = 5;
```

Набор предопределенных типов *значений*, исключая `decimal`, известен в CLR как *примитивные типы*. Примитивные типы называются так оттого, что они поддерживаются непосредственно через инструкции в скомпилиированном коде, которые обычно транслируются в прямую поддержку внутри имеющегося процессора, например:

```
// Лежащие в основе шестнадцатеричные представления  
int i = 7;           // 0x7  
bool b = true;       // 0x1  
char c = 'A';         // 0x41  
float f = 0.5f;       // Использует кодирование чисел с плавающей точкой IEEE
```

Типы `System.IntPtr` и `System.UIntPtr` также относятся к примитивным (см. главу 24).

Числовые типы

Предопределенные числовые типы C# показаны в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Предопределенные числовые типы в C#

Тип C#	Тип в пространстве имен <code>System</code>	Суффикс	Размер в битах	Диапазон
Целочисленный со знаком				
sbyte	SByte		8	$-2^7 - 2^7 - 1$
short	Int16		16	$-2^{15} - 2^{15} - 1$
int	Int32		32	$-2^{31} - 2^{31} - 1$
long	Int64	L	64	$-2^{63} - 2^{63} - 1$
nint	IntPtr		32/64	
Целочисленный без знака				
byte	Byte		8	$0 - 2^8 - 1$
ushort	UInt16		16	$0 - 2^{16} - 1$
uint	UInt32	U	32	$0 - 2^{32} - 1$
ulong	UInt64	UL	64	$0 - 2^{64} - 1$
nuint	UIntPtr		32/64	
Вещественный				
float	Single	F	32	$\pm(\sim 10^{-45} - 10^{38})$
double	Double	D	64	$\pm(\sim 10^{-324} - 10^{308})$
decimal	Decimal	M	128	$\pm(\sim 10^{-28} - 10^{28})$

Из всех целочисленных типов `int` и `long` являются первоклассными типами, которым обеспечивается поддержка как в языке C#, так и в исполняющей среде. Другие целочисленные типы обычно применяются для реализации взаимодействия или когда главная задача связана с эффективностью хранения. Целочисленные типы с собственным размером `nint` и `nuint` наиболее полезны при работе с указателями, поэтому они будут описаны в разделе “Целочисленные типы с собственным размером” главы 4.

В рамках вещественных числовых типов `float` и `double` называются *типами с плавающей точкой*² и обычно используются в научных и графических вычислениях. Тип `decimal`, как правило, применяется в финансовых вычислениях, где требуется десятичная арифметика и высокая точность.

² Формально `decimal` — тоже тип с плавающей точкой, хотя в спецификации языка C# в таком качестве он не упоминается.



Платформа .NET дополняет этот список несколькими специализированными числовыми типами, включая `Int128` и `UInt128` для 128-битных целых чисел со знаком и без знака, `BigInteger` для произвольно больших целых чисел и `Half` для 16-битных чисел с плавающей точкой. Тип `Half` предназначен главным образом для взаимодействия с процессорами графических плат и не имеет собственной поддержки в большинстве центральных процессоров, что делает типы `float` и `double` лучшими вариантами для общего применения.

Числовые литералы

Целочисленные литералы могут использовать десятичную или шестнадцатеричную форму записи; шестнадцатеричная форма записи предусматривает применение префикса `0x`, например:

```
int x = 127;  
long y = 0x7F;
```

Вы можете вставлять символы подчеркивания в числовой литерал куда угодно, делая его более читабельным:

```
int million = 1_000_000;
```

Вы можете указывать числа в двоичном виде с помощью префикса `0b`:

```
var b = 0b1010_1011_1100_1101_1110_1111;
```

Вещественные литералы могут использовать десятичную и/или экспоненциальную форму записи:

```
double d = 1.5;  
double million = 1E06;
```

Выведение типа числового литерала

По умолчанию компилятор выводит тип числового литерала, относя его либо к `double`, либо к какому-то целочисленному типу.

Если литерал содержит десятичную точку или символ экспоненты (`E`), то он получает тип `double`.

В противном случае типом литерала будет первый тип, способный вместить значение литерала, из следующего списка: `int`, `uint`, `long` и `ulong`.

Например:

```
Console.WriteLine ( 1.0.GetType()); // Double (double)  
Console.WriteLine ( 1E06.GetType()); // Double (double)  
Console.WriteLine ( 1.GetType()); // Int32 (int)  
Console.WriteLine ( 0xF0000000.GetType()); // UInt32 (uint)  
Console.WriteLine (0x100000000.GetType()); // Int64 (long)
```

Числовые суффиксы

Числовые суффиксы явно определяют тип литерала. Суффиксы могут записываться либо строчными, либо прописными буквами; все они перечислены ниже.

Суффикс	Тип C#	Пример
F	float	float f = 1.0F;
D	double	double d = 1D;
M	decimal	decimal d = 1.0M;
U	uint	uint i = 1U;
L	long	long i = 1L;
UL	ulong	ulong i = 1UL;

Необходимость в суффиксах U и L возникает редко, поскольку типы uint, long и ulong почти всегда могут быть либо *выведены*, либо *неявно преобразованы* из int:

```
long i = 5; // Неявное преобразование без потерь литерала int в тип long
```

Суффикс D формально является избыточным из-за того, что все литералы с десятичной точкой выводятся в тип double. И к числовому литералу всегда можно добавить десятичную точку:

```
double x = 4.0;
```

Суффиксы F и M наиболее полезны и всегда должны применяться при указании литералов float или decimal. Без суффикса F следующая строка кода не скомпилируется, т.к. значение 4.5 выводится в тип double, для которого не существует неявного преобразования в тип float:

```
float f = 4.5F;
```

Тот же принцип справедлив для десятичных литералов:

```
decimal d = -1.23M; // Не скомпилируется без суффикса M
```

Семантика числовых преобразований подробно описана в следующем разделе.

Числовые преобразования

Преобразования между целочисленными типами

Преобразования между целочисленными типами являются *неявными*, когда целевой тип в состоянии представить каждое возможное значение исходного типа. В противном случае требуется *явное* преобразование, например:

```
int x = 12345;           // int - 32-битный целочисленный тип
long y = x;              // Неявное преобразование в 64-битный целочисленный тип
short z = (short)x;      // Явное преобразование в 16-битный целочисленный тип
```

Преобразования между типами с плавающей точкой

Тип float может быть неявно преобразован в double, т.к. double позволяет представить любое возможное значение float. Обратное преобразование должно быть явным.

Преобразования между типами с плавающей точкой и целочисленными типами

Все целочисленные типы могут быть неявно преобразованы во все типы с плавающей точкой:

```
int i = 1;  
float f = i;
```

Обратное преобразование обязано быть явным:

```
int i2 = (int)f;
```



Когда число с плавающей точкой приводится к целому, любая дробная часть отбрасывается; никакого округления не производится. Статический класс `System.Convert` предоставляет методы, которые выполняют преобразования между разнообразными числовыми типами с округлением (см. главу 6).

Неявное преобразование большого целочисленного типа в тип с плавающей точкой сохраняет *величину*, но иногда может приводить к потере *точности*. Причина в том, что типы с плавающей точкой всегда имеют большую величину, чем целочисленные типы, но могут иметь меньшую точность. Для демонстрации сказанного рассмотрим пример с более крупным числом:

```
int i1 = 100000001;  
float f = i1;           // Величина сохраняется, точность теряется  
int i2 = (int)f;       // 100000000
```

Десятичные преобразования

Все целочисленные типы могут быть неявно преобразованы в `decimal`, поскольку тип `decimal` в C# способен представлять любое возможное целочисленное значение. Все остальные числовые преобразования в тип `decimal` и из него должны быть явными, потому что они создают возможность выхода значения за пределы допустимого диапазона или потери точности.

Арифметические операции

Арифметические операции (+, -, *, /, %) определены для всех числовых типов кроме 8- и 16-битных целочисленных типов:

- + Сложение
- Вычитание
- * Умножение
- / Деление
- % Остаток от деления

Операции инкремента и декремента

Операции инкремента и декремента (++ и --) увеличивают и уменьшают значения переменных числовых типов на 1. Эти операции могут находиться до или после имени переменной в зависимости от того, когда требуется обновить значение переменной — до или после вычисления выражения; например:

```
int x = 0, y = 0;  
Console.WriteLine (x++); // Выводит 0; x теперь содержит 1  
Console.WriteLine (++y); // Выводит 1; y теперь содержит 1
```

Специальные операции с целочисленными типами

(К целочисленным типам относятся `int`, `uint`, `long`, `ulong`, `short`, `ushort`, `byte` и `sbyte`.)

Деление

Операции деления с целочисленными типами всегда отбрасывают остаток (округляют в направлении нуля). Деление на переменную, значение которой равно нулю, вызывает ошибку во время выполнения (исключение `DivideByZeroException`):

```
int a = 2 / 3; // 0  
int b = 0;  
int c = 5 / b; // Генерируется исключение DivideByZeroException
```

Деление на литерал или константу 0 генерирует ошибку на этапе компиляции.

Переполнение

Во время выполнения арифметические операции с целочисленными типами могут приводить к переполнению. По умолчанию это происходит молча — никакие исключения не генерируются, а результат демонстрирует поведение с циклическим возвратом, как если бы вычисление производилось над большим целочисленным типом с отбрасыванием дополнительных значащих битов. Например, декрементирование минимально возможного значения типа `int` дает в результате максимально возможное значение `int`:

```
int a = int.MinValue;  
a--;  
Console.WriteLine (a == int.MaxValue); // True
```

Операции проверки переполнения

Операция `checked` сообщает исполняющей среде о том, что вместо молчаливого переполнения она должна генерировать исключение `OverflowException`, когда выражение или оператор с целочисленным типом приводит к выходу за арифметические пределы этого типа. Операция `checked` воздействует на выражения с операциями `++, --, +, -` (бинарной и унарной), `*`, `/` и явными преобразованиями между целочисленными типами. Проверка переполнения сопряжена с небольшим снижением производительности.



Операция `checked` не оказывает никакого влияния на типы `double` и `float` (которые получают при переполнении специальные значения “бесконечности”, как вскоре будет показано) и на тип `decimal` (который проверяется всегда).

Операцию checked можно использовать либо с выражением, либо с блоком операторов:

```
int a = 1000000;
int b = 1000000;
int c = checked (a * b);      // Проверяет только это выражение
checked                         // Проверяет все выражения
{
    ...
    c = a * b;
    ...
}
```

Проверку на арифметическое переполнение можно сделать обязательной для всех выражений в программе, выбрав настройку checked на уровне проекта (в Visual Studio это делается на вкладке Advanced Build Settings (Дополнительные параметры сборки)). Если позже понадобится отключить проверку переполнения для конкретных выражений или операторов, тогда можно воспользоваться операцией unchecked. Например, следующий код не будет генерировать исключения, даже если выбрана настройка checked:

```
int x = int.MaxValue;
int y = unchecked (x + 1);
unchecked { int z = x + 1; }
```

Проверка переполнения для константных выражений

Независимо от настройки checked проекта для выражений, вычисляемых во время компиляции, проверка переполнения производится всегда, если только не применена операция unchecked:

```
int x = int.MaxValue + 1;          // Ошибка на этапе компиляции
int y = unchecked (int.MaxValue + 1); // Ошибки отсутствуют
```

Побитовые операции

В C# поддерживаются следующие побитовые операции.

Операция	Описание	Пример выражения	Результат
~	Дополнение	~0xfU	0xffffffff0U
&	И	0xf0 & 0x33	0x30
	ИЛИ	0xf0 0x33	0xf3
^	Исключающее ИЛИ	0xff00 ^ 0x0ff0	0xf0f0
<<	Сдвиг влево	0x20 << 2	0x80
>>	Сдвиг вправо	0x20 >> 1	0x10
>>>	Беззнаковый сдвиг вправо	int.MinValue >>> 1	0x40000000

Операция сдвига вправо (>>) копирует старший бит при работе с целыми числами со знаком, тогда как операция беззнакового сдвига вправо (>>>) этого не делает.



Дополнительные побитовые операции предоставляются через класс `BitOperations` из пространства имен `System.Numerics` (см. раздел “Класс `BitOperations`” в главе 6).

8- и 16-битные целочисленные типы

К 8- и 16-битным целочисленным типам относятся `byte`, `sbyte`, `short` и `ushort`. В указанных типах отсутствуют собственные арифметические операции, а потому компилятор C# при необходимости неявно преобразует их в более крупные типы. Попытка присваивания результата переменной меньшего целочисленного типа может привести к получению ошибки на этапе компиляции:

```
short x = 1, y = 1;  
short z = x + y; // Ошибка на этапе компиляции
```

В данном случае переменные `x` и `y` неявно преобразуются в тип `int`, поэтому сложение может быть выполнено. Это означает, что результат тоже будет иметь тип `int`, который не может быть неявно приведен к типу `short` (из-за возможной потери информации). Чтобы такой код скомпилировался, потребуется добавить явное приведение:

```
short z = (short) (x + y); // Компилируется
```

Специальные значения `float` и `double`

В отличие от целочисленных типов типы с плавающей точкой имеют значения, которые определенные операции трактуют особым образом. Такими специальными значениями являются `NaN` (Not a Number — не число), $+\infty$, $-\infty$ и -0 . В классах `float` и `double` предусмотрены константы для `NaN`, $+\infty$ и $-\infty$, а также для других значений (`.MaxValue`, `.MinValue` и `Epsilon`), например:

```
Console.WriteLine (double.NegativeInfinity); // Минус бесконечность
```

Ниже перечислены константы, которые представляют специальные значения для типов `double` и `float`.

Специальное значение	Константа <code>double</code>	Константа <code>float</code>
<code>NaN</code>	<code>double.NaN</code>	<code>float.NaN</code>
$+\infty$	<code>double.PositiveInfinity</code>	<code>float.PositiveInfinity</code>
$-\infty$	<code>double.NegativeInfinity</code>	<code>float.NegativeInfinity</code>
-0	<code>-0.0</code>	<code>-0.0f</code>

Деление ненулевого числа на ноль дает в результате бесконечную величину:

```
Console.WriteLine (1.0 / 0.0); // Бесконечность  
Console.WriteLine (-1.0 / 0.0); // Минус бесконечность  
Console.WriteLine (1.0 / -0.0); // Минус бесконечность  
Console.WriteLine (-1.0 / -0.0); // Бесконечность
```

Деление нуля на ноль или вычитание бесконечности из бесконечности дает в результате NaN:

```
Console.WriteLine ( 0.0 / 0.0 ); // NaN  
Console.WriteLine ((1.0 / 0.0) - (1.0 / 0.0)); // NaN
```

Когда применяется операция ==, значение NaN никогда не будет равно другому значению, даже еще одному NaN:

```
Console.WriteLine (0.0 / 0.0 == double.NaN); // False
```

Для проверки, является ли значение специальным значением NaN, должен использоваться метод float.IsNaN или double.IsNaN:

```
Console.WriteLine (double.IsNaN (0.0 / 0.0)); // True
```

Однако в случае применения метода object.Equals два значения NaN равны:

```
Console.WriteLine (object.Equals (0.0 / 0.0, double.NaN)); // True
```



Значения NaN иногда удобны для представления специальных величин. Например, в Windows Presentation Foundation (WPF) с помощью double.NaN представлено измерение, значением которого является "Automatic" (автоматическое). Другой способ представления такого значения предусматривает использование типа, допускающего значение null (см. главу 4), а еще один способ — применение специальной структуры, которая служит оболочкой для числового типа с дополнительным полем (см. главу 3).

Типы float и double следуют спецификации IEEE 754 для формата представления чисел с плавающей точкой, которая поддерживается практически всеми процессорами. Подробную информацию относительно поведения этих типов можно найти на веб-сайте <http://www.ieee.org>.

Выбор между double и decimal

Тип double удобен в научных вычислениях (таких как расчет пространственных координат), а тип decimal — в финансовых вычислениях и для представления значений, которые являются *искусственными*, а не полученными в результате реальных измерений. Ниже представлен обзор отличий между типами double и decimal.

Характеристика	double	decimal
Внутреннее представление	Двоичное	Десятичное
Десятичная точность	15–16 значащих цифр	28–29 значащих цифр
Диапазон	$\pm(\sim 10^{-324} \dots \sim 10^{308})$	$\pm(\sim 10^{-28} \dots \sim 10^{28})$
Специальные значения	+0, -0, +∞, -∞ и NaN	Отсутствуют
Скорость обработки	Присущая процессору	Не присущая процессору (примерно в 10 раз медленнее, чем в случае double)

Ошибки округления вещественных чисел

Типы `float` и `double` внутренне представляют числа в двоичной форме. По указанной причине точно представляются только числа, которые могут быть выражены в двоичной системе счисления. На практике это означает, что большинство литералов с дробной частью (которые являются десятичными) не будут представлены точно, например:

```
float x = 0.1f;                                // Не точно 0.1
Console.WriteLine (x + x + x + x + x + x + x + x + x); // 1.0000001
```

Именно потому типы `float` и `double` не подходят для финансовых вычислений. В противоположность им тип `decimal` работает в десятичной системе счисления, так что он способен точно представлять дробные числа вроде `0.1`, выражимые в десятичной системе (а также в системах счисления с основаниями-множителями `10` — двоичной и пятеричной). Поскольку вещественные литералы являются десятичными, тип `decimal` может точно представлять такие числа, как `0.1`. Тем не менее, ни `double`, ни `decimal` не могут точно представлять дробное число с периодическим десятичным представлением:

```
decimal m = 1M / 6M;                          // 0.166666666666666666666667M
double d = 1.0 / 6.0;                           // 0.1666666666666666
```

Это приводит к накапливающимся ошибкам округления:

```
decimal notQuiteWholeM = m+m+m+m+m+m;    // 1.00000000000000000000000000000002M
double notQuiteWholeD = d+d+d+d+d+d;        // 0.99999999999999989
```

которые нарушают работу операций эквивалентности и сравнения:

```
Console.WriteLine (notQuiteWholeM == 1M);    // False
Console.WriteLine (notQuiteWholeD < 1.0);     // True
```

Булевский тип и операции

Тип `bool` в C# (псевдоним типа `System.Boolean`) представляет логическое значение, которому может быть присвоен литерал `true` или `false`.

Хотя для хранения булевского значения достаточно только одного бита, исполняющая среда будет использовать один байт памяти, т.к. это минимальная порция, с которой исполняющая среда и процессор могут эффективно работать. Во избежание непродуктивных расходов пространства в случае массивов инфраструктура .NET предлагает в пространстве имен `System.Collections` класс `BitArray`, который позволяет задействовать по одному биту для каждого булевского значения в массиве.

Булевские преобразования

Приведения и преобразования из типа `bool` в числовые типы и наоборот не разрешены.

Операции сравнения и проверки равенства

Операции `==` и `!=` проверяют на предмет эквивалентности и неэквивалентности значения любого типа и всегда возвращают значение `bool`³. Типы значений обычно поддерживают очень простое понятие эквивалентности:

```
int x = 1;
int y = 2;
int z = 1;
Console.WriteLine (x == y);           // False
Console.WriteLine (x == z);           // True
```

Для ссылочных типов эквивалентность по умолчанию основана на ссылке, а не на действительном значении лежащего в основе объекта (более подробно об этом речь пойдет в главе 6):

```
Dude d1 = new Dude ("John");
Dude d2 = new Dude ("John");
Console.WriteLine (d1 == d2);          // False
Dude d3 = d1;
Console.WriteLine (d1 == d3);          // True
public class Dude
{
    public string Name;
    public Dude (string n) { Name = n; }
}
```

Операции эквивалентности и сравнения, `==`, `!=`, `<`, `>`, `>=` и `<=`, работают со всеми числовыми типами, но должны осмотрительно применяться с вещественными числами (как было указано выше в разделе “Ошибки округления вещественных чисел”). Операции сравнения также работают с членами типа `enum`, сравнивая лежащие в их основе целочисленные значения. Это будет описано в разделе “Перечисления” главы 3.

Операции эквивалентности и сравнения более подробно объясняются в разделе “Перегрузка операций” главы 4, а также в разделах “Сравнение эквивалентности” и “Сравнение порядка” главы 6.

Условные операции

Операции `&&` и `||` реализуют условия *И* и *ИЛИ*. Они часто применяются в сочетании с операцией `!`, которая выражает условие *НЕ*. В показанном ниже примере метод `UseUmbrella` (брать ли зонт) возвращает `true`, если дождливо (`rainy`) или солнечно (`sunny`) при условии, что также не ветрено (`windy`):

```
static bool UseUmbrella (bool rainy, bool sunny, bool windy)
{
    return !windy && (rainy || sunny);
}
```

Когда возможно, операции `&&` и `||` *сокращают вычисления*. Возвращаясь к предыдущему примеру, если ветрено (`windy`), тогда выражение (`rainy || sunny`)

³ Эти операции разрешено *перегружать* (см. главу 4), чтобы они возвращали тип, отличающийся от `bool`, но на практике так почти никогда не поступают.

даже не вычисляется. Сокращение вычислений играет важную роль в обеспечении выполнения выражений, таких как показанное ниже, без генерации исключения `NullReferenceException`:

```
if (sb != null && sb.Length > 0) ...
```

Операции `&` и `|` также реализуют условия *И* и *ИЛИ*:

```
return !windy & (rainy | sunny);
```

Их отличие состоит в том, что они *не сокращают вычисления*. По этой причине `&` и `|` редко используются в качестве операций сравнения.



В отличие от языков C и C++ операции `&` и `|` производят булевские сравнения (без сокращения вычислений), когда применяются к выражениям `bool`. Операции `&` и `|` выполняются как побитовые только в случае применения к числам.

Условная (тернарная) операция

Условная операция (чаще называемая *тернарной операцией*, т.к. она единственная принимает три операнда) имеет вид `q ? a : b`, где результатом является `a`, если условие `q` равно `true`, и `b` — в противном случае, например:

```
static int Max (int a, int b)
{
    return (a > b) ? a : b;
}
```

Условная операция особенно удобна в выражениях LINQ, рассматриваемых в главе 8.

Строки и символы

Тип `char` в C# (псевдоним типа `System.Char`) представляет символ Unicode и занимает 2 байта (UTF-16). Литерал `char` указывается в одинарных кавычках:

```
char c = 'A'; // Простой символ
```

Управляющие последовательности выражают символы, которые не могут быть представлены или интерпретированы буквально. Управляющая последовательность состоит из символа обратной косой черты, за которым следует символ со специальным смыслом; например:

```
char.newLine = '\n';
char.backSlash = '\\';
```

Символы управляющих последовательностей показаны в табл. 2.2.

Управляющая последовательность `\u` (или `\x`) позволяет указывать любой символ Unicode в виде его шестнадцатеричного кода, состоящего из четырех цифр:

```
char.copyrightSymbol = '\u00A9';
char.omegaSymbol     = '\u03A9';
char.newLine         = '\u000A';
```

Таблица 2.2. Символы управляющих последовательностей

Символ	Смысл	Значение
\'	Одинарная кавычка	0x0027
\"	Двойная кавычка	0x0022
\`	Обратная косая черта	0x005C
\0	Пусто	0x0000
\a	Сигнал внимания	0x0007
\b	Забой	0x0008
\f	Перевод страницы	0x000C
\n	Новая строка	0x000A
\r	Возврат каретки	0x000D
\t	Горизонтальная табуляция	0x0009
\v	Вертикальная табуляция	0x000B

Символьные преобразования

Неявное преобразование `char` в числовой тип работает для числовых типов, которые могут вместить значение `short` без знака. Для других числовых типов требуется явное преобразование.

Строковый тип

Тип `string` в C# (псевдоним типа `System.String`, подробно рассматриваемый в главе 6) представляет неизменяемую последовательность символов Unicode. Строковый литерал указывается в двойных кавычках:

```
string a = "Heat";
```



string — это ссылочный тип, а не тип значения. Тем не менее, его операции эквивалентности следуют семантике типов значений:

```
string a = "test";
string b = "test";
Console.WriteLine(a == b); // True
```

Управляющие последовательности, допустимые для литералов `char`, также работают внутри строк:

```
string a = "Here's a tab:\t";
```

Платой за это является необходимость дублирования символа обратной косой черты, когда он нужен буквально:

```
string a1 = "\\\server\\fileshare\\helloworld.cs";
```

Чтобы избежать такой проблемы, в C# разрешены дословные строковые литералы. Дословный строковый литерал снабжается префиксом @ и не поддержи-

вает управляющие последовательности. Следующая дословная строка идентична предыдущей строке:

```
string a2 = @"\\server\fileshare\helloworld.cs";
```

Дословный строковый литерал может также занимать несколько строк:

```
string escaped = "First Line\r\nSecond Line"; необрабатываем
string verbatim = @"First Line
Second Line";
//Выводит True, если в текстовом редакторе используются разделители строк CR-LF:
Console.WriteLine (escaped == verbatim);
```

Для включения в дословный строковый литерал символа двойной кавычки его понадобится записать дважды:

```
string xml = @"<customer id=""123""></customer>";
```

Необрабатываемые строковые литералы (C# 11)

В результате помещения строки в три и более символов кавычек (""""") создается *необрабатываемый строковый литерал*. Необрабатываемые строковые литералы могут содержать практически любую последовательность символов без служебных символов или удвоения:

```
string raw = """<file path="c:\temp\test.txt"></file>""";
```

Необрабатываемые строковые литералы упрощают представление литералов JSON, XML и HTML, а также регулярных выражений и исходного кода. Если необходимо поместить три или большее количество кавычек в саму строку, то можно заключить ее в четыре или более кавычек:

```
string raw = """The """ sequence denotes raw string literals.""""
```

На многострочные необрабатываемые строковые литералы распространяются особые правила. Строку "Line 1\r\nLine 2" можно представить следующим образом:

```
string multiLineRaw = """
Line 1
Line 2
""";
```

Обратите внимание, что открывающие и закрывающие кавычки должны находиться в отдельных строках содержимого строки. Кроме того:

- пробельные символы после *открывающей последовательности* """" (в той же самой строчке) игнорируются;
- пробельные символы, предшествующие *закрывающей последовательности* """" (в той же самой строчке), трактуются как *общий отступ* и удаляются из каждой строчки в строке; это позволяет включать отступ для удобства чтения исходного кода, причем отступ не становится частью строки.

Вот еще один пример, иллюстрирующий правила использования многострочных необрабатываемых строковых литералов:

```
if(true) Console.WriteLine ("""
{
    "Name" : "Joe"
}
""");
```

Ниже показан вывод:

```
{
    "Name" : "Joe"
}
```

Компилятор сообщит об ошибке, если каждая строчка многострочного необрабатываемого строкового литерала не предварена общим отступом, указанным в закрывающих кавычках.

Необрабатываемые строковые литералы можно интерполировать при соблюдении специальных правил, описанных в разделе “Интерполяция строк” далее в главе.

Конкатенация строк

Операция + выполняет конкатенацию двух строк:

```
string s = "a" + "b";
```

Один из операндов может быть нестроковым значением; в этом случае для него будет вызван метод ToString:

```
string s = "a" + 5; // a5
```

Многократное применение операции + для построения строки является неэффективным: более удачное решение предусматривает использование типа System.Text.StringBuilder (описанного в главе 6).

Интерполяция строк

Строка, предваренная символом \$, называется *интерполированной строкой*. Интерполированные строки могут содержать выражения, заключенные в фигурные скобки:

```
int x = 4;
Console.Write($"A square has {x} sides"); // Выводит: A square has 4 sides
```

Внутри скобок может быть указано любое допустимое выражение C# произвольного типа, и компилятор C# преобразует это выражение в строку, вызывая ToString или эквивалентный метод данного типа. Форматирование можно изменять путем добавления к выражению двоеточия и *форматной строки* (форматные строки описаны в разделе “Метод string.Format и смешанные форматные строки” главы 6):

```
string s = $"255 in hex is {byte.MaxValue:x2}";
          // x2 - шестнадцатеричное значение с двумя цифрами
          // s получает значение "255 in hex is FF"
```

Если вам необходимо применять двоеточие для другой цели (скажем, в тернарной условной операции, которая будет раскрыта позже), тогда все выражение потребуется поместить в круглые скобки:

```
bool b = true;
Console.WriteLine($"The answer in binary is {(b ? 1 : 0)}");
```

Начиная с версии C# 10, интерполированные строки могут быть константами при условии, что интерполированные значения являются константами:

```
const string greeting = "Hello";
const string message = $"{greeting}, world";
```

Начиная с версии C# 11, интерполированные строки можно разносить по нескольким строчкам (будь они стандартные или дословные):

```
string s = $"this interpolation spans {1 +
1} lines";
```

Необрабатываемые строковые литералы (начиная с версии C# 11) также могут быть интерполированными:

```
string s = $"""\nThe date and time is {DateTime.Now}""";
```

Чтобы включить фигурную скобку в интерполированную строку:

- при использовании стандартных и дословных строковых литералов повторите желаемый символ фигурной скобки;
- при использовании необрабатываемых строковых литералов измените последовательность интерполяции, повторив префикс \$.

```
Console.WriteLine ($$"""\nTimeStamp": "{DateTime.Now}" }""");
// Вывод: { "TimeStamp": "01/01/2024 12:13:25 PM" }
```

Это сохраняет возможность копирования и вставки текста в необрабатываемый строковый литерал без необходимости изменения строки.

Сравнение строк

Для сравнения эквивалентности строк можно использовать операцию == (или один из методов Equals типа string). Для сравнения порядка необходимо применять метод CompareTo строки; операции < и > не поддерживаются. Сравнение эквивалентности и порядка рассматривается в разделе “Сравнение строк” главы 6.

Строки UTF-8

Начиная с версии C# 11, можно использовать суффикс u8 для создания строковых литералов, закодированных в UTF-8, а не в UTF-16. Данное средство предназначено для сложных сценариев, таких как низкоуровневая обработка текста JSON для повышения производительности:

```
ReadOnlySpan<byte> utf8 = "ab→cd"u8; // Символ стрелки занимает 3 байта
Console.WriteLine (utf8.Length); // 7
```

Лежащим в основе типом является `ReadOnlySpan<byte>`, который будет рассматриваться в главе 23. Переменную `utf8` можно преобразовать в массив, вызвав метод `ToArray()`.

Массивы

Массив представляет фиксированное количество переменных (называемых элементами) определенного типа. Элементы массива всегда хранятся в непрерывном блоке памяти, обеспечивая высокоэффективный доступ.

Массив обозначается квадратными скобками после типа элементов:

```
char[] vowels = new char[5]; // Объявить массив из 5 символов
```

С помощью квадратных скобок также указывается индекс в массиве, что позволяет получать доступ к элементам по их позициям:

```
vowels[0] = 'a';
vowels[1] = 'e';
vowels[2] = 'i';
vowels[3] = 'o';
vowels[4] = 'u';
Console.WriteLine (vowels[1]); // e
```

Код приведет к выводу буквы “е”, поскольку массив индексируется, начиная с 0. Оператор цикла `for` можно использовать для прохода по всем элементам в массиве. Цикл `for` в следующем примере выполняется для целочисленных значений `i` от 0 до 4:

```
for (int i = 0; i < vowels.Length; i++)
    Console.Write (vowels[i]); // aeiou
```

Свойство `Length` массива возвращает количество элементов в массиве. После создания массива изменять его длину нельзя. Пространство имен `System.Collection` и вложенные в него пространства имен предоставляют такие высокоуровневые структуры данных, как массивы с динамически изменямыми размерами и словари.

Выражение инициализации массива позволяет объявлять и заполнять массив в единственном операторе:

```
char[] vowels = new char[] { 'a', 'e', 'i', 'o', 'u' };
```

или проще:

```
char[] vowels = { 'a', 'e', 'i', 'o', 'u' };
```



Начиная с версии C# 12, вместо фигурных скобок можно использовать квадратные:

```
char[] vowels = [ 'a', 'e', 'i', 'o', 'u' ];
```

Это называется *выражением коллекции*, и его преимущество заключается в том, что оно работает и при вызове методов:

```
Foo (['a', 'e', 'i', 'o', 'u']);
void Foo (char[] letters) { ... }
```

Выражения коллекций также допускаются для других типов коллекций, таких как списки и наборы (см. раздел “Инициализаторы и выражения коллекций” в главе 4).

Все массивы унаследованы от класса `System.Array`, который предоставляет общие службы для всех массивов. В состав его членов входят методы для получения и установки элементов независимо от типа массива; они описаны в разделе “Класс `Array`” главы 7.

Стандартная инициализация элементов

При создании массива всегда происходит инициализация его элементов стандартными значениями. Стандартное значение для типа представляет собой результат побитового обнуления памяти. Например, пусть создается массив целых чисел. Поскольку `int` — тип значения, выделяется пространство под 1000 целочисленных значений в непрерывном блоке памяти. Стандартным значением для каждого элемента будет 0:

```
int[] a = new int[1000];
Console.WriteLine(a[123]); // 0
```

Типы значений или ссылочные типы

Значительное влияние на производительность оказывает то, какой тип имеют элементы массива — тип значения или ссылочный тип. Если элементы относятся к типу значения, то пространство под значение каждого элемента выделяется как часть массива:

```
Point[] a = new Point[1000];
int x = a[500].X; // 0
public struct Point { public int X, Y; }
```

Если бы типом `Point` был класс, тогда создание массива привело бы просто к выделению пространства под 1000 ссылок `null`:

```
Point[] a = new Point[1000];
int x = a[500].X; // Ошибка во время выполнения,
// исключение NullReferenceException
public class Point { public int X, Y; }
```

Чтобы устранить ошибку, после создания экземпляра массива потребуется явно создать 1000 экземпляров `Point`:

```
Point[] a = new Point[1000];
for (int i = 0; i < a.Length; i++) // Цикл для i от 0 до 999
    a[i] = new Point(); // Установить i-ый элемент массива
    // в новый экземпляр Point
```

Независимо от типа элементов массив *сам по себе* всегда является объектом ссылочного типа. Например, следующий оператор допустим:

```
int[] a = null;
```

Индексы и диапазоны

Индексы и диапазоны (появившиеся в C# 8) упрощают работу с элементами или порциями массива.



Индексы и диапазоны работают также с CLR-типами `Span<T>` и `ReadOnlySpan<T>` (см. главу 23).

Вы можете заставить работать с индексами и диапазонами также и собственные типы, определив индексатор типа `Index` или `Range` (см. раздел “Индексаторы” в главе 3).

Индексы

Индексы позволяют ссылаться на элементы относительно конца массива с применением операции `^`. Скажем, `^1` ссылается на последний элемент, `^2` — на предпоследний элемент и т.д.:

```
char[] vowels = new char[] {'a', 'e', 'i', 'o', 'u'};
char lastElement = vowels [^1];           // 'u'
char secondToLast = vowels [^2];          // 'o'
```

(`^0` равно длине массива, так что `vowels[^0]` приведет к генерации ошибки.)

Индексы в C# реализованы с помощью типа `Index`, а потому вы можете поступать так:

```
Index first = 0;
Index last = ^1;
char firstElement = vowels [first];        // 'a'
char lastElement = vowels [last];           // 'u'
```

Диапазоны

Диапазоны позволяют “нарезать” массив посредством операции `..`:

```
char[] firstTwo = vowels [..2];           // 'a', 'e'
char[] lastThree = vowels [2..];           // 'i', 'o', 'u'
char[] middleOne = vowels [2..3];          // 'i'
```

Второе число в диапазоне является исключающим, поэтому `..2` возвращает элементы, находящиеся перед `vowels[2]`.

Вы также можете использовать символ `^` в диапазонах. Следующий диапазон возвращает последние два символа:

```
char[] lastTwo = vowels [^2..];           // 'o', 'u'
```

Диапазоны в C# реализуются с помощью типа `Range`, так что показанный ниже код допустим:

```
Range firstTwoRange = 0..2;
char[] firstTwo = vowels [firstTwoRange]; // 'a', 'e'
```

Многомерные массивы

Многомерные массивы бывают двух видов: *прямоугольные* и *зубчатые*. Прямоугольный массив представляет *n*-мерный блок памяти, а зубчатый массив является массивом, содержащим массивы.

Прямоугольные массивы

Прямоугольные массивы объявляются с применением запятых для отделения каждого измерения друг от друга. Ниже приведено объявление прямоугольного двумерного массива с размерностью 3×3 :

```
int[,] matrix = new int[3,3];
```

Метод `GetLength` массива возвращает длину для заданного измерения (начиная с 0):

```
for (int i = 0; i < matrix.GetLength(0); i++)
    for (int j = 0; j < matrix.GetLength(1); j++)
        matrix[i,j] = i * 3 + j;
```

Прямоугольный массив может быть инициализирован явными значениями. В следующем коде создается массив, идентичный массиву из предыдущего примера:

```
int[,] matrix = new int[,]
{
    {0,1,2},
    {3,4,5},
    {6,7,8}
};
```

Зубчатые массивы

Зубчатые массивы объявляются с использованием последовательно идущих пар квадратных скобок, которые представляют каждое измерение. Ниже показан пример объявления зубчатого двумерного массива с самым внешним измерением, составляющим 3:

```
int[][] matrix = new int[3][];
```



Обратите внимание на применение конструкции `new int[3][]`, а не `new int[] [3]`. Эрик Липперт написал великолепную статью с объяснениями, почему это так: <http://albahari.com/jagged>.

Внутренние измерения в объявлении не указываются, т.к. в отличие от прямоугольного массива каждый внутренний массив может иметь произвольную длину. Каждый внутренний массив неявно инициализируется значением `null`, а не пустым массивом. Каждый внутренний массив должен создаваться вручную:

```
for (int i = 0; i < matrix.Length; i++)
{
    matrix[i] = new int[3]; // Создать внутренний массив
    for (int j = 0; j < matrix[i].Length; j++)
        matrix[i][j] = i * 3 + j;
}
```

Зубчатый массив может быть инициализирован явными значениями. В следующем коде создается массив, который практически идентичен массиву из предыдущего примера, но имеет дополнительный элемент в конце:

```
int[][] matrix = new int[][][]
{
    new int[] {0,1,2},
    new int[] {3,4,5},
    new int[] {6,7,8,9}
};
```

Упрощенные выражения инициализации массивов

Существуют два способа сократить выражения инициализации массивов. Первый из них заключается в том, чтобы опустить операцию new и уточнители типов:

```
char[] vowels = {'a','e','i','o','u'};  
int[,] rectangularMatrix =  
{  
    {0,1,2},  
    {3,4,5},  
    {6,7,8}  
};  
int[][] jaggedMatrix =  
{  
    new int[] {0,1,2},  
    new int[] {3,4,5},  
    new int[] {6,7,8,9}  
};
```

(Начиная с версии C# 12, для одномерных массивов вместо фигурных скобок можно применять квадратные.)

Второй подход предусматривает использование ключевого слова var, которое сообщает компилятору о необходимости неявной типизации локальной переменной. Ниже приведены простые примеры:

```
var i = 3;                      // i неявно получает тип int  
var s = "sausage";              // s неявно получает тип string
```

Тот же самый принцип применим к массивам, причем его можно продвинуть на шаг дальше: опустить уточнитель типа после ключевого слова new и позволить компилятору самостоятельно вывести тип массива:

```
var vowels = new[] {'a','e','i','o','u'}; // Компилятор выведет тип char[]
```

Вот как его применять к многомерным массивам:

```
var rectMatrix = new [,]        // rectMatrix неявно получает тип int[,]  
{  
    {0,1,2},  
    {3,4,5},  
    {6,7,8}  
};  
var jaggedMat = new int[][]     // jaggedMat неявно получает тип int[][]  
{  
    new [] {0,1,2},  
    new [] {3,4,5},  
    new [] {6,7,8,9}  
};
```

Чтобы такой прием работал, элементы должны быть неявно преобразуемыми в единственный тип (и хотя бы один элемент должен относиться к этому типу плюс должен существовать в точности один наилучший тип), как в следующем примере:

```
var x = new[] {1,10000000000};    // Все элементы преобразуемы в тип long
```

Проверка границ

Во время выполнения все обращения к индексам массивов проверяются на предмет выхода за допустимые границы. В случае указания недопустимого значения индекса генерируется исключение `IndexOutOfRangeException`:

```
int[] arr = new int[3];
arr[3] = 1; // Генерируется исключение IndexOutOfRangeException
```

Проверка границ в массивах необходима для обеспечения безопасности типов и упрощения отладки.



Обычно влияние на производительность проверки границ оказывается незначительным, и компилятор JIT способен проводить оптимизацию, такую как выяснение перед входом в цикл, будут ли все индексы безопасными, устранивая тем самым потребность в проверке на каждой итерации. Вдобавок в языке C# поддерживается “небезопасный” код, где можно явно пропускать проверку границ (см. раздел “Небезопасный код и указатели” в главе 4).

Переменные и параметры

Переменная представляет ячейку в памяти, которая содержит изменяемое значение. Переменная может быть локальной переменной, параметром (*передаваемым по значению, ref, out либо in*), полем (экземпляра либо статическим) или элементом массива.

Стек и куча

Стек и куча являются местами для хранения переменных. Стек и куча имеют существенно отличающуюся семантику времени жизни.

Стек

Стек представляет собой блок памяти для хранения локальных переменных и параметров. Стек логически расширяется и сужается при входе и выходе в метод или функцию. Взгляните на следующий метод (чтобы не отвлекать внимание, проверка входного аргумента не делается):

```
static int Factorial (int x)
{
    if (x == 0) return 1;
    return x * Factorial (x-1);
}
```

Метод `Factorial` является рекурсивным, т.е. вызывает сам себя. Каждый раз, когда происходит вход в метод, в стеке размещается экземпляр `int`, и каждый раз, когда метод завершается, экземпляр `int` освобождается.

Куча

Куча представляет собой блок памяти, где располагаются *объекты* (т.е. экземпляры ссылочного типа). Всякий раз, когда создается новый объект, он размещается в куче с возвращением ссылки на созданный объект. Во время выполнения программы куча начинает заполняться по мере создания новых объектов. В исполняющей среде предусмотрен сборщик мусора, который периодически освобождает объекты из кучи, поэтому программа не сталкивается с ситуацией нехватки памяти. Объект становится пригодным для освобождения, если на него не ссылается что-то, что само существует.

В приведенном ниже примере мы начинаем с создания объекта `StringBuilder`, на который ссылается переменная `ref1`, и выводим на экран его содержимое. Затем этот объект `StringBuilder` может быть немедленно обработан сборщиком мусора, т.к. впоследствии он нигде не задействован.

Далее мы создаем еще один объект `StringBuilder`, на который ссылается переменная `ref2`, и копируем ссылку в `ref3`. Хотя `ref2` в дальнейшем не применяется, переменная `ref3` поддерживает существование объекта `StringBuilder`, гарантируя тем самым, что он не будет подвергаться сборке мусора до тех пор, пока не мы закончим работу с `ref3`:

```
using System;
using System.Text;

StringBuilder ref1 = new StringBuilder ("object1");
Console.WriteLine (ref1);
//Объект StringBuilder, на который ссылается ref1, теперь пригоден для сборки мусора

StringBuilder ref2 = new StringBuilder ("object2");
StringBuilder ref3 = ref2;
// Объект StringBuilder, на который ссылается ref2, пока еще НЕ пригоден
// для сборки мусора.

Console.WriteLine (ref3); // object2
```

Экземпляры типов значений (и ссылки на объекты) хранятся там, где были объявлены соответствующие переменные. Если экземпляр был объявлен как поле внутри типа класса или как элемент массива, то такой экземпляр попадает в кучу.



В языке C# нельзя явно удалять объекты, как разрешено делать в C++. Объект без ссылок со временем будет уничтожен сборщиком мусора.

В куче также хранятся статические поля. В отличие от объектов, размещенных в куче (которые могут быть обработаны сборщиком мусора), они существуют до тех пор, пока не завершится процесс.

Определенное присваивание

В C# принудительно применяется политика определенного присваивания. На практике это означает, что за пределами контекста `unsafe` или контекста взаимодействия случайно получить доступ к неинициализированной памяти невозможно.

Определенное присваивание приводит к трем последствиям.

- Локальным переменным должны быть присвоены значения, прежде чем их можно будет читать.
- При вызове метода должны быть предоставлены аргументы функции (если только они не помечены как необязательные; см. раздел “Необязательные параметры” далее в главе).
- Все остальные переменные (такие как поля и элементы массивов) автоматически инициализируются исполняющей средой.

Например, следующий код приводит к ошибке на этапе компиляции:

```
int x;  
Console.WriteLine (x); // Ошибка на этапе компиляции
```

Поля и элементы массива автоматически инициализируются стандартными значениями для своих типов. Показанный ниже код выводит на экран 0, потому что элементам массива неявно присвоены их стандартные значения:

```
int[] ints = new int[2];  
Console.WriteLine (ints[0]); // 0
```

Следующий код выводит 0, т.к. полям (статическим или экземпляра) неявно присваиваются стандартные значения:

```
Console.WriteLine (Test.X); // 0  
class Test { public static int X; } // Поле
```

Стандартные значения

Экземпляры всех типов имеют стандартные значения. Стандартные значения для предопределенных типов являются результатом побитового обнуления памяти.

Тип	Стандартное значение
Ссылочные типы (и типы значений, допускающие null)	null
Числовые и перечислимые типы	0
Тип char	'\0'
Тип bool	false

Получить стандартное значение для любого типа можно с помощью ключевого слова default:

```
Console.WriteLine (default (decimal)); // 0
```

Кроме того, когда тип может быть выведен, можно его не указывать:

```
decimal d = default;
```

Стандартное значение в специальном типе значения (т.е. struct) — это то же самое, что и стандартные значения для всех полей, определенных в специальном типе.

Параметры

Метод может иметь последовательность параметров. Параметры определяют набор аргументов, которые должны быть предоставлены данному методу. В следующем примере метод Foo имеет единственный параметр по имени р типа int:

```
Foo (8); // 8 - аргумент  
static void Foo (int p) {...} // p - параметр
```

Управлять способом передачи параметров можно посредством модификаторов ref, in и out.

Модификатор параметра	Способ передачи	Когда переменная должна быть определено присвоена
Отсутствует	По значению	При входе
ref	По ссылке	При входе
in	По ссылке (только для чтения)	При входе
out	По ссылке	При выходе

Передача аргументов по значению

По умолчанию аргументы в C# передаются по значению, что общепризнанно является самым распространенным случаем. Другими словами, при передаче значения методу создается его копия:

```
int x = 8;  
Foo (x); // Создается копия x  
Console.WriteLine (x); // x по-прежнему будет иметь значение 8  
static void Foo (int p)  
{  
    p = p + 1; // Увеличить p на 1  
    Console.WriteLine (p); // Вывести значение p на экран  
}
```

Присваивание p нового значения не изменяет содержимое x, поскольку p и x находятся в разных ячейках памяти.

Передача по значению аргумента ссылочного типа приводит к копированию ссылки, но не объекта. В следующем примере метод Foo видит тот же самый объект StringBuilder, который был создан (sb), но имеет независимую ссылку на него. Другими словами, sb и fooSB являются отдельными друг от друга переменными, которые ссылаются на один и тот же объект StringBuilder:

```
StringBuilder sb = new StringBuilder();  
Foo (sb);  
Console.WriteLine (sb.ToString()); // test  
static void Foo (StringBuilder fooSB)  
{  
    fooSB.Append ("test");  
    fooSB = null;  
}
```

Из-за того, что `fooSB` — копия ссылки, установка ее в `null` не приводит к установке в `null` переменной `sb`. (Тем не менее, если параметр `fooSB` объявить и вызвать с модификатором `ref`, то `sb` станет равным `null`.)

Модификатор `ref`

Для *передачи по ссылке* в C# предусмотрен модификатор параметра `ref`. В приведенном далее примере `p` и `x` ссылаются на одну и ту же ячейку памяти:

```
int x = 8;
Foo (ref x);                                // Позволить Foo работать напрямую с x
Console.WriteLine (x);                      // x теперь имеет значение 9

static void Foo (ref int p)
{
    p = p + 1;                            // Увеличить p на 1
    Console.WriteLine (p);                // Вывести значение p на экран
}
```

Теперь присваивание `p` нового значения изменяет содержимое `x`. Обратите внимание, что модификатор `ref` должен быть указан как при определении, так и при вызове метода⁴. Такое требование делает очень ясным то, что происходит.

Модификатор `ref` критически важен при реализации метода обмена (в разделе “Обобщения” главы 3 будет показано, как реализовать метод обмена, работающий с любым типом):

```
string x = "Penn";
string y = "Teller";
Swap (ref x, ref y);
Console.WriteLine (x);                    // Teller
Console.WriteLine (y);                    // Penn

static void Swap (ref string a, ref string b)
{
    string temp = a;
    a = b;
    b = temp;
}
```



Параметр может быть передан по ссылке или по значению независимо от того, относится он к ссылочному типу или к типу значения.

Модификатор `out`

Аргумент `out` похож на аргумент `ref` за исключением следующих аспектов:

- он не нуждается в присваивании значения перед входом в функцию;
- ему должно быть присвоено значение перед выходом из функции.

⁴ Исключением из этого правила является вызов методов СОМ. Мы обсудим данную тему в главе 25.

Модификатор `out` чаще всего применяется для получения из метода нескольких возвращаемых значений, например:

```
string a, b;
Split ("Stevie Ray Vaughn", out a, out b);
Console.WriteLine (a);                                     // Stevie Ray
Console.WriteLine (b);                                     // Vaughn

void Split (string name, out string firstNames, out string lastName)
{
    int i = name.LastIndexOf (' ');
    firstNames = name.Substring (0, i);
    lastName = name.Substring (i + 1);
}
```

Подобно параметру `ref` параметр `out` передается по ссылке.

Переменные `out` и отбрасывание

Переменные можно объявлять на лету при вызове методов с параметрами `out`. Вот как можно заменить первые две строки из предыдущего примера:

```
Split ("Stevie Ray Vaughan", out string a, out string b);
```

Иногда при вызове методов с многочисленными параметрами `out` вы не заинтересованы в получении значений из всех параметров. В таких ситуациях можно с помощью символа подчеркивания “отбросить” те параметры, которые не представляют для вас интерес:

```
Split ("Stevie Ray Vaughan", out string a, out _);      // Отбросить второй
                                                               // параметр out
Console.WriteLine (a);
```

В данном случае компилятор трактует символ подчеркивания как специальный символ, называемый *отбрасыванием*. В одиночный вызов допускается включать множество символов отбрасывания. Предполагая, что метод `SomeBigMethod` был определен с семью параметрами `out`, вот как проигнорировать все кроме четвертого:

```
SomeBigMethod (out _, out _, out _, out int x, out _, out _, out _);
```

В целях обратной совместимости данное языковое средство не вступит в силу, если в области видимости находится реальная переменная с именем в виде символа подчеркивания:

```
string _;
Split ("Stevie Ray Vaughan", out string a, out _);
Console.WriteLine (_);                                    // Vaughan
```

Последствия передачи по ссылке

Когда вы передаете аргумент по ссылке, то устанавливаете псевдоним для ячейки памяти, в которой находится существующая переменная, а не создаете новую ячейку. В следующем примере переменные `x` и `y` представляют один и тот же экземпляр:

```

class Test
{
    static int x;

    static void Main() { Foo (out x); }

    static void Foo (out int y)
    {
        Console.WriteLine (x);      // x имеет значение 0
        y = 1;                    // Изменить значение y
        Console.WriteLine (x);      // x имеет значение 1
    }
}

```

Модификатор `in`

Параметр `in` похож на параметр `ref` за исключением того, что значение аргумента не может быть модифицировано в методе (его изменение приведет к генерации ошибки на этапе компиляции). Модификатор `in` наиболее полезен при передаче методу крупного типа значения, потому что он позволяет компилятору избежать накладных расходов, связанных с копированием аргумента перед его передачей, сохраняя при этом защиту первоначального значения от модификации.

Перегрузка допускается только при наличии модификатора `in`:

```

void Foo ( SomeBigStruct a) { ... }
void Foo (in SomeBigStruct a) { ... }

```

Для вызова второй перегруженной версии в вызывающем коде должен присутствовать модификатор `in`:

```

SomeBigStruct x = ...;
Foo (x);           // Вызывается первая перегруженная версия
Foo (in x);        // Вызывается вторая перегруженная версия

```

Когда неоднозначность отсутствует:

```
void Bar (in SomeBigStruct a) { ... }
```

то указывать модификатор `in` в вызывающем коде необязательно:

```

Bar (x);           // Нормально (вызывается перегруженная версия с in)
Bar (in x);        // Нормально (вызывается перегруженная версия с in)

```

Чтобы сделать приведенный пример содержательным, `SomeBigStruct` следовало бы определить как структуру (см. раздел “Структуры” в главе 3).

Модификатор `params`

Модификатор `params`, примененный к последнему параметру метода, позволяет методу принимать любое количество аргументов определенного типа. Тип параметра должен быть объявлен как (одномерный) массив, например:

```

int total = Sum (1, 2, 3, 4);
Console.WriteLine (total); // 10

// Вызов Sum выше в коде эквивалентен:
int total2 = Sum (new int[] { 1, 2, 3, 4 });

```

```
int Sum (params int[] ints)
{
    int sum = 0;
    for (int i = 0; i < ints.Length; i++)
        sum += ints[i]; // Увеличить sum на ints[i]
    return sum;
}
```

Если в позиции `params` аргументы отсутствуют, тогда создается массив нулевой длины.

Аргумент `params` можно также предоставить как обычный массив. Первая строка кода в `Main` семантически эквивалентна следующей строке:

```
int total = Sum (new int[] { 1, 2, 3, 4 });
```

Необязательные параметры

В методах, конструкторах и индексаторах (глава 3) можно объявлять *необязательные параметры*. Параметр является необязательным, если в его объявлении указано *стандартное значение*:

```
void Foo (int x = 23) { Console.WriteLine (x); }
```

При вызове метода необязательные параметры могут быть опущены:

```
Foo(); // 23
```

Необязательному параметру `x` в действительности *передается стандартный аргумент* со значением 23 — компилятор встраивает это значение в скомпилированный код на *вызывающей* стороне. Показанный выше вызов `Foo` семантически эквивалентен следующему вызову:

```
Foo (23);
```

поскольку компилятор просто подставляет стандартное значение необязательного параметра там, где он используется.



Добавление необязательного параметра к открытому методу, который вызывается из другой сборки, требует перекомпиляции обеих сборок — как и в случае, если бы параметр был обязательным.

Стандартное значение необязательного параметра должно быть указано в виде константного выражения, вызова конструктора без параметров для типа значения или стандартного выражения. Необязательные параметры не могут быть помечены как `ref` или `out`.

Обязательные параметры должны находиться *перед* необязательными параметрами в объявлении метода и его вызове (исключением являются аргументы `params`, которые всегда располагаются в конце). В следующем примере параметру `x` передается явное значение 1, а параметру `y` — стандартное значение 0:

```
Foo (1); // 1, 0
void Foo (int x = 0, int y = 0) { Console.WriteLine (x + ", " + y); }
```

Чтобы сделать обратное (передать стандартное значение для `x` и явное значение для `y`), потребуется скомбинировать необязательные параметры с *именованными аргументами*.

Именованные аргументы

Вместо распознавания аргумента по позиции его можно идентифицировать по имени:

```
Foo (x:1, y:2); // 1, 2  
void Foo (int x, int y) { Console.WriteLine (x + ", " + y); }
```

Именованные аргументы могут указываться в любом порядке. Следующие вызовы Foo семантически идентичны:

```
Foo (x:1, y:2);  
Foo (y:2, x:1);
```



Тонкое отличие состоит в том, что выражения в аргументах вычисляются согласно порядку, в котором они появляются на *вызывающей* стороне. В общем случае это актуально только для взаимозависимых выражений с побочными эффектами, как в следующем коде, который выводит на экран 0, 1:

```
int a = 0;  
Foo (y: ++a, x: --a); // Выражение ++a вычисляется первым
```

Разумеется, на практике вы определенно должны избегать подобного стиля кодирования!

Именованные и позиционные аргументы можно смешивать:

```
Foo (1, y:2);
```

Однако существует одно ограничение: позиционные аргументы должны находиться перед именованными аргументами, если только они не используются в корректных позициях. Таким образом, мы могли бы вызвать Foo следующим образом:

Foo (x:1, 2); // Нормально. Аргументы находятся в объявленных позициях
но не так, как показано ниже:

```
Foo (y:2, 1); // Ошибка на этапе компиляции. y находится не в первой позиции
```

Именованные аргументы особенно удобны в сочетании с необязательными параметрами. Например, взгляните на следующий метод:

```
void Bar (int a = 0, int b = 0, int c = 0, int d = 0) { ... }
```

Его можно вызвать, предоставив только значение для d:

```
Bar (d:3);
```

Как будет подробно обсуждаться в главе 24, это очень удобно при работе с API-интерфейсами COM.

Локальные ссылочные переменные

В версии C# 7 появилось довольно-таки экзотическое средство, позволяющее определять локальную переменную, которая ссылается на элемент в массиве или на поле в объекте:

```
int[] numbers = { 0, 1, 2, 3, 4 };  
ref int numRef = ref numbers [2];
```

В приведенном примере numRef является ссылкой на numbers[2]. Модификация numRef приводит к модификации элемента массива:

```
numRef *= 10;  
Console.WriteLine (numRef);           // 20  
Console.WriteLine (numbers [2]);      // 20
```

В качестве цели ссылочной локальной переменной должен указываться элемент массива, поле или обычная локальная переменная; целью не может быть *свойство* (глава 3). Локальные ссылочные переменные предназначены для специализированных сценариев микрооптимизации и обычно применяются в сочетании с возвращаемыми ссылочными значениями.

Возвращаемые ссылочные значения



Типы Span<T> и ReadOnlySpan<T>, которые будут описаны в главе 23, используют возвращаемые ссылочные значения для реализации высокоеффективного индексатора. Помимо сценариев подобного рода возвращаемые ссылочные значения обычно не применяются; вы можете считать их средством микрооптимизации.

Ссылочную локальную переменную можно возвращать из метода. Результат называется возвращаемым ссылочным значением:

```
class Program  
{  
    static string x = "Old Value";  
    static ref string GetX() => ref x;    // Этот метод возвращает  
                                         // ссылочное значение  
    static void Main()  
    {  
        ref string xRef = ref GetX();        // Присвоить результат ссылочной  
                                         // локальной переменной  
        xRef = "New Value";  
        Console.WriteLine (x);              // Выводит New Value  
    }  
}
```

Если вы опустите модификатор ref на вызывающей стороне, тогда будет возвращаться обычное значение:

```
string localX = GetX();                // Допустимо: localX - обыкновенная,  
                                         // не ссылочная переменная
```

Вы можете использовать возвращаемые ссылочные значения при определении свойства или индексатора:

```
static ref string Prop => ref x;
```

Такое свойство неявно допускает запись, несмотря на отсутствие средства доступа set:

```
Prop = "New Value";
```

Воспрепятствовать модификации можно за счет применения `ref readonly`:

```
static ref readonly string Prop => ref x;
```

Модификатор `ref readonly` предотвращает модификацию, одновременно обеспечивая выигрыш в производительности при возврате по ссылке. В данном случае выигрыш будет небольшим, потому что `x` имеет тип `string` (ссылочный тип): независимо от длины строки единственной неэффективностью, которой мы можем избежать, является копирование одиночной 32- или 64-битной ссылки. Реальный выигрыш может быть получен со специальными типами значений (см. раздел “Структуры” в главе 3), но только если структура помечена как `readonly` (иначе компилятор будет выполнять защитное копирование).

Определять явное средство доступа `set` для свойства или индексатора с возвращаемым ссылочным значением не разрешено.

Объявление неявно типизированных локальных переменных с помощью `var`

Часто случается так, что переменная объявляется и инициализируется за один шаг. Если компилятор способен вывести тип из инициализирующего выражения, то на месте объявления типа можно использовать ключевое слово `var`, например:

```
var x = "hello";
var y = new System.Text.StringBuilder();
var z = (float)Math.PI;
```

Приведенный код в точности эквивалентен следующему коду:

```
string x = "hello";
System.Text.StringBuilder y = new System.Text.StringBuilder();
float z = (float)Math.PI;
```

Из-за такой прямой эквивалентности неявно типизированные переменные являются статически типизированными. Скажем, показанный ниже код вызовет ошибку на этапе компиляции:

```
var x = 5;
x = "hello"; // Ошибка на этапе компиляции; x относится к типу int
```



Применение `var` может ухудшить читабельность кода в случае, если вы не можете вывести тип, просто взглянув на объявление переменной. Ниже приведен пример:

```
Random r = new Random();
var x = r.Next();
```

Какой тип имеет переменная `x`?

В разделе “Анонимные типы” главы 4 мы опишем сценарий, в котором использование ключевого слова `var` обязательно.

Выражения `new` целевого типа

Начиная с C# 9, еще один способ сокращения лексического повторения предлагаю выражения `new` целевого типа:

```
System.Text.StringBuilder sb1 = new();
System.Text.StringBuilder sb2 = new ("Test");
```

Код в точности эквивалентен следующему коду:

```
System.Text.StringBuilder sb1 = new System.Text.StringBuilder();
System.Text.StringBuilder sb2 = new System.Text.StringBuilder ("Test");
```

Принцип заключается в том, что вы можете обращаться к `new`, не указывая имя типа, если компьютер способен однозначно вывести его. Выражения `new` целевого типа особенно удобны, когда объявление и инициализация переменных находятся в разных частях кода. Распространенным примером может служить инициализация поля в конструкторе:

```
class Foo
{
    System.Text.StringBuilder sb;
    public Foo (string initialValue)
    {
        sb = new (initialValue);
    }
}
```

Выражения `new` целевого типа также удобны в следующем сценарии:

```
MyMethod (new ("test"));
void MyMethod (System.Text.StringBuilder sb) { ... }
```

Выражения и операции

Выражение по существу обозначает значение. Простейшими видами выражений являются константы и переменные. Выражения могут видоизменяться и комбинироваться с применением операций. *Операция* принимает один или большее количество входных *операндов*, формируя новое выражение.

Вот пример *константного выражения*:

12

Посредством операции `*` можно скомбинировать два операнда (литеральные выражения 12 и 30):

12 * 30

Мы можем строить сложные выражения, потому что операнд сам по себе может быть выражением, как операнд `(12 * 30)` в следующем примере:

1 + (12 * 30)

Операции в C# могут быть классифицированы как *унарные*, *бинарные* или *тернарные* в зависимости от количества operandов, с которыми они работают (один, два или три). Бинарные операции всегда используют *инфиксную* форму, когда операция помещается между двумя operandами.

Первичные выражения

Первичные выражения включают выражения, сформированные из операций, которые являются неотъемлемой частью самого языка. Ниже показан пример:

```
Math.Log (1)
```

Выражение здесь состоит из двух первичных выражений. Первое выражение осуществляет поиск члена (посредством операции .), а второе — вызов метода (с помощью операции ()).

Пустые выражения

Пустое выражение — это выражение, которое не имеет значения; например:

```
Console.WriteLine (1)
```

Поскольку пустое выражение не имеет значения, его нельзя применять в качестве операнда при построении более сложных выражений:

```
1 + Console.WriteLine (1) // Ошибка на этапе компиляции
```

Выражения присваивания

Выражение присваивания использует операцию = для присваивания переменной результата вычисления другого выражения, например:

```
x = x * 5
```

Выражение присваивания — это не пустое выражение. Оно заключает в себе значение, которое было присвоено, и потому может встраиваться в другое выражение. В следующем примере выражение присваивает значение 2 переменной x и 10 переменной y:

```
y = 5 * (x = 2)
```

Такой стиль выражения может применяться для инициализации нескольких значений:

```
a = b = c = d = 0
```

Составные операции присваивания являются синтаксическим сокращением, которое комбинирует присваивание с другой операцией:

<pre>x *= 2</pre>	// Эквивалентно x = x * 2
<pre>x <= 1</pre>	// Эквивалентно x = x << 1

(Тонкое исключение из указанного правила касается *событий*, которые рассматриваются в главе 4: операции += и -= в них трактуются особым образом и отображаются на средства доступа add и remove события.)

Приоритеты и ассоциативность операций

Когда выражение содержит несколько операций, порядок их вычисления определяется *приоритетами* и *ассоциативностью*. Операции с более высоким приоритетом выполняются перед операциями, приоритет которых ниже. Если операции имеют одинаковый приоритет, то порядок их выполнения определяется ассоциативностью.

Приоритеты операций

Приведенное ниже выражение:

`1 + 2 * 3`

вычисляется следующим образом, т.к. операция `*` имеет больший приоритет, чем `+`:

`1 + (2 * 3)`

Левоассоциативные операции

Бинарные операции (кроме операции присваивания, лямбда-операции и операции объединения с `null`) являются *левоассоциативными*; другими словами, они вычисляются слева направо. Например, выражение:

`8 / 4 / 2`

вычисляется так:

`(8 / 4) / 2 // 1`

Чтобы изменить фактический порядок вычисления, можно расставить скобки:

`8 / (4 / 2) // 4`

Правоассоциативные операции

Операции присваивания, лямбда-операция, операция объединения с `null` и условная операция являются *правоассоциативными*; другими словами, они вычисляются справа налево.

Правая ассоциативность делает возможной успешную компиляцию множественного присваивания вроде показанного ниже:

`x = y = 3;`

Здесь значение 3 сначала присваивается переменной `y`, после чего результат этого выражения (3) присваивается переменной `x`.

Таблица операций

В табл. 2.3 перечислены операции C# в порядке их приоритетов. Операции в одной и той же категории имеют одинаковые приоритеты. Операции, которые могут быть перегружены пользователем, объясняются в разделе “Перегрузка операций” главы 4.

Операции для работы со значениями `null`

В языке C# предлагаются три операции, которые предназначены для упрощения работы со значениями `null`: *операция объединения с null* (`null-coalescing operator`), *операция присваивания с объединением с null* (`null-coalescing assignment operator`) и *null-условная операция* (`null-conditional operator`).

Таблица 2.3. Операции C# (с категоризацией в порядке приоритетов)

Категория	Символ операции	Название операции	Пример	Возможность перегрузки пользователем
Первичные	.	Доступ к члену	x.y	Нет
	? . и ?[]	null-условная	x?.y или x?[0]	Нет
	! (постфиксная)	null-терпимая	x!.y или x![0]	Нет
	-> (небезопасная)	Указатель на структуру	x->y	Нет
	()	Вызов функции	x()	Нет
	[]	Массив/индекс	a[x]	Через индексатор
	++	Постфиксная форма инкремента	x++	Да
	--	Постфиксная форма декремента	x--	Да
	new	Создание экземпляра	new Foo()	Нет
	stackalloc	Выделение памяти в стеке	stackalloc(10)	Нет
	typeof	Получение типа по идентификатору	typeof(int)	Нет
	nameof	Получение имени идентификатора	nameof(x)	Нет
Унарные	checked	Включение проверки целочисленного переполнения	checked(x)	Нет
	unchecked	Отключение проверки целочисленного переполнения	unchecked(x)	Нет
	default	Стандартное значение	default(char)	Нет
	await	Ожидание	await myTask	Нет
	sizeof	Получение размера структуры	sizeof(int)	Нет
	+	Положительное значение	+x	Да
	-	Отрицательное значение	-x	Да
	!	НЕ	!x	Да
	~	Побитовое дополнение	~x	Да
	++	Префиксная форма инкремента	++x	Да

Категория	Символ операции	Название операции	Пример	Возможность перегрузки пользователем
	--	Префиксная форма декремента	--x	Да
	()	Приведение	(int)x	Нет
	^	Индекс с конца	array[^1]	Нет
	* (небезопасная)	Значение по адресу	*x	Нет
	& (небезопасная)	Адрес значения	&x	Нет
Диапазона	..	Диапазон индексов	x..y	Нет
	..^		x..^y	
switch и with	switch	Выражение switch	num switch { 1 => true, _ => false }	Нет
	with	Выражение with	rec with { x = 123 }	Нет
Мультипликативные	*	Умножение	x * y	Да
	/	Деление	x / y	Да
	%	Остаток от деления	x % y	Да
Аддитивные	+	Сложение	x + y	Да
	-	Вычитание	x - y	Да
Сдвига	<<	Сдвиг влево	x << 1	Да
	>>	Сдвиг вправо	x >> 1	Да
	>>>	Беззнаковый сдвиг вправо	x >>> 1	Да
Отношения	<	Меньше	x < y	Да
	>	Больше	x > y	Да
	<=	Меньше или равно	x <= y	Да
	>=	Больше или равно	x >= y	Да
	is	Принадлежность к типу или его подклассу	x is y	Нет
	as	Преобразование типа	x as y	Нет
Эквивалентности	==	Равно	x == y	Да
	!=	Не равно	x != y	Да
Поразрядное И	&	И	x & y	Да

Категория	Символ операции	Название операции	Пример	Возможность перегрузки пользователем
Поразрядное исключающее ИЛИ	\wedge	Исключающее ИЛИ	$x \wedge y$	Да
Поразрядное ИЛИ	\vee	ИЛИ	$x \vee y$	Да
Условное И	$\&\&$	Условное И	$x \&\& y$	Через &
Условное ИЛИ	$\ $	Условное ИЛИ	$x \ y$	Через
Объединение с null	$??$	Объединение с null	$x ?? y$	Нет
Условная	$?:$	Условная	<code>isTrue ? thenThis : elseThis</code>	Нет
Присваивания и лямбда	=	Присваивание	$x = y$	Нет
	$*=$	Умножение с присваиванием	$x *= 2$	Через *
	$/=$	Деление с присваиванием	$x /= 2$	Через /
	$%=$	Остаток от деления с присваиванием	$x %= 2$	
	$+=$	Сложение с присваиванием	$x += 2$	Через +
	$-=$	Вычитание с присваиванием	$x -= 2$	Через -
	$<<=$	Сдвиг влево с присваиванием	$x <<= 2$	Через <<
	$>>=$	Сдвиг вправо с присваиванием	$x >>= 2$	Через >>
	$>>>=$	Беззнаковый сдвиг вправо с присваиванием	$x >>>= 2$	Через >>>
	$\&=$	Операция И с присваиванием	$x \&= 2$	Через &
	$^=$	Операция исключающего ИЛИ с присваиванием	$x ^= 2$	Через ^
	$ =$	Операция ИЛИ с присваиванием	$x = 2$	Через
	$??=$	Присваивание с объединением с null	$x ??= 0$	Нет
	$=>$	Лямбда-операция	$x => x + 1$	Нет

Операция объединения с null

Операция объединения с null обозначается как `??`. Она выполняется следующим образом: если операнд слева не равен null, тогда возвращается его значение, а иначе возвращается другое значение. Например:

```
string s1 = null;
string s2 = s1 ?? "nothing"; // Переменная s2 получает значение "nothing"
```

Если левостороннее выражение не равно null, то правостороннее выражение никогда не вычисляется. Операция объединения с null также работает с типами, допускающими null (см. раздел “Типы значений, допускающие null” в главе 4).

Операция присваивания с объединением с null

Операция `??=` (появившаяся в версии C# 8) называется *операцией присваивания с объединением с null*. Она выполняется так: если операнд слева равен null, тогда правый операнд присваивается левому операнду. Взгляните на следующий код:

```
myVariable ??= someDefault;
```

Он эквивалентен такому коду:

```
if (myVariable == null) myVariable = someDefault;
```

Операция `??=` особенно удобна при реализации лениво вычисляемых свойств. Мы раскроем эту тему в разделе “Вычисляемые поля и ленивая оценка” главы 4.

null-условная операция

Операция `?.` называется *null-условной операцией* (или *элвис-операцией*). Она позволяет вызывать методы и получать доступ к членам подобно стандартной операции точки, но с той разницей, что если находящийся слева операнд равен null, то результатом выражения будет null без генерации исключения `NullReferenceException`:

```
System.Text.StringBuilder sb = null;
string s = sb?.ToString(); // Ошибка не возникает; взамен s получает
                           // значение null
```

Последняя строка кода эквивалентна следующему коду:

```
string s = (sb == null ? null : sb.ToString());
```

Выражения с null-условной операцией работают также с индексаторами:

```
string[] words = null;
string word = words?[1]; // Переменная word получает значение null
```

Встретив значение null, элвис-операция прекращает вычисление оставшейся части выражения. В приведенном далее примере переменная `s` получает значение null, несмотря на наличие стандартной операции точки между вызовами `ToString()` и `ToUpper()`:

```
System.Text.StringBuilder sb = null;  
string s = sb?.ToString().ToUpper(); // Переменная s получает значение null  
                                    // и ошибка не возникает
```

Многократное использование элвис-операции необходимо, только если находящийся непосредственно слева операнд может быть равен null. Следующее выражение надежно работает в ситуациях, когда и x, и x.y могут быть равны null:

```
x?.y?.z
```

Оно эквивалентно такому выражению (за исключением того, что x.y вычисляется только один раз):

```
x == null ? null  
: (x.y == null ? null : x.y.z)
```

Окончательное выражение должно иметь возможность принимать значение null. Показанный ниже код не является допустимым, потому что переменная типа int не может принимать значение null:

```
System.Text.StringBuilder sb = null;  
int length = sb?.ToString().Length; // Не допускается: переменная int  
                                    // не может принимать значение null
```

Исправить положение можно за счет применения типа значения, допускающего null (см. раздел “Типы значений, допускающие null” в главе 4). На тот случай, если вы уже знакомы с типами значений, допускающими null, то вот как выглядит код:

```
int? length = sb?.ToString().Length; // Нормально: переменная int?  
                                    // может принимать значение null
```

null-условную операцию можно также использовать для вызова метода void:

```
someObject?.SomeVoidMethod();
```

Если переменная someObject равна null, тогда такой вызов становится “отсутствием операции” вместо того, чтобы приводить к генерации исключения NullReferenceException.

null-условная операция может применяться с часто используемыми членами типов, которые будут описаны в главе 3, в том числе с *методами, полями, свойствами и индексаторами*. Она также хорошо сочетается с операцией объединения с null:

```
System.Text.StringBuilder sb = null;  
string s = sb?.ToString() ?? "nothing"; // Переменная s получает  
                                         // значение "nothing"
```

Операторы

Функции состоят из операторов, которые выполняются последовательно в порядке их появления внутри программы. Блок *операторов* — это последовательность операторов, находящихся между фигурными скобками ({}).

Операторы объявления

Оператор объявления переменных объявляет новую переменную и дополнительно способен инициализировать ее посредством выражения. Можно объявлять несколько переменных одного и того же типа, указывая их в списке с запятой в качестве разделителя:

```
string someWord = "rosebud";
int someNumber = 42;
bool rich = true, famous = false;
```

Объявление константы похоже на объявление переменной за исключением того, что после объявления константа не может быть изменена, а объявление обязательно должно сопровождаться инициализацией (см. раздел “Константы” в главе 3):

```
const double c = 2.99792458E08;
c += 10; // Ошибка на этапе компиляции
```

Локальные переменные

Областью видимости локальной переменной или локальной константы является текущий блок. Объявлять еще одну локальную переменную с тем же самым именем в текущем блоке или в любых вложенных блоках не разрешено:

```
int x;
{
    int y;
    int x; // Ошибка - переменная x уже определена
}
{
    int y; // Нормально - переменная y не находится в области видимости
}
Console.WriteLine(y); //Ошибка-переменная y находится за пределами области видимости
```



Область видимости переменной распространяется в *обоих направлениях* на всем протяжении ее блока кода. Это означает, что даже если в приведенном примере перенести первоначальное объявление x в конец метода, то будет получена та же ошибка. Поведение отличается от языка C++ и в чем-то необычно, учитывая недопустимость ссылки на переменную или константу до ее объявления.

Операторы выражений

Операторы выражений представляют собой выражения, которые также являются допустимыми операторами. Оператор выражения должен либо изменять состояние, либо вызывать что-то, что может изменять состояние. Изменение состояния по существу означает изменение переменной. Ниже перечислены возможные операторы выражений:

- выражения присваивания (включая выражения инкремента и декремента);
- выражения вызова методов (void и не void);
- выражения создания объектов.

Рассмотрим несколько примеров:

```
// Объявить переменные с помощью операторов объявления:  
string s;  
int x, y;  
System.Text.StringBuilder sb;  
// Операторы выражений  
x = 1 + 2;                                // Выражение присваивания  
x++;                                         // Выражение инкремента  
y = Math.Max (x, 5);                        // Выражение присваивания  
Console.WriteLine (y);                      // Выражение вызова метода  
sb = new StringBuilder();                   // Выражение присваивания  
new StringBuilder();                         // Выражение создания объекта
```

При вызове конструктора или метода, который возвращает значение, вы не обязаны использовать результат. Тем не менее, если этот конструктор или метод не изменяет состояние, то такой оператор совершенно бесполезен:

```
new StringBuilder();                         // Допустим, но бесполезен  
new string ('c', 3);                       // Допустим, но бесполезен  
x.Equals (y);                            // Допустим, но бесполезен
```

Операторы выбора

В C# имеются следующие механизмы для условного управления потоком выполнения программы:

- операторы выбора (`if`, `switch`);
- условная операция (`? :`);
- операторы цикла (`while`, `do..while`, `for`, `foreach`).

В текущем разделе рассматриваются две простейшие конструкции: операторы `if` и `switch`.

Оператор `if`

Оператор `if` выполняет некоторый оператор, если вычисление выражения `bool` в результате дает `true`:

```
if (5 < 2 * 3)  
    Console.WriteLine ("true");                // Выводит true
```

В качестве оператора может выступать блок кода:

```
if (5 < 2 * 3)  
{  
    Console.WriteLine ("true");  
    Console.WriteLine ("Let's move on!");  
}
```

Конструкция `else`

Оператор `if` может быть дополнительно снабжен конструкцией `else`:

```
if (2 + 2 == 5)  
    Console.WriteLine ("Does not compute");    // Не вычисляется  
else  
    Console.WriteLine ("False");                // Выводит False
```

Внутрь конструкции `else` можно помещать другой оператор `if`:

```
if (2 + 2 == 5)
    Console.WriteLine ("Does not compute"); // Выводит Does not compute
                                                // (Не вычисляется)
else
    if (2 + 2 == 4)
        Console.WriteLine ("Computes"); // Выводит Computes (Вычисляется)
```

Изменение потока выполнения с помощью фигурных скобок

Конструкция `else` всегда применяется к непосредственно предшествующему оператору `if` в блоке операторов:

```
if (true)
    if (false)
        Console.WriteLine();
    else
        Console.WriteLine ("executes"); // Выводит executes (выполняется)
```

Код семантически идентичен такому коду:

```
if (true)
{
    if (false)
        Console.WriteLine();
    else
        Console.WriteLine ("executes");
}
```

Переместив фигурные скобки, поток выполнения можно изменить:

```
if (true)
{
    if (false)
        Console.WriteLine();
}
else
    Console.WriteLine ("does not execute"); // Выводит does not execute
                                                // (не выполняется)
```

С помощью фигурных скобок вы явно заявляете о своих намерениях. Фигурные скобки могут улучшить читабельность вложенных операторов `if`, даже когда они не требуются компилятором. Важным исключением является следующий шаблон:

```
void TellMeWhatICanDo (int age)
{
    if (age >= 35)
        Console.WriteLine ("You can be president!"); // Вы можете стать
                                                       // президентом!
    else if (age >= 21)
        Console.WriteLine ("You can drink!"); // Вы можете выпивать!
    else if (age >= 18)
        Console.WriteLine ("You can vote!"); // Вы можете голосовать!
    else
        Console.WriteLine ("You can wait!"); // Вы можете лишь ждать!
}
```

Здесь операторы `if` и `else` были организованы так, чтобы сымитировать конструкцию “`elseif`” из других языков (и директиву препроцессора `#elif` в C#). Средство автоматического форматирования Visual Studio распознает такой шаблон и предохраняет отступы. Однако семантически каждый оператор `if`, следующий за `else`, функционально вложен внутрь конструкции `else`.

Оператор `switch`

Операторы `switch` позволяют реализовать ветвление потока выполнения программы на основе выбора из возможных значений, которые переменная способна принимать. Операторы `switch` могут дать в результате более ясный код, чем множество операторов `if`, поскольку они требуют только однократного вычисления выражения:

```
static void ShowCard(int cardNumber)
{
    switch (cardNumber)
    {
        case 13:
            Console.WriteLine ("King");           // Король
            break;
        case 12:
            Console.WriteLine ("Queen");         // Дама
            break;
        case 11:
            Console.WriteLine ("Jack");          // Валет
            break;
        case -1:                // Джокер соответствует -1
            goto case 12;   // В этой игре джокер подсчитывается как дама
        default:              // Выполняется для любого другого значения cardNumber
            Console.WriteLine (cardNumber);
            break;
    }
}
```

В приведенном примере демонстрируется самый распространенный сценарий, при котором осуществляется переключение по *константам*. При указании константы вы ограничены встроенными числовыми типами, а также типами `bool`, `char`, `string` и `enum`.

В конце каждой конструкции `case` посредством одного из операторов перехода необходимо явно указывать, куда управление должно передаваться дальше (если только вы не хотите получить сквозное выполнение). Ниже перечислены возможные варианты:

- `break` (переход в конец оператора `switch`);
- `goto case x` (переход на другую конструкцию `case`);
- `goto default` (переход на конструкцию `default`);
- любой другой оператор перехода, а именно — `return`, `throw`, `continue` или `goto` метка.

Когда для нескольких значений должен выполняться тот же самый код, конструкции `case` можно записывать последовательно:

```
switch (cardNumber)
{
    case 13:
    case 12:
    case 11:
        Console.WriteLine ("Face card"); // Фигурная карта
        break;
    default:
        Console.WriteLine ("Plain card"); // Нефигурная карта
        break;
}
```

Такая особенность оператора `switch` может иметь решающее значение в плане обеспечения более ясного кода, чем в случае множества операторов `if-else`.

Переключение по типам



Переключение по типу является особым случаем переключения по *шаблону*. В последних версиях C# появилось несколько других шаблонов; полное обсуждение ищите в разделе “Шаблоны” главы 4.

Можно также переключаться по *типам* (начиная с версии C# 7):

```
TellMeTheType (12);
TellMeTheType ("hello");
TellMeTheType (true);
void TellMeTheType (object x) // object допускает любой тип
{
    switch (x)
    {
        case int i:
            Console.WriteLine ("It's an int!"); // Это не целочисленное значение!
            Console.WriteLine ($"The square of {i} is {i * i}"); // Вывод квадрата
            break;
        case string s:
            Console.WriteLine ("It's a string!"); // Это не строка!
            Console.WriteLine ($"The length of {s} is {s.Length}"); // Вывод
            // длины строки
            break;
        case DateTime:
            Console.WriteLine ("It's a DateTime"); // Значение типа DateTime
            break;
        default:
            Console.WriteLine ("I don't know what x is"); // Неизвестное значение
            break;
    }
}
```

(Тип `object` воспринимает переменную любого типа; мы подробно обсудим это в разделах “Наследование” и “Тип `object`” главы 3.) В каждой конструкции `case` указываются тип для сопоставления и переменная, которой нужно присвоить типизированное значение в случае совпадения (“шаблонная” переменная). В отличие от констант никаких ограничений на используемые типы не налагается.

Конструкцию `case` можно снабдить ключевым словом `when`:

```
switch (x)
{
    case bool b when b == true:      // Выполняется, только если b равно true
        Console.WriteLine ("True!");
        break;
    case bool b:
        Console.WriteLine ("False!");
        break;
}
```

При переключении по типам порядок следования конструкций `case` может быть важным (в отличие от случая с переключением по константам). Если поменять местами две конструкции `case`, то рассмотренный пример давал бы другой результат (на самом деле он даже не скомпилируется, поскольку компилятор определит, что вторая конструкция `case` недостижима). Исключением из данного правила является конструкция `default`, которая всегда выполняется последней вне зависимости от того, где находится.

Можно указывать друг за другом несколько конструкций `case`. Вызов `Console.WriteLine` в показанном ниже коде будет выполняться для любого значения с плавающей точкой, которое больше 1000:

```
switch (x)
{
    case float f when f > 1000:
    case double d when d > 1000:
    case decimal m when m > 1000:
        Console.WriteLine ("We can refer to x here but not f or d or m");
        // Мы можем здесь ссылаться на x, но не на f или d или m
        break;
}
```

В приведенном примере компилятор разрешает употреблять шаблонные переменные `f`, `d` и `m` только в конструкциях `when`. При вызове `Console.WriteLine` неизвестно, какая из трех переменных будет присвоена, а потому компилятор выносит их все за пределы области видимости.

В рамках одного оператора `switch` константы и шаблоны можно смешивать и сочетать. Вдобавок можно переключаться по значению `null`:

```
case null:
    Console.WriteLine ("Nothing here");
    break;
```

Выражения `switch`

Начиная с версии C# 8, конструкцию `switch` можно использовать в контексте *выражения*. В следующем коде приведен пример, в котором предполагается, что `cardName` имеет тип `int`:

```
string cardName = cardNumber switch
{
    13 => "King",      // Король
    12 => "Queen",     // Дама
    11 => "Jack",      // Валет
    _ => "Pip card"   // Нефигурная карта; эквивалентно default
};
```

Обратите внимание на то, что ключевое слово `switch` находится *после* имени переменной, и конструкции `case` являются выражениями (которые заканчиваются запятыми), а не операторами. Выражения `switch` более компактны, чем эквивалентные им операторы `switch`, и вы можете использовать их в запросах LINQ (см. главу 8).

Если вы опустите выражение по умолчанию (`_`) и `switch` не обнаружит соответствия, тогда генерируется исключение.

Вы также можете переключаться по множеству значений (шаблон кортежа):

```
int cardNumber = 12;
string suit = "spades";
string cardName = (cardNumber, suit) switch
{
    (13, "spades") => "King of spades",
    (13, "clubs")   => "King of clubs",
    ...
};
```

Благодаря применению *шаблонов* (см. раздел “Шаблоны” в главе 4) становятся возможными многие другие варианты.

Операторы итераций

Язык C# позволяет многократно выполнять последовательность операторов с помощью операторов `while`, `do-while`, `for` и `foreach`.

Циклы `while` и `do-while`

Циклы `while` многократно выполняют код в своем теле до тех пор, пока результатом выражения типа `bool` является `true`. Выражение проверяется *перед* выполнением тела цикла. Например, следующий код выводит 012:

```
int i = 0;
while (i < 3)
{
    Console.Write (i);
    i++;
}
```

Циклы `do-while` отличаются по функциональности от циклов `while` только тем, что выражение в них проверяется *после* выполнения блока операторов (гарантируя выполнение блока минимум один раз). Ниже приведен предыдущий пример, переписанный для применения цикла `do-while`:

```
int i = 0;
do
{
    Console.WriteLine (i);
    i++;
}
while (i < 3);
```

Циклы **for**

Циклы **for** похожи на циклы **while**, но имеют специальные конструкции для инициализации и итерации переменной цикла. Цикл **for** содержит три конструкции:

```
for (конструкция-инициализации; конструкция-условия; конструкция-итерации)
    оператор-или-блок-операторов
```

Все конструкции описаны ниже.

- **Конструкция инициализации.** Выполняется перед началом цикла; служит для инициализации одной или большего количества переменных *итерации*.
- **Конструкция условия.** Выражение типа **bool**, при значении **true** которого будет выполняться тело цикла.
- **Конструкция итерации.** Выполняется *после* каждого прогона блока операторов; обычно используется для обновления переменной итерации.

Например, следующий цикл выводит числа от 0 до 2:

```
for (int i = 0; i < 3; i++)
    Console.WriteLine (i);
```

Приведенный ниже код выводит первые 10 чисел последовательности Фибоначчи (в которой каждое число является суммой двух предыдущих):

```
for (int i = 0, prevFib = 1, curFib = 1; i < 10; i++)
{
    Console.WriteLine (prevFib);
    int newFib = prevFib + curFib;
    prevFib = curFib; curFib = newFib;
}
```

Любую из трех частей оператора **for** разрешено опускать. Вот как можно было бы реализовать бесконечный цикл (хотя подойдет и **while(true)**):

```
for (;;)
    Console.WriteLine ("interrupt me");
```

Циклы **foreach**

Оператор **foreach** обеспечивает проход по всем элементам в перечислимом объекте. Большинство типов .NET, которые представляют набор или список элементов, являются перечислимыми. Примерами перечислимых типов могут служить массивы и строки. Ниже приведен код для перечисления символов в строке, от первого до последнего:

```
foreach (char c in "beer") // c - переменная итерации
    Console.WriteLine (c);
```

Вот как выглядит вывод:

```
b  
e  
e  
r
```

Перечислимые объекты описаны в разделе “Перечисление и итераторы” главы 4.

Операторы перехода

К операторам перехода в C# относятся `break`, `continue`, `goto`, `return` и `throw`.



Операторы перехода подчиняются правилам надежности операторов `try` (см. раздел “Операторы `try` и исключения” в главе 4). Это означает следующее:

- при переходе из блока `try` перед достижением цели перехода всегда выполняется блок `finally` оператора `try`;
- переход не может производиться изнутри блока `finally` наружу (кроме как через `throw`).

Оператор `break`

Оператор `break` заканчивает выполнение тела итерации или оператора `switch`:

```
int x = 0;
while (true)
{
    if (x++ > 5)
        break; // Прервать цикл
}
// После break выполнение продолжится здесь
...
```

Оператор `continue`

Оператор `continue` игнорирует оставшиеся операторы в цикле и начинает следующую итерацию. В представленном ниже цикле пропускаются четные числа:

```
for (int i = 0; i < 10; i++)
{
    if ((i % 2) == 0)          // Если значение i четное,
        continue;             // тогда перейти к следующей итерации
    Console.Write (i + " ");
}
```

Вот вывод:

1 3 5 7 9

Оператор `goto`

Оператор `goto` переносит выполнение на указанную метку внутри блока операторов. Он имеет следующую форму:

```
goto метка-оператора;
```

или же такую форму, когда используется внутри оператора `switch`:

```
goto case константа-case; // (Работает только с константами, но не с шаблонами)
```

Метка — это заполнитель в блоке кода, который предваряет оператор и завершается двоеточием.

Показанный далее код выполняет итерацию по числам от 1 до 5, имитируя поведение цикла `for`:

```
int i = 1;
startLoop:
if (i <= 5)
{
    Console.Write (i + " ");
    i++;
    goto startLoop;
}
```

Ниже приведен вывод:

```
1 2 3 4 5
```

Форма `goto case` константа-`case` переносит выполнение на другую конструкцию `case` в блоке `switch` (см. раздел “Оператор `switch`” ранее в главе).

Оператор `return`

Оператор `return` завершает метод и должен возвращать выражение возвращаемого типа метода, если метод не является `void`:

```
decimal AsPercentage (decimal d)
{
    decimal p = d * 100m;
    return p;           // Возвратиться в вызывающий метод со значением
}
```

Оператор `return` может находиться в любом месте метода (кроме блока `finally`) и встречаться более одного раза.

Оператор `throw`

Оператор `throw` генерирует исключение для указания на то, что возникла ошибка (см. раздел “Операторы `try` и исключения” в главе 4):

```
if (w == null)
    throw new ArgumentNullException (...);
```

Смешанные операторы

Оператор `using` предлагает элегантный синтаксис для вызова метода `Dispose` на объектах, которые реализуют интерфейс `IDisposable`, внутри блока `finally` (см. раздел “Операторы `try` и исключения” в главе 4 и раздел “`IDisposable`, `Dispose` и `Close`” в главе 12).



Ключевое слово `using` в C# перегружено, поэтому в разных контекстах оно имеет разный смысл. В частности, *директива using* отличается от *оператора using*.

Оператор `lock` является сокращением для вызова методов `Enter` и `Exit` класса `Monitor` (см. главы 14 и 23).

Пространства имен

Пространство имен — это область, предназначенная для имен типов. Типы обычно организуются в иерархические пространства имен, облегчая их поиск и устранивая возможность возникновения конфликтов. Например, тип RSA, который поддерживает шифрование открытым ключом, определен в следующем пространстве имен:

```
System.Security.Cryptography
```

Пространство имен — неотъемлемая часть имени типа. В приведенном ниже коде вызывается метод Create класса RSA:

```
System.Security.Cryptography.RSA rsa =  
    System.Security.Cryptography.RSA.Create();
```



Пространства имен не зависят от сборок, которые являются файлами .dll, служащими единицами развертывания (см. главу 17).

Пространства имен также не влияют на видимость членов — public, internal, private и т.д.

Ключевое слово namespace определяет пространство имен для типов внутри данного блока. Например:

```
namespace Outer.Middle.Inner  
{  
    class Class1 {}  
    class Class2 {}  
}
```

С помощью точек отражается иерархия вложенных пространств имен. Следующий код семантически идентичен коду из предыдущего примера:

```
namespace Outer  
{  
    namespace Middle  
    {  
        namespace Inner  
        {  
            class Class1 {}  
            class Class2 {}  
        }  
    }  
}
```

Ссылаться на тип можно с помощью его *полностью заданного имени*, которое включает все пространства имен, от самого внешнего до самого внутреннего. Например, мы могли бы сослаться на Class1 из предшествующего примера в форме Outer.Middle.Inner.Class1.

Говорят, что типы, которые не определены в каком-либо пространстве имен, находятся в *глобальном пространстве имен*. Глобальное пространство имен также включает пространства имен верхнего уровня, такие как Outer в приведенном примере.

Пространства имен с областью видимости на уровне файлов

Часто необходимо, чтобы все типы в файле были определены в одном пространстве имен:

```
namespace MyNamespace
{
    class Class1 {}
    class Class2 {}
}
```

Начиная с версии C# 10, этого можно добиться с помощью *пространства имен с областью видимости на уровне файла*:

```
namespace MyNamespace; // Применяется ко всем последующим типам,
                      // определенным в файле
class Class1 {}        // Внутри MyNamespace
class Class2 {}        // Внутри MyNamespace
```

Пространства имен с областью видимости на уровне файла уменьшают беспорядок и устраниют ненужный уровень отступов.

Директива `using`

Директива `using` импортирует пространство имен, позволяя ссылаться на типы без указания их полностью заданных имен. В следующем коде импортируется пространство имен `Outer.Middle.Inner` из предыдущего примера:

```
using Outer.Middle.Inner;
Class1 c; // Полностью заданное имя указывать не обязательно
```



Вполне законно (и часто желательно) определять в двух разных пространствах имен одно и то же имя типа. Тем не менее, обычно это делается только в случае низкой вероятности возникновения ситуации, когда потребитель пожелает импортировать сразу оба пространства имен. Хорошим примером может служить класс `TextBox`, который определен и в `System.Windows.Controls` (WPF), и в `System.Windows.Forms` (Windows Forms).

Директиву `using` можно вкладывать внутрь самого пространства имен, чтобы ограничивать область ее действия.

Директива `global using`

Начиная с версии C# 10, в случае добавления к директиве `using` ключевого слова `global` директива будет применяться ко всем файлам в проекте или в единице компиляции:

```
global using System;
global using System.Collections.Generic;
```

Это позволяет централизовать общее импортирование и избежать повторения одних и тех же директив в каждом файле.

Директивы `global using` должны предшествовать неглобальным директивам и не могут находиться внутри объявлений пространств имен. Директиву `global using` можно использовать вместе с `using static`.

Неявные директивы `global using`

Начиная с версии .NET 6, файлы проектов позволяют применять неявные директивы `global using`. Если для элемента `ImplicitUsings` в файле проекта установлено значение `true` (по умолчанию так принято для новых проектов), то автоматически импортируются следующие пространства имен:

```
System
System.Collections.Generic
System.IO
System.Linq
System.Net.Http
System.Threading
System.Threading.Tasks
```

Дополнительные пространства имен импортируются на основе комплекта SDK проекта (Web, Windows Forms, WPF и т.д.).

Директива `using static`

Директива `using static` импортирует *тип*, а не пространство имен. Затем все статические члены импортированного типа можно использовать, не снабжая их именем типа. В показанном ниже примере вызывается статический метод `WriteLine` класса `Console` без ссылки на тип:

```
using static System.Console;
WriteLine ("Hello");
```

Директива `using static` импортирует все доступные статические члены типа, включая поля, свойства и вложенные типы (глава 3). Ее также можно применять к перечислимым типам (см. главу 3), что приведет к импортированию их членов. Таким образом, если мы импортируем следующий перечислимый тип:

```
using static System.Windows.Visibility;
```

то вместо `Visibility.Hidden` сможем указывать просто `Hidden`:

```
var textBox = new TextBox { Visibility = Hidden }; // Стиль XAML
```

Если между несколькими директивами `using static` возникнет неоднозначность, тогда компилятор C# не сумеет вывести корректный тип из контекста и сообщит об ошибке.

Правила внутри пространства имен

Область видимости имен

Имена, объявленные во внешних пространствах имен, могут использоваться во внутренних пространствах имен без дополнительного указания пространства.

В следующем примере `Class1` не нуждается в указании пространства имен внутри `Inner`:

```
namespace Outer
{
    class Class1 {}
    namespace Inner
    {
        class Class2 : Class1 {}
    }
}
```

Если ссылаться на тип необходимо из другой ветви иерархии пространств имен, тогда можно применять частично заданное имя. В показанном ниже примере класс SalesReport основан на Common.ReportBase:

```
namespace MyTradingCompany
{
    namespace Common
    {
        class ReportBase {}
    }
    namespace ManagementReporting
    {
        class SalesReport : Common.ReportBase {}
    }
}
```

Скрытие имен

Если одно и то же имя типа встречается и во внутреннем, и во внешнем пространстве имен, то преимущество получает тип из внутреннего пространства имен. Чтобы сослаться на тип из внешнего пространства имен, имя потребуется уточнить. Например:

```
namespace Outer
{
    class Foo { }

    namespace Inner
    {
        class Foo { }
        class Test
        {
            Foo f1;                      // = Outer.Inner.Foo
            Outer.Foo f2;                // = Outer.Foo
        }
    }
}
```



Все имена типов на этапе компиляции преобразуются в полностью заданные имена. Код на промежуточном языке (IL) не содержит неполные или частично заданные имена.

Повторяющиеся пространства имен

Объявление пространства имен можно повторять при условии, что имена типов внутри объявлений не конфликтуют друг с другом:

```
namespace Outer.Middle.Inner
{
    class Class1 {}
}
namespace Outer.Middle.Inner
{
    class Class2 {}
}
```

Код в этом примере можно даже разнести по двум исходным файлам, что позволит компилировать каждый класс в отдельную сборку.

Исходный файл 1:

```
namespace Outer.Middle.Inner
{
    class Class1 {}
}
```

Исходный файл 2:

```
namespace Outer.Middle.Inner
{
    class Class2 {}
}
```

Вложенные директивы `using`

Директиву `using` можно вкладывать внутрь пространства имен, что позволяет ограничивать область видимости директивы `using` объявлением пространства имен. В следующем примере имя `Class1` доступно в одной области видимости, но не доступно в другой:

```
namespace N1
{
    class Class1 {}
}
namespace N2
{
    using N1;
    class Class2 : Class1 {}
}
namespace N2
{
    class Class3 : Class1 {} // Ошибка на этапе компиляции
}
```

Назначение псевдонимов типам и пространствам имен

Импортирование пространства имен может привести к конфликту имен типов. Вместо полного пространства имен можно импортировать только конкретные типы, которые нужны, и назначать каждому типу псевдоним:

```
using PropertyInfo2 = System.Reflection.PropertyInfo;
class Program { PropertyInfo2 p; }
```

Псевдоним можно назначить целому пространству имен:

```
using R = System.Reflection;
class Program { R.PropertyInfo p; }
```

Назначение псевдонима любому типу (C# 12)

Начиная с версии C# 12, посредством директивы `using` можно назначать псевдоним любому типу, включая, например, массивы:

```
using NumberList = double[];
NumberList numbers = { 2.5, 3.5 };
```

Можно также назначать псевдонимы кортежам, как будет показано в разделе “Назначение псевдонимов кортежам (C# 12)” главы 4.

Дополнительные возможности пространств имен

Внешние псевдонимы

Внешние псевдонимы позволяют программе ссылаться на два типа с одним и тем же полностью заданным именем (т.е. сочетания пространства имен и имени типа одинаковы). Этот необычный сценарий может возникнуть только в ситуации, когда два типа поступают из разных сборок. Рассмотрим представленный ниже пример.

Библиотека 1, скомпилированная в Widgets1.dll:

```
namespace Widgets
{
    public class Widget {}
}
```

Библиотека 2, скомпилированная в Widgets2.dll:

```
namespace Widgets
{
    public class Widget {}
}
```

Приложение, которое ссылается на Widgets1.dll и Widgets2.dll:

```
using Widgets;
Widget w = new Widget();
```

Код такого приложения не может быть скомпилирован, потому что имеется неоднозначность с `Widget`. Решить проблему неоднозначности в приложении помогут внешние псевдонимы.

Первым делом нужно изменить файл `.csproj`, назначив каждой ссылке уникальный псевдоним:

```
<ItemGroup>
    <Reference Include="Widgets1">
        <Aliases>W1</Aliases>
    </Reference>
    <Reference Include="Widgets2">
        <Aliases>W2</Aliases>
    </Reference>
</ItemGroup>
```

Затем необходимо воспользоваться директивой `extern alias`:

```
extern alias W1;
extern alias W2;
W1.Widgets.Widget w1 = new W1.Widgets.Widget();
W2.Widgets.Widget w2 = new W2.Widgets.Widget();
```

Уточнители псевдонимов пространств имен

Как упоминалось ранее, имена во внутренних пространствах имен скрывают имена из внешних пространств. Тем не менее, иногда даже применение полностью заданного имени не устраниет конфликт. Взгляните на следующий пример:

```
namespace N
{
    class A
    {
        static void Main() => new A.B();           // Создать экземпляр класса B
        public class B {}                          // Вложенный тип
    }
}
namespace A
{
    class B {}
}
```

Метод Main мог бы создавать экземпляр либо вложенного класса B, либо класса B из пространства имен A. Компилятор всегда назначает более высокий приоритет идентификаторам из текущего пространства имен (в данном случае — вложенному классу B).

Для разрешения конфликтов подобного рода название пространства имен может быть уточнено относительно одного из следующих аспектов:

- глобального пространства имен — корня всех пространств имен (идентифицируется контекстным ключевым словом `global`);
- набора внешних псевдонимов.

Псевдоним пространства имен уточняется с помощью маркера `::`. В этом примере мы уточняем с использованием глобального пространства имен (чаще всего такое уточнение можно встречать в автоматически генерируемом коде — оно направлено на устранение конфликтов имен):

```
namespace N
{
    class A
    {
        static void Main()
        {
            System.Console.WriteLine (new A.B());
            System.Console.WriteLine (new global::A.B());
        }
        public class B {}
    }
}
namespace A
{
    class B {}
}
```

Ниже приведен пример уточнения псевдонима (взятый из примера в разделе “Внешние псевдонимы” ранее в главе):

```
extern alias W1;
extern alias W2;
W1::Widgets.Widget w1 = new W1::Widgets.Widget();
W2::Widgets.Widget w2 = new W2::Widgets.Widget();
```



3

Создание типов в языке C#

В настоящей главе мы займемся исследованием типов и членов типов.

Классы

Класс является наиболее распространенной разновидностью ссылочного типа. Простейшее из возможных объявление класса выглядит следующим образом:

```
class YourClassName
{
}
```

Более сложный класс может дополнительно иметь перечисленные ниже компоненты.

Перед ключевым словом `class`

Атрибуты и модификаторы класса. К модификаторам невложенных классов относятся `public`, `internal`, `abstract`, `sealed`, `static`, `unsafe` и `partial`

После `YourClassName`

Параметры и ограничения обобщенных типов, базовый класс и интерфейсы

Внутри фигурных скобок

Члены класса (к ним относятся методы, свойства, индексаторы, события, поля, конструкторы, перегруженные операции, вложенные типы и финализатор)

В текущей главе описаны все конструкции кроме атрибутов, функций операций и ключевого слова `unsafe`, которые раскрываются в главе 4. В последующих разделах все члены класса рассматриваются по очереди.

Поле — это переменная, которая является членом класса или структуры; например:

```
class Octopus
{
    string name;
    public int Age = 10;
}
```

С полями разрешено применять следующие модификаторы.

Статический модификатор	static
Модификаторы доступа	public internal private protected
Модификатор наследования	new
Модификатор небезопасного кода	unsafe
Модификатор доступа только для чтения	readonly
Модификатор многопоточности	volatile

Для закрытых полей существуют два популярных соглашения об именовании: “верблюжий” стиль (например, `firstName`) и “верблюжий” стиль с подчеркиванием (`_firstName`). Последнее соглашение позволяет мгновенно отличать закрытые поля от параметров и локальных переменных.

Модификатор `readonly`

Модификатор `readonly` предотвращает изменение поля после его создания. Присваивать значение полю, допускающему только чтение, можно только в его объявлении или внутри конструктора типа, где оно определено.

Инициализация полей

Инициализация полей необязательна. Неинициализированное поле получает свое стандартное значение (0, '\0', null, false). Инициализаторы полей выполняются перед конструкторами:

```
public int Age = 10;
```

Инициализатор поля может содержать выражения и вызывать методы:

```
static readonly string TempFolder = System.IO.Path.GetTempPath();
```

Объявление множества полей вместе

Для удобства множество полей одного типа можно объявлять в списке, разделяя их запятыми. Это подходящий способ обеспечить совместное использование всеми полями одних и тех же атрибутов и модификаторов полей:

```
static readonly int legs = 8,  
                  eyes = 2;
```

Константа вычисляется статически на этапе компиляции и компилятор литеральным образом подставляет ее значение всякий раз, когда она встречается (что довольно похоже на макрос в C++). Константа может относиться к любому из встроенных числовых типов, `bool`, `char`, `string` или к типу перечисления.

Константа объявляется с помощью ключевого слова `const` и должна быть инициализирована каким-нибудь значением. Например:

```
public class Test  
{  
    public const string Message = "Hello World";  
}
```

Константа может исполнять роль, сходную с ролью поля `static readonly`, но она гораздо более ограничена — как в типах, которые можно применять,

так и в семантике инициализации поля. Константа также отличается от поля static readonly тем, что ее вычисление происходит на этапе компиляции. Соответственно показанный ниже код:

```
public static double Circumference (double radius)
{
    return 2 * System.Math.PI * radius;
}
```

компилируется в такой код:

```
public static double Circumference (double radius)
{
    return 6.2831853071795862 * radius;
}
```

Имеет смысл, чтобы поле PI было константой, т.к. его значение никогда не меняется. Напротив, поле static readonly может получать отличающееся значение при каждом запуске программы:

```
static readonly DateTime StartupTime = DateTime.Now;
```



Поле static readonly также полезно, когда другим сборкам открывается доступ к значению, которое в более поздней версии сборки может измениться. Например, пусть сборка X открывает доступ к константе:

```
public const decimal ProgramVersion = 2.3;
```

Если сборка Y ссылается на сборку X и пользуется константой ProgramVersion, тогда при компиляции значение 2.3 будет встроено в сборку Y. В результате, когда сборка X позже перекомпилируется с константой ProgramVersion, установленной в 2.4, в сборке Y по-прежнему будет применяться старое значение 2.3 *до тех пор, пока сборка Y не будет перекомпилирована*. Поле static readonly позволяет избежать такой проблемы.

На описанную ситуацию можно взглянуть и по-другому: любое значение, которое способно измениться в будущем, по определению не является константой, а потому не должно быть представлено как константа.

Константы можно также объявлять локально внутри метода:

```
void Test()
{
    const double twoPI = 2 * System.Math.PI;
    ...
}
```

Нелокальные константы допускают использование перечисленных далее модификаторов.

Модификаторы доступа

public internal private protected

Модификатор наследования

new

Методы

Метод выполняет действие, представленное в виде последовательности операторов. Метод может получать *входные* данные из вызывающего кода посредством указания *параметров* и возвращать *выходные* данные обратно вызывающему коду за счет указания *возвращаемого типа*. Для метода может быть определен возвращаемый тип `void`, который говорит о том, что метод никакого значения не возвращает. Метод также может возвращать выходные данные вызывающему коду через параметры `ref/out`.

Сигнатура метода должна быть уникальной в рамках типа. Сигнатура метода включает в себя имя метода и типы параметров по порядку (но не имена параметров и не возвращаемый тип).

С методами разрешено применять следующие модификаторы.

Статический модификатор

`static`

Модификаторы доступа

`public internal private protected`

Модификаторы наследования

`new virtual abstract override sealed`

Модификатор частичного метода

`partial`

Модификаторы неуправляемого кода

`unsafe extern`

Модификатор асинхронного кода

`async`

Методы, сжатые до выражений

Метод, который состоит из единственного выражения, такой как:

```
int Foo (int x) { return x * 2; }
```

можно записать более кратко в виде *метода, сжатого до выражения* (*expression-bodied*). Фигурные скобки и ключевое слово `return` заменяются комбинацией `=>`:

```
int Foo (int x) => x * 2;
```

Функции, сжатые до выражений, могут также иметь возвращаемый тип `void`:

```
void Foo (int x) => Console.WriteLine (x);
```

Локальные методы

Метод можно определять внутри другого метода:

```
void WriteCubes ()  
{  
    Console.WriteLine (Cube (3));  
    Console.WriteLine (Cube (4));  
    Console.WriteLine (Cube (5));  
  
    int Cube (int value) => value * value * value;  
}
```

Локальный метод (`Cube` в данном случае) будет видимым только для охватывающего метода (`WriteCubes`). Это упрощает содержащий тип и немедленно подает сигнал любому, кто просматривает код, что `Cube` больше нигде не при-

меняется. Еще одно преимущество локальных методов заключается в том, что они могут обращаться к локальным переменным и параметрам охватывающего метода. С такой особенностью связано несколько последствий, которые описаны в разделе “Захватывание внешних переменных” главы 4.

Локальные методы могут появляться внутри функций других видов, таких как средства доступа к свойствам, конструкторы и т.д. Локальные методы можно даже помещать внутрь других локальных методов и лямбда-выражений, которые используют блок операторов (см. главу 4). Локальные методы могут быть итераторными (см. главу 4) или асинхронными (см. главу 14).

Статические локальные методы

Добавление модификатора `static` к локальному методу (возможность, появившаяся в версии C# 8) запрещает ему видеть локальные переменные и параметры охватывающего метода. Это помогает ослабить связность и предотвращает случайную ссылку в локальном методе на переменные из содержащего метода.

Локальные методы и операторы верхнего уровня

Любые методы, которые объявляются в операторах верхнего уровня, трактуются как локальные методы. Таким образом, они могут обращаться к переменным в операторах верхнего уровня (если только не были помечены как `static`):

```
int x = 3;
Foo();
void Foo() => Console.WriteLine (x);
```

Перегрузка методов



Локальные методы перегружать нельзя. Это значит, что методы, объявленные в операторах верхнего уровня (и трактуемые как локальные), не могут быть перегружены.

Тип может *перегружать* методы (определять несколько методов с одним и тем же именем) при условии, что их сигнатуры будут отличаться. Например, все перечисленные ниже методы могут сосуществовать внутри того же самого типа:

```
void Foo (int x) {...}
void Foo (double x) {...}
void Foo (int x, float y) {...}
void Foo (float x, int y) {...}
```

Тем не менее, следующие пары методов не могут сосуществовать в рамках одного типа, поскольку возвращаемый тип и модификатор `params` не входят в состав сигнатуры метода:

```
void Foo (int x) {...}
float Foo (int x) {...} // Ошибка на этапе компиляции
void Goo (int[] x) {...}
void Goo (params int[] x) {...} // Ошибка на этапе компиляции
```

Способ передачи параметра — по значению или по ссылке — также является частью сигнатуры. Скажем, `Foo(int)` может существовать вместе с `Foo(ref int)` или `Foo(out int)`. Однако `Foo(ref int)` и `Foo(out int)` существовать не могут:

```
void Foo (int x) {...}  
void Foo (ref int x) {...}           // До этого места все в порядке  
void Foo (out int x) {...}          // Ошибка на этапе компиляции
```

Конструкторы экземпляров

Конструкторы выполняют код инициализации класса или структуры. Конструктор определяется подобно методу за исключением того, что вместо имени метода и возвращаемого типа указывается имя типа, к которому относится этот конструктор:

```
Panda p = new Panda ("Petey");      // Вызов конструктора  
public class Panda  
{  
    string name;                    // Определение поля  
    public Panda (string n)         // Определение конструктора  
    {  
        name = n;                  // Код инициализации (установка поля)  
    }  
}
```

Конструкторы экземпляров допускают применение следующих модификаторов.

Модификаторы доступа

public internal private protected

Модификаторы неуправляемого кода

unsafe extern

Конструкторы, содержащие единственный оператор, также можно записывать как члены, сжатые до выражений:

```
public Panda (string n) => name = n;
```



Если имя параметра (или любое имя переменной) конфликтует с именем поля, то неоднозначность можно устранить, предварив имя поля ссылкой `this`:

```
public Panda (string name) => this.name = name;
```

Перегрузка конструкторов

Класс или структура может перегружать конструкторы. Один перегруженный конструктор способен вызывать другой, используя ключевое слово `this`:

```
public class Wine  
{  
    public decimal Price;  
    public int Year;  
    public Wine (decimal price) => Price = price;  
    public Wine (decimal price, int year) : this (price) => Year = year;  
}
```

Когда один конструктор вызывает другой, то первым выполняется **вызванный конструктор**. Другому конструктору можно передавать **выражение**:

```
public Wine (decimal price, DateTime year) : this (price, year.Year) { }
```

Выражение может обращаться к статическим членам класса, но не к членам экземпляра. (Причина в том, что на данной стадии объект еще не инициализирован конструктором, поэтому вызов любого метода вполне вероятно приведет к сбою.)



В этом конкретном примере более эффективной была бы реализация с одним конструктором, у которого год (`year`) является необязательным параметром:

```
public Wine (decimal price, int year = 0)
{
    Price = price; Year = year;
}
```

В разделе “Инициализаторы объектов” далее в главе будет предложено еще одно решение.

Неявные конструкторы без параметров

Компилятор C# автоматически генерирует для класса открытый конструктор без параметров, если и только если в нем не определено ни одного конструктора. Однако после определения хотя бы одного конструктора конструктор без параметров больше автоматически не генерируется.

Порядок выполнения конструктора и инициализации полей

Как было показано ранее, поля могут инициализироваться стандартными значениями в их объявлениях:

```
class Player
{
    int shields = 50;           // Инициализируется первым
    int health = 100;           // Инициализируется вторым
}
```

Инициализация полей происходит *перед* выполнением конструктора в порядке их объявлений.

Неоткрытые конструкторы

Конструкторы не обязательно должны быть открытыми. Распространенной причиной наличия неоткрытого конструктора является управление созданием экземпляров через вызов статического метода. Статический метод может использоваться для возвращения объекта из пула вместо создания нового объекта или для возвращения экземпляров разных подклассов на основе входных аргументов:

```
public class Class1
{
    Class1() {}                  // Закрытый конструктор
    public static Class1 Create (...)

    {
        // Специальная логика для возвращения экземпляра Class1
        ...
    }
}
```

Деконструкторы

Деконструктор (также называемый *деконструиющим методом*) действует почти как противоположность конструктору: в то время когда конструктор обычно принимает набор значений (в качестве параметров) и присваивает их полям, деконструктор делает обратное, присваивая поля набору переменных.

Метод деконструирования должен называться `Deconstruct` и иметь один или большее количество параметров `out`, как в следующем классе:

```
class Rectangle
{
    public readonly float Width, Height;

    public Rectangle (float width, float height)
    {
        Width = width;
        Height = height;
    }

    public void Deconstruct (out float width, out float height)
    {
        width = Width;
        height = Height;
    }
}
```

Для вызова деконструктора применяется специальный синтаксис:

```
var rect = new Rectangle (3, 4);
(float width, float height) = rect; // Деконструирование
Console.WriteLine (width + " " + height); // 3 4
```

Деконструирующий вызов содержится во второй строке. Он создает две локальные переменные и затем обращается к методу `Deconstruct`. Вот чему эквивалентен этот деконструирующий вызов:

```
float width, height;
rect.Deconstruct (out width, out height);
```

Или:

```
rect.Deconstruct (out var width, out var height);
```

Деконструирующие вызовы допускают неявную типизацию, так что наш вызов можно было бы сократить следующим образом:

```
(var width, var height) = rect;
```

Или просто так:

```
var (width, height) = rect;
```



Вы можете применить символ отбрасывания C# (`_`), если не заинтересованы в одной или большем количестве переменных:

```
var (_, height) = rect;
```

Это точнее отражает намерение, чем объявление переменной, которую вы никогда не будете использовать.

Если переменные, в которые производится деконструирование, уже определены, то типы вообще не указываются:

```
float width, height;  
(width, height) = rect;
```

Такое действие называется *деконструиющим присваиванием*. Вы можете применить деконструиующее присваивание для упрощения конструктора вашего класса:

```
public Rectangle (float width, float height) =>  
    (Width, Height) = (width, height);
```

За счет перегрузки метода `Deconstruct` вы можете предложить вызывающему коду целый диапазон вариантов деконструирования.



Метод `Deconstruct` может быть расширяющим методом (см. раздел “Расширяющие методы” в главе 4). Это удобный прием, если вы хотите деконструировать типы, автором которых не являетесь.

Начиная с версии C# 10, при деконструировании можно смешивать и сопоставлять существующие и новые переменные:

```
double x1 = 0;  
(x1, double y2) = rect;
```

Инициализаторы объектов

Для упрощения инициализации объекта любые его доступные поля и свойства можно устанавливать с помощью *инициализатора объекта* прямо после создания. Например, рассмотрим следующий класс:

```
public class Bunny  
{  
    public string Name;  
    public bool LikesCarrots, LikesHumans;  
    public Bunny () {}  
    public Bunny (string n) => Name = n;  
}
```

Вот как можно создавать объекты `Bunny` с использованием инициализаторов объектов:

```
// Обратите внимание, что для конструкторов без параметров круглые  
// скобки можно не указывать  
Bunny b1 = new Bunny { Name="Bo", LikesCarrots=true, LikesHumans=false };  
Bunny b2 = new Bunny ("Bo") { LikesCarrots=true, LikesHumans=false };
```

Код, конструирующий объекты `b1` и `b2`, в точности эквивалентен показанному ниже коду:

```
Bunny temp1 = new Bunny(); // temp1 - имя, сгенерированное компилятором  
temp1.Name = "Bo";  
temp1.LikesCarrots = true;  
temp1.LikesHumans = false;  
Bunny b1 = temp1;
```

```
Bunny temp2 = new Bunny ("Bo");
temp2.LikesCarrots = true;
temp2.LikesHumans = false;
Bunny b2 = temp2;
```

Временные переменные предназначены для гарантии того, что если в течение инициализации произойдет исключение, то вы в итоге не получите наполовину инициализированный объект.

Сравнение инициализаторов объектов и необязательных параметров

Вместо того чтобы полагаться на инициализаторы объектов, конструктор класса Bunny можно было бы реализовать с одним обязательным и двумя необязательными параметрами, как показано ниже:

```
public Bunny (string name,
              bool likesCarrots = false,
              bool likesHumans = false)
{
    Name = name;
    LikesCarrots = likesCarrots;
    LikesHumans = likesHumans;
}
```

Тогда у нас появилась бы возможность конструировать экземпляр Bunny следующим образом:

```
Bunny b1 = new Bunny (name: "Bo",
                      likesCarrots: true);
```

Исторически применение конструкторов для инициализации объектов мог обеспечивать преимущество, которое заключалось в том, что при желании поля класса Bunny (или *свойства*, как вскоре будет объяснено) можно было бы сделать доступными только для чтения. Превращать поля или свойства в допускающие только чтение рекомендуется тогда, когда нет законного основания для их изменения в течение времени жизни объекта. Тем не менее, как будет показано далее при обсуждении свойств, модификатор `init`, появившийся в версии C# 9, позволяет достичь той же цели с помощью инициализаторов объектов.

Необязательные параметры обладают двумя недостатками. Первый недостаток связан с тем, что хотя использование необязательных параметров делает возможными типы только для чтения, легко реализовать *неразрушающее изменение* с их помощью не удастся. (Неразрушающее изменение и решение этой проблемы будут раскрыты в разделе “Записи” главы 4.)

Второй недостаток необязательных параметров заключается в том, что в случае применения в открытых библиотеках они препятствуют обратной совместимости. Причина в том, что добавление необязательного параметра в более позднее время нарушает *двоичную совместимость* сборки с существующими потребителями. (Это особенно важно при опубликовании библиотеки как пакета NuGet: проблема становится трудной для решения, когда потребитель ссылается на пакеты A и B, а каждый из них зависит от несовместимых версий пакета L.)

Трудность в том, что значение каждого необязательного параметра внедряется в *место вызова*.

Другими словами, компилятор C# транслирует показанный выше вызов конструктора в такой код:

```
Bunny b1 = new Bunny ("Bo", true, false);
```

Проблема возникает, когда мы создаем экземпляр класса Bunny из другой сборки и позже модифицируем этот класс, добавив еще один необязательный параметр (скажем, likesCats). Если не перекомпилировать ссылающуюся сборку, то она продолжит вызывать (уже несуществующий) конструктор с тремя параметрами, приводя к ошибке во время выполнения. (Более тонкая проблема связана с тем, что даже когда мы изменяем значение одного из необязательных параметров, вызывающий код в других сборках продолжит пользоваться старым необязательным значением до тех пор, пока эти сборки не будут перекомпилированы.)

И последнее соображение касается влияния конструкторов на создание подклассов (которое будет обсуждаться в разделе “Наследование” далее в главе). Наличие нескольких конструкторов с длинными списками параметров делает создание подклассов громоздким; следовательно, это может помочь свести к минимуму количество и сложность конструкторов и применять инициализаторы объектов для заполнения деталей.

Ссылка `this`

Ссылка `this` указывает на сам экземпляр. В следующем примере метод Marry применяет ссылку `this` для установки поля Mate экземпляра partner:

```
public class Panda
{
    public Panda Mate;
    public void Marry (Panda partner)
    {
        Mate = partner;
        partner.Mate = this;
    }
}
```

Ссылка `this` также устраняет неоднозначность между локальной переменной или параметром и полем, например:

```
public class Test
{
    string name;
    public Test (string name) { this.name = name; }
}
```

Использование ссылки `this` допускается только внутри нестатических членов класса или структуры.

Свойства

Снаружи свойства выглядят похожими на поля, но подобно методам внутренне они содержат логику. Скажем, взглянув на следующий код, невозможно сказать, чем является `CurrentPrice` — полем или свойством:

```
Stock msft = new Stock();
msft.CurrentPrice = 30;
msft.CurrentPrice -= 3;
Console.WriteLine (msft.CurrentPrice);
```

Свойство объявляется как поле, но с добавлением блока `get/set`. Реализовать `CurrentPrice` в виде свойства можно так:

```
public class Stock
{
    decimal currentPrice; // Закрытое "поддерживающее" поле
    public decimal CurrentPrice // Открытое свойство
    {
        get { return currentPrice; }
        set { currentPrice = value; }
    }
}
```

С помощью `get` и `set` обозначаются *средства доступа* к свойству. Средство доступа `get` запускается при чтении свойства. Оно должно возвращать значение, имеющее тип как у самого свойства. Средство доступа `set` выполняется во время присваивания свойству значения. Оно принимает неявный параметр по имени `value` с типом свойства, который обычно присваивается какому-то закрытому полю (в данном случае `currentPrice`).

Хотя доступ к свойствам осуществляется таким же способом, как к полям, свойства отличаются тем, что предоставляют программисту полный контроль над получением и установкой их значений. Такой контроль позволяет программисту выбрать любое необходимое внутреннее представление, не раскрывая внутренние детали потребителю свойства. В приведенном примере метод `set` мог бы генерировать исключение, если значение `value` выходит за пределы допустимого диапазона.



В настоящей книге повсеместно применяются открытые поля, чтобы излишне не усложнять примеры и не отвлекать от их сути. В реальном приложении для содействия инкапсуляции предпочтение обычно отдается открытым свойствам, а не открытым полям.

Со свойствами разрешено применять следующие модификаторы.

Статический модификатор

`static`

Модификаторы доступа

`public internal private protected`

Модификаторы наследования

`new virtual abstract override sealed`

Модификаторы неуправляемого кода

`unsafe extern`

Свойства только для чтения и вычисляемые свойства

Свойство разрешает только чтение, если для него указано лишь средство доступа `get`, и только запись, если определено лишь средство доступа `set`. Свойства только для записи используются редко.

Свойство обычно имеет отдельное поддерживающее поле, предназначенное для хранения внутренних данных. Тем не менее, свойство может также возвращать значение, вычисленное на основе других данных:

```
decimal currentPrice, sharesOwned;  
public decimal Worth  
{  
    get { return currentPrice * sharesOwned; }  
}
```

Свойства, сжатые до выражений

Свойство только для чтения вроде показанного в предыдущем примере можно объявлять более кратко в виде *свойства, сжатого до выражения*. Фигурные скобки и ключевые слова *get* и *return* заменяются комбинацией *=>*:

```
public decimal Worth => currentPrice * sharesOwned;
```

С помощью небольшого дополнительного синтаксиса средства доступа *set* также можно объявлять как сжатые до выражения:

```
public decimal Worth  
{  
    get => currentPrice * sharesOwned;  
    set => sharesOwned = value / currentPrice;  
}
```

Автоматические свойства

Наиболее распространенная реализация свойства предусматривает наличие средств доступа *get* и/или *set*, которые просто читают и записывают в закрытое поле того же типа, что и свойство. Объявление *автоматического свойства* указывает компилятору на необходимость предоставления такой реализации. Первый пример в этом разделе можно усовершенствовать, объявив *CurrentPrice* как автоматическое свойство:

```
public class Stock  
{  
    ...  
    public decimal CurrentPrice { get; set; }  
}
```

Компилятор автоматически создает закрытое поддерживающее поле со специальным сгенерированным именем, ссылаясь на которое невозможно. Средство доступа *set* может быть помечено как *private* или *protected*, если свойство должно быть доступно только для чтения другим типам. Автоматические свойства появились в версии C# 3.0.

Инициализаторы свойств

Как и поля, автоматические свойства можно снабжать инициализаторами свойств:

```
public decimal CurrentPrice { get; set; } = 123;
```

В результате свойство CurrentPrice получает начальное значение 123. Свойства с инициализаторами могут допускать только чтение:

```
public int Maximum { get; } = 999;
```

Подобно полям, предназначенным только для чтения, автоматические свойства, допускающие только чтение, могут устанавливаться также в конструкторе типа, что удобно при создании *неизменяемых* (только для чтения) типов.

Доступность `get` и `set`

Средства доступа `get` и `set` могут иметь разные уровни доступа. В типичном сценарии применения есть свойство `public` с модификатором доступа `internal` или `private`, указанным для средства доступа `set`:

```
public class Foo
{
    private decimal x;
    public decimal X
    {
        get { return x; }
        private set { x = Math.Round (value, 2); }
    }
}
```

Обратите внимание, что само свойство объявлено с более либеральным уровнем доступа (`public` в данном случае), а к средству доступа, которое должно быть *менее доступным*, добавлен соответствующий модификатор.

Средства доступа только для инициализации

Начиная с версии C# 9, средство доступа к свойству можно объявлять как `init`, а не `set`:

```
public class Note
{
    public int Pitch { get; init; } = 20; // Средство доступа только
                                              // для инициализации
    public int Duration { get; init; } = 100; // Средство доступа только
                                              // для инициализации
}
```

Такие средства доступа *только для инициализации* действуют как свойства только для чтения за исключением того, что их можно также устанавливать через инициализатор объекта:

```
var note = new Note { Pitch = 50 };
```

После этого свойство не может быть изменено:

```
note.Pitch = 200; // Ошибка - средство доступа только для инициализации!
```

Свойство, допускающее только инициализацию, нельзя устанавливать даже изнутри класса, в котором оно определено, кроме как через его инициализатор свойства, конструктор или еще одно средство доступа только для инициализации.

В качестве альтернативы свойствам, допускающим только инициализацию, будет наличие свойств только для чтения, которые заполняются через конструктор:

```
public class Note
{
    public int Pitch { get; }
    public int Duration { get; }

    public Note (int pitch = 20, int duration = 100)
    {
        Pitch = pitch; Duration = duration;
    }
}
```

Когда класс должен быть частью открытой библиотеки, такой подход затрудняет ведение версий, поскольку добавление к конструктору необязательного параметра в более позднее время нарушит двоичную совместимость с потребителями (тогда как добавление нового свойства только для инициализации ничего не нарушает).



Свойства, допускающие только инициализацию, обладают еще одним существенным преимуществом, которое заключается в том, что они делают возможным неразрушающее изменение при использовании в сочетании с записями (см. раздел “Записи” в главе 4).

Как и обычные средства доступа `set`, средства доступа только для инициализации могут также предоставлять реализацию:

```
public class Note
{
    readonly int _pitch;
    public int Pitch { get => _pitch; init => _pitch = value; }
    ...
}
```

Обратите внимание, что поле `_pitch` предназначено только для чтения: средства доступа только для инициализации разрешают модифицировать поля `readonly` в собственных классах. (Без такой возможности поле `_pitch` должно было бы быть переменной, а класс не мог бы стать внутренне неизменяемым.)



Изменение средства доступа свойства с `init` на `set` (или наоборот) является *критическим двоичным изменением*: любому, кто ссылается на вашу сборку, придется перекомпилировать свою сборку.

Это не должно стать проблемой при создании полностью неизменяемых типов, т.к. вашему типу никогда не потребуются свойства с (записываемым) средством доступа `set`.

Реализация свойств в CLR

Средства доступа к свойствам C# внутренне компилируются в методы с именами `get_XXX` и `set_XXX`:

```
public decimal get_CurrentPrice {...}
public void set_CurrentPrice (decimal value) {...}
```

Средство доступа `init` обрабатывается подобно `set`, но с дополнительным флагом, который закодирован в метаданных “обязательного модификатора”

(modreq), связанных со средством доступа set (см. раздел “Свойства, допускающие только инициализацию” в главе 18).

Простые невиртуальные средства доступа к свойствам *встраиваются* компилятором JIT, устранивая любую разницу в производительности между доступом к свойству и доступом к полю. Встраивание представляет собой разновидность оптимизации, при которой вызов метода заменяется телом этого метода.

Индексаторы

Индексаторы обеспечивают естественный синтаксис для доступа к элементам в классе или структуре, которая инкапсулирует список либо словарь значений. Индексаторы похожи на свойства, но предусматривают доступ через аргумент индекса, а не через имя свойства. Класс `string` имеет индексатор, который позволяет получать доступ к каждому его значению `char` посредством индекса `int`:

```
string s = "hello";
Console.WriteLine (s[0]);      // 'h'
Console.WriteLine (s[3]);      // 'l'
```

Синтаксис использования индексаторов похож на синтаксис работы с массивами за исключением того, что аргумент (аргументы) индекса может быть любого типа (типов).

Индексаторы имеют те же модификаторы, что и свойства (см. раздел “Свойства” ранее в главе), и могут вызываться null-условным образом за счет помещения вопросительного знака перед открывающей квадратной скобкой (см. раздел “Операции для работы со значениями null” в главе 2):

```
string s = null;
Console.WriteLine (s?[0]);     // Ничего не выводится; ошибка не возникает
```

Реализация индексатора

Чтобы реализовать индексатор, понадобится определить свойство по имени `this`, указав аргументы в квадратных скобках:

```
class Sentence
{
    string[] words = "The quick brown fox".Split();
    public string this [int wordNum]      // индексатор
    {
        get { return words [wordNum]; }
        set { words [wordNum] = value; }
    }
}
```

Вот как можно было бы применять такой индексатор:

```
Sentence s = new Sentence();
Console.WriteLine (s[3]);           // fox
s[3] = "kangaroo";
Console.WriteLine (s[3]);           // kangaroo
```

В типе разрешено объявлять несколько индексаторов, каждый с параметрами разных типов. Индексатор также может принимать более одного параметра:

```
public string this [int arg1, string arg2]
{
    get { ... }
    set { ... }
}
```

Если опустить средство доступа `set`, то индексатор станет предназначенным только для чтения, к тому же его определение можно сократить с помощью синтаксиса, сжатого до выражения:

```
public string this [int wordNum] => words [wordNum];
```

Реализация индексаторов в CLR

Индексаторы внутренне компилируются в методы с именами `get_Item` и `set_Item`, как показано ниже:

```
public string get_Item (int wordNum) {...}
public void set_Item (int wordNum, string value) {...}
```

Использование индексов и диапазонов посредством индексаторов

Вы можете поддерживать индексы и диапазоны (см. раздел “Индексы и диапазоны” в главе 2) в собственных классах за счет определения индексатора с параметром типа `Index` или `Range`. Мы можем расширить предыдущий пример, добавив в класс `Sentence` следующие индексаторы:

```
public string this [Index index] => words [index];
public string[] this [Range range] => words [range];
```

В результате появится возможность записывать такой код:

```
Sentence s = new Sentence();
Console.WriteLine (s [^1]); // fox
string[] firstTwoWords = s [..2]; // (The, quick)
```

Основные конструкторы (C# 12)

Начиная с версии C# 12, можно помещать список параметров непосредственно после объявления класса (или структуры):

```
class Person (string firstName, string lastName)
{
    public void Print() => Console.WriteLine (firstName + " " + lastName);
}
```

Тем самым компилятору сообщается о том, что необходимо построить *основной конструктор* (primary constructor) с использованием *параметров основного конструктора* (`firstName` и `lastName`), поэтому создавать экземпляр класса можно следующим образом:

```
Person p = new Person ("Alice", "Jones");
p.Print(); // Alice Jones
```

Основные конструкторы полезны при прототипировании и в других простых сценариях. Альтернативой было бы определение полей и явное написание конструктора:

```
class Person // (без основных конструкторов)
{
    string firstName, lastName; // Объявления полей
    public Person (string firstName, string lastName) // Конструктор
    {
        this.firstName = firstName; // Присвоить значение полю
        this.lastName = lastName; // Присвоить значение полю
    }
    public void Print() => Console.WriteLine (firstName + " " + lastName);
}
```

Конструктор, создаваемый компилятором C#, называется основным, поскольку любые дополнительные конструкторы, которые вы решите (явно) написать, должны вызывать его:

```
class Person (string firstName, string lastName)
{
    public Person (string firstName, string lastName, int age)
        : this (firstName, lastName) // Должен вызывать основной конструктор
    {
        ...
    }
}
```

Это гарантирует, что параметры основного конструктора *всегда заполняются*.



В C# также предоставляются *записи*, которые рассматриваются в разделе “Записи” главы 4. Записи тоже поддерживают основные конструкторы, но компилятор выполняет дополнительный шаг с записями и генерирует (по умолчанию) открытое свойство только для инициализации для каждого параметра основного конструктора. Если такое поведение желательно, тогда рассмотрите возможность использования записей вместо классов.

Основные конструкторы лучше всего подходят для простых сценариев из-за следующих ограничений:

- добавить дополнительный код инициализации в основной конструктор невозможно;
- хотя параметр основного конструктора легко представить как открытое свойство, встроить логику проверки достоверности не так легко, если только свойство не доступно только для чтения.

Основные конструкторы заменяют стандартный конструктор без параметров, который в противном случае сгенерировал бы компилятор C#.

Семантика основных конструкторов

Чтобы понять, как работают основные конструкторы, давайте выясним, каким образом ведет себя обычный конструктор:

```
class Person
{
    public Person (string firstName, string lastName)
    {
        ... делать что-нибудь с firstName и lastName
    }
}
```

Когда код внутри этого конструктора завершает выполнение, параметры `firstName` и `lastName` покидают область видимости и впоследствии становятся недоступными. Напротив, параметры основного конструктора не исчезают из области видимости и позже могут быть доступными в любом месте внутри класса на протяжении всего срока существования объекта.



Параметры основного конструктора — это специальные конструкции C#, а не поля, хотя в конечном итоге компилятор при необходимости генерирует скрытые поля для хранения их значений.

Основные конструкторы и инициализаторы полей/свойств

Доступность параметров основного конструктора распространяется на инициализаторы полей и свойств. В следующем примере инициализаторы полей и свойств применяются для присваивания `firstName` открытому полю, а `lastName` — открытому свойству:

```
class Person (string firstName, string lastName)
{
    public readonly string FirstName = firstName;           // Поле
    public string LastName { get; } = lastName;                // Свойство
}
```

Маскирование параметров основного конструктора

Поля (или свойства) могут повторно использовать имена параметров основного конструктора:

```
class Person (string firstName, string lastName)
{
    readonly string firstName = firstName;
    readonly string lastName = lastName;
    public void Print() => Console.WriteLine (firstName + " " + lastName);
}
```

В этом сценарии поле или свойство имеет приоритет, маскируя параметр основного конструктора, за исключением правой части инициализаторов полей и свойств (выделены полужирным).



Подобно обычным параметрам параметры основного конструктора допускают запись. Маскирование их одноименным полем только для чтения (как в приведенном примере) эффективно защищает их от последующей модификации.

Проверка достоверности параметров основного конструктора

Иногда полезно выполнять вычисления в инициализаторах полей:

```
new Person ("Alice", "Jones").Print(); // Alice Jones
class Person (string firstName, string lastName)
{
    public readonly string FullName = firstName + " " + lastName;
    public void Print() => Console.WriteLine (FullName);
}
```

В следующем примере версия lastName в верхнем регистре сохраняется в поле с тем же самым именем (маскируя исходное значение):

```
new Person ("Alice", "Jones").Print(); // Alice JONES
class Person (string firstName, string lastName)
{
    readonly string lastName = lastName.ToUpper();
    public void Print() => Console.WriteLine (firstName + " " + lastName);
}
```

В разделе “Выражения throw” главы 4 будет описано, как генерировать исключения при возникновении таких сценариев, как недопустимые данные. Ниже иллюстрируется, каким образом это можно использовать с основными конструкторами для проверки lastName при создании, гарантуя тем самым, что оно не может быть null:

```
new Person ("Alice", null); // генерирует исключение ArgumentNullException
class Person (string firstName, string lastName)
{
    readonly string lastName = (lastName == null)
    ? throw new ArgumentNullException ("lastName")
    : lastName;
}
```

(Не забывайте, что код в инициализаторе поля или свойства выполняется при создании объекта, а не при доступе к полю или свойству.) В следующем примере параметр основного конструктора предоставляется в виде свойства для чтения и записи:

```
class Person (string firstName, string lastName)
{
    public string LastName { get; set; } = lastName;
}
```

Добавить проверку достоверности в этот пример не так-то просто, поскольку проверять приходится в двух местах: в методе доступа set свойства (реализованном вручную) и в инициализаторе свойства. (Та же проблема возникает, если свойство определено как предназначено только для инициализации.) На данном этапе проще отказаться от основных конструкторов и явно определять конструктор вместе с поддерживающими полями.

Статические конструкторы

Статический конструктор выполняется однократно для *типа*, а не однократно для *экземпляра*. В типе может быть определен только один статический конструктор, он не должен принимать параметры, а также обязан иметь то же имя, что и тип:

```
class Test
{
    static Test() { Console.WriteLine ("Type Initialized"); }
}
```

Исполняющая среда автоматически вызывает статический конструктор прямо перед тем, как тип начинает применяться. Вызов инициируется двумя действиями:

- создание экземпляра типа;
- доступ к статическому члену типа.

Для статических конструкторов разрешены только модификаторы `unsafe` и `extern`.



Если статический конструктор генерирует необработанное исключение (см. главу 4), то тип, к которому он относится, становится *непригодным* в жизненном цикле приложения.



Начиная с версии C# 9, можно определять также *инициализатор модуля*, который выполняется один раз для сборки (при ее первой загрузке). Чтобы определить инициализатор модуля, напишите статический метод `void` и примените к нему атрибут `[ModuleInitializer]`:

```
[System.Runtime.CompilerServices.ModuleInitializer]
internal static void InitAssembly()
{
    ...
}
```

Статические конструкторы и порядок инициализации полей

Инициализаторы статических полей запускаются непосредственно *перед* вызовом статического конструктора. Если тип не имеет статического конструктора, тогда инициализаторы полей будут выполнятся до того, как тип начнет использоваться — или *в любой момент раньше* по прихоти исполняющей среды.

Инициализаторы статических полей выполняются в порядке объявления полей, что демонстрируется в следующем примере, где поле X инициализируется значением 0, а поле Y — значением 3:

```
class Foo
{
    public static int X = Y;          // 0
    public static int Y = 3;           // 3
}
```

Если поменять местами эти два инициализатора полей, то оба поля будут инициализированы значением 3. В показанном ниже примере на экран выводится 0, а затем 3, потому что инициализатор поля, в котором создается экземпляр Foo, выполняется до того, как поле X инициализируется значением 3:

```
Console.WriteLine (Foo.X);           // 3
class Foo
{
    public static Foo Instance = new Foo();
    public static int X = 3;
    Foo() => Console.WriteLine (X);      // 0
}
```

Если поменять местами строки кода, выделенные полужирным, тогда на экран будет выводиться 3 и затем снова 3.

Статические классы

Класс, помеченный как `static`, не допускает создание экземпляров или подклассов и должен состоять исключительно из статических членов. Хорошими примерами статических классов могут служить `System.Console` и `System.Math`.

Финализаторы

Финализаторы представляют собой методы, предназначенные только для классов, которые выполняются до того, как сборщик мусора освободит память, занятую объектом с отсутствующими ссылками на него. Синтаксически финализатор записывается как имя класса, предваренное символом `~`:

```
class Class1
{
    ~Class1()
    {
        ...
    }
}
```

В действительности это синтаксис C# для переопределения метода `Finalize` класса `Object`, и компилятор развертывает его в следующее объявление метода:

```
protected override void Finalize()
{
    ...
    base.Finalize();
}
```

Сборка мусора и финализаторы подробно обсуждаются в главе 12. Финализаторы допускают применение следующего модификатора.

Модификатор неуправляемого кода `unsafe`

Финализаторы, состоящие из единственного оператора, могут быть записаны с помощью синтаксиса сжатия до выражения:

```
~Class1() => Console.WriteLine ("Finalizing");
```

Частичные типы и методы

Частичные типы позволяют расщеплять определение типа обычно с разнесением его по нескольким файлам. Распространенный сценарий предполагает автоматическую генерацию частичного класса из какого-то другого источника (например, шаблона или визуального конструктора Visual Studio) и последующее его дополнение методами, написанными вручную:

```
// PaymentFormGen.cs - сгенерирован автоматически
partial class PaymentForm { ... }

// PaymentForm.cs - написан вручную
partial class PaymentForm { ... }
```

Каждый участник должен иметь объявление `partial`; показанный ниже код не является допустимым:

```
partial class PaymentForm {}
class PaymentForm {}
```

Участники не могут содержать конфликтующие члены. Скажем, конструктор с теми же самыми параметрами повторять нельзя. Частичные типы распознаются полностью компилятором, а это значит, что каждый участник типа должен быть доступным на этапе компиляции и располагаться в той же сборке.

Базовый класс может быть задан для единственного участника или для множества участников (при условии, что для каждого из них базовый класс будет тем же самым). Кроме того, для каждого участника можно независимо указывать интерфейсы, подлежащие реализации. Базовые классы и интерфейсы рассматриваются в разделах “Наследование” и “Интерфейсы” далее в главе.

Компилятор не гарантирует какого-то определенного порядка инициализации полей в рамках объявлений частичных типов.

Частичные методы

Частичный тип может содержать *частичные методы*. Они позволяют автоматически сгенерированному частичному типу предоставлять настраиваемые точки привязки для ручного написания кода, например:

```
partial class PaymentForm      // В автоматически сгенерированном файле
{
    ...
    partial void ValidatePayment (decimal amount);
}

partial class PaymentForm      // В написанном вручную файле
{
    ...
    partial void ValidatePayment (decimal amount)
    {
        if (amount > 100)
        ...
    }
}
```

Частичный метод состоит из двух частей: *определения* и *реализации*. Определение обычно записывается генератором кода, а реализация — вручную. Если реализация не предоставлена, тогда определение частичного метода при компиляции удаляется (вместе с кодом, где он вызывается). Это обеспечивает автоматически сгенерированному коду свободу в предоставлении точек привязки, не заставляя беспокоиться по поводу эффекта разбухания кода. Частичные методы должны иметь возвращаемый тип `void` и неявно являются `private`. Они не могут включать параметры `out`.

Расширенные частичные методы

Расширенные частичные методы (появившиеся в C# 9) предназначены для сценария обратной генерации кода, где программист определяет привязки, которые реализует генератор кода. Примером того, когда это происходит, могут служить генераторы исходного кода — средство Roslyn, позволяющее передать компилятору сборку, которая автоматически генерирует порции вашего кода.

Объявление частичного метода является *расширенным*, если оно начинается с модификатора доступности:

```
public partial class Test
{
    public partial void M1();           // Расширенный частичный метод
    private partial void M2();          // Расширенный частичный метод
}
```

Наличие модификатора доступности влияет не только на доступность, но заставляет компилятор трактовать объявление по-другому.

Расширенные частичные методы *обязаны* иметь реализации; они не исчезают, если не реализованы. В приведенном выше примере методы `M1` и `M2` должны иметь реализации, т.к. для каждого указаны модификаторы доступности (`public` и `private`).

Поскольку расширенные частичные методы не могут исчезнуть, они способны возвращать любой тип и включать параметры `out`:

```
public partial class Test
{
    public partial bool IsValid (string identifier);
    internal partial bool TryParse (string number, out int result);
}
```

Операция `nameof`

Операция `nameof` возвращает имя любого символа (типа, члена, переменной и т.д.) в виде строки:

```
int count = 123;
string name = nameof (count);      // name получает значение "count"
```

Преимущество использования операции `nameof` по сравнению с простым указанием строки связано со статической проверкой типов. Инструменты, подобные Visual Studio, способны воспринимать символические ссылки, поэтому переименование любого символа приводит к переименованию также всех ссылок на него.

Для указания имени члена типа, такого как поле или свойство, необходимо включать тип члена. Прием работает со статическими членами и членами экземпляра:

```
string name = nameof (StringBuilder.Length);
```

Результатом будет "Length". Чтобы возвратить "StringBuilder.Length", понадобится следующее выражение:

```
nameof(StringBuilder)+"."+nameof(StringBuilder.Length);
```

Наследование

Класс может быть *унаследован* от другого класса с целью расширения или настройки первоначального класса. Наследование от класса позволяет повторно использовать функциональность данного класса вместо ее построения с нуля. Класс может наследоваться только от одного класса, но сам может быть унаследован множеством классов, формируя иерархию классов. В текущем примере мы начнем с определения класса по имени Asset:

```
public class Asset
{
    public string Name;
}
```

Далее мы определяем классы Stock и House, которые будут унаследованы от Asset. Классы Stock и House получат все, что имеет Asset, плюс любые дополнительные члены, которые в них будут определены:

```
public class Stock : Asset                                // унаследован от Asset
{
    public long SharesOwned;
}

public class House : Asset                               // унаследован от Asset
{
    public decimal Mortgage;
}
```

Вот как можно работать с данными классами:

```
Stock msft = new Stock { Name="MSFT",
                         SharesOwned=1000 };
Console.WriteLine (msft.Name);                      // MSFT
Console.WriteLine (msft.SharesOwned);                // 1000

House mansion = new House { Name="Mansion",
                           Mortgage=250000 };
Console.WriteLine (mansion.Name);                   // Mansion
Console.WriteLine (mansion.Mortgage);               // 250000
```

Производные классы Stock и House наследуют поле Name от базового класса Asset.



Производный класс также называют *подклассом*.

Базовый класс также называют *суперклассом*.

Полиморфизм

Ссылки *полиморфны*, т.е. переменная типа `x` может ссылаться на объект подкласса `x`. Например, рассмотрим следующий метод:

```
public static void Display (Asset asset)
{
    System.Console.WriteLine (asset.Name);
}
```

Метод `Display` способен отображать значение свойства `Name` объектов `Stock` и `House`, т.к. они оба являются `Asset`:

```
Stock msft      = new Stock ... ;
House mansion = new House ... ;

Display (msft);
Display (mansion);
```

В основе работы полиморфизма лежит тот факт, что подклассы (`Stock` и `House`) обладают всеми характеристиками своего базового класса (`Asset`). Однако обратное утверждение не будет верным. Если метод `Display` переписать так, чтобы он принимал `House`, то передавать ему `Asset` нельзя:

```
Display (new Asset());                                // Ошибка на этапе компиляции
public static void Display (House house)           // Asset приниматься не будет
{
    System.Console.WriteLine (house.Mortgage);
}
```

Приведение и ссылочные преобразования

Ссылка на объект может быть:

- неявно *приведена вверх* к ссылке на базовый класс;
- явно *приведена вниз* к ссылке на подкласс.

Приведение вверх и вниз между совместимыми ссылочными типами выполняет *ссылочное преобразование*: создается новая ссылка, которая указывает на *тот же самый* объект. Приведение вверх всегда успешно; приведение вниз успешно только в случае, когда объект надлежащим образом типизирован.

Приведение вверх

Операция приведения вверх создает ссылку на базовый класс из ссылки на подкласс. Например:

```
Stock msft = new Stock();
Asset a = msft;                                     // Приведение вверх
```

После приведения вверх переменная `a` по-прежнему ссылается на тот же самый объект `Stock`, что и переменная `msft`. Сам объект, на который имеются ссылки, не изменяется и не преобразуется:

```
Console.WriteLine (a == msft);                      // True
```

Несмотря на то что переменные `a` и `msft` ссылаются на один и тот же объект, переменная `a` обеспечивает более ограниченное представление этого объекта:

```
Console.WriteLine (a.Name);           // Нормально
Console.WriteLine (a.SharesOwned);     // Ошибка на этапе компиляции
```

Последняя строка кода вызывает ошибку на этапе компиляции, поскольку переменная `a` имеет тип `Asset`, хотя она ссылается на объект типа `Stock`. Чтобы получить доступ к полю `SharesOwned`, экземпляр `Asset` потребуется привести вниз к `Stock`.

Приведение вниз

Операция приведения вниз создает ссылку на подкласс из ссылки на базовый класс:

```
Stock msft = new Stock();
Asset a = msft;                      // Приведение вверх
Stock s = (Stock)a;                  // Приведение вниз
Console.WriteLine (s.SharesOwned);    // Ошибка не возникает
Console.WriteLine (s == a);           // True
Console.WriteLine (s == msft);         // True
```

Как и в случае приведения вверх, затрагиваются только ссылки, но не лежащий в основе объект. Приведение вниз должно указываться явно, потому что потенциально оно может не достичь успеха во время выполнения:

```
House h = new House();
Asset a = h;                          // Приведение вверх всегда успешно
Stock s = (Stock)a;                  // Ошибка приведения вниз: a не является Stock
```

Когда приведение вниз терпит неудачу, генерируется исключение `InvalidCastException`. Это пример того, как работает проверка типов во время выполнения, которая более подробно рассматривается в разделе “Статическая проверка типов и проверка типов во время выполнения” далее в главе.

Операция `as`

Операция `as` выполняет приведение вниз, которое в случае неудачи вычисляется как `null` (вместо генерации исключения):

```
Asset a = new Asset();
Stock s = a as Stock;                // s равно null; исключение не генерируется
```

Операция удобна, когда нужно организовать последующую проверку результата на предмет `null`:

```
if (s != null) Console.WriteLine (s.SharesOwned);
```



В отсутствие проверки подобного рода приведение удобно тем, что в случае его неудачи генерируется более полезное исключение. Мы можем проиллюстрировать сказанное, сравнив следующие две строки кода:

```
long shares = ((Stock)a).SharesOwned; // Подход #1
long shares = (a as Stock).SharesOwned; // Подход #2
```

Если `a` не является `Stock`, тогда первая строка кода сгенерирует исключение `InvalidCastException`, которое обеспечит точное описание того, что пошло не так. Вторая строка кода сгенерирует исключение `NullReferenceException`, которое не даст однозначного ответа на вопрос, была ли переменная `a` не `Stock` или же просто `a` была равна `null`.

На описанную ситуацию можно взглянуть и по-другому: посредством операции приведения вы сообщаете компилятору о том, что *уверены* в типе заданного значения; если это не так, тогда в коде присутствует ошибка, а потому нужно сгенерировать исключение. С другой стороны, в случае операции `as` вы *не уверены* в типе значения и хотите организовать ветвление в соответствии с результатом во время выполнения.

Операция `as` не может выполнять *специальные преобразования* (см. раздел “Перегрузка операций” в главе 4), равно как и числовые преобразования:

```
long x = 3 as long; // Ошибка на этапе компиляции
```



Операция `as` и операции приведения также будут выполнять приведения вверх, хотя это не особенно полезно, поскольку всю необходимую работу делает неявное преобразование.

Операция `is`

Операция `is` проверяет, соответствует ли переменная указанному шаблону. В C# поддерживается несколько видов шаблонов, наиболее важным из которых считается *шаблон типа*, где за ключевым словом `is` следует имя типа.

В таком контексте операция `is` проверяет, будет ли преобразование ссылки успешным — другими словами, является ли объект производным от указанного класса (или реализует ли он какой-то интерфейс). Операция `is` часто применяется для выполнения проверки перед приведением вниз:

```
if (a is Stock)
    Console.WriteLine (((Stock)a).SharesOwned);
```

Операция `is` также дает в результате `true`, если может успешно выполниться *распаковывающее преобразование* (см. раздел “Тип `object`” далее в главе). Тем не менее, она не принимает во внимание специальные или числовые преобразования.



Операция `is` работает со многими другими видами шаблонов, которые появились в последних версиях C#. За полным обсуждением обращайтесь в раздел “Шаблоны” главы 4.

Введение шаблонной переменной

Во время использования операции `is` можно вводить переменную:

```
if (a is Stock s)
    Console.WriteLine (s.SharesOwned);
```

Такой код эквивалентен следующему коду:

```
Stock s;
if (a is Stock)
{
    s = (Stock) a;
    Console.WriteLine (s.SharesOwned);
}
```

Введенная переменная доступна для “немедленного” потребления, поэтому показанный ниже код законен:

```
if (a is Stock s && s.SharesOwned > 100000)
    Console.WriteLine ("Wealthy");
```

И она остается в области видимости за пределами выражения `is`, давая возможность записывать так:

```
if (a is Stock s && s.SharesOwned > 100000)
    Console.WriteLine ("Wealthy");
else
    s = new Stock();           // s в области видимости
Console.WriteLine (s.SharesOwned); // s все еще в области видимости
```

Виртуальные функции-члены

Функция, помеченная как **виртуальная** (`virtual`), может быть *переопределена* в подклассах, где требуется предоставление ее специализированной реализации. Объявлять виртуальными можно методы, свойства, индексаторы и события:

```
public class Asset
{
    public string Name;
    public virtual decimal Liability => 0; // Свойство, сжатое до выражения
}
```

(Конструкция `Liability => 0` является сокращенной записью для `{ get { return 0; } }`. Дополнительные сведения о таком синтаксисе ищите в разделе “Свойства, сжатые до выражений” ранее в главе.)

Виртуальный метод переопределяется в подклассе с применением модификатора `override`:

```
public class Stock : Asset
{
    public long SharesOwned;
}
public class House : Asset
{
    public decimal Mortgage;
    public override decimal Liability => Mortgage;
}
```

По умолчанию свойство `Liability` класса `Asset` возвращает 0. Класс `Stock` не нуждается в специализации данного поведения. Однако класс `House` специализирует свойство `Liability`, чтобы возвращать значение `Mortgage`:

```
House mansion = new House { Name="McMansion", Mortgage=250000 };
Asset a = mansion;
Console.WriteLine (mansion.Liability);           // 250000
Console.WriteLine (a.Liability);                 // 250000
```

Сигнатуры, возвращаемые типы и доступность виртуального и переопределенного методов должны быть идентичными. Внутри переопределенного метода можно вызывать его реализацию из базового класса с помощью ключевого слова `base` (см. раздел “Ключевое слово `base`” далее в главе).



Вызов виртуальных методов внутри конструктора потенциально опасен, т.к. авторы подклассов при переопределении метода вряд ли знают о том, что работают с частично инициализированным объектом. Другими словами, переопределяемый метод может в итоге обращаться к методам или свойствам, зависящим от полей, которые пока еще не инициализированы конструктором.

Ковариантные возвращаемые типы

Начиная с версии C# 9, метод (или средство доступа `get` свойства) можно переопределять так, чтобы он возвращал *более производный* тип (более глубокий подкласс). Например:

```
public class Asset
{
    public string Name;
    public virtual Asset Clone() => new Asset { Name = Name };
}

public class House : Asset
{
    public decimal Mortgage;
    public override House Clone() => new House
        { Name = Name, Mortgage = Mortgage };
}
```

Поступать подобным образом разрешено, поскольку это не нарушает контракт о том, что метод `Clone` обязан возвращать экземпляр `Asset`: он возвращает экземпляр `House`, который *является* `Asset` (и многим другим).

До выхода версии C# 9 метод приходилось переопределять с идентичным возвращаемым типом:

```
public override Asset Clone() => new House { ... }
```

Подход по-прежнему работает, т.к. переопределенный метод `Clone` создает экземпляр `House`, а не `Asset`. Тем не менее, чтобы трактовать возвращенный объект как `House`, потребуется выполнить приведение вниз:

```
House mansion1 = new House { Name="McMansion", Mortgage=250000 };
House mansion2 = (House) mansion1.Clone();
```

Абстрактные классы и абстрактные члены

Экземпляры класса, объявленного как `abstract` (*абстрактный*), создавать не разрешено. Взамен можно создавать только экземпляры его конкретных подклассов. В абстрактных классах имеется возможность определять *абстрактные члены*. Абстрактные члены похожи на виртуальные члены за исключением того, что они не предоставляют стандартные реализации. Реализация должна обеспечиваться подклассом, если только подкласс тоже не объявлен как `abstract`:

```
public abstract class Asset
{
    // Обратите внимание на пустую реализацию
    public abstract decimal NetValue { get; }

    public class Stock : Asset
    {
        public long SharesOwned;
        public decimal CurrentPrice;
        // Переопределить подобно виртуальному методу
        public override decimal NetValue => CurrentPrice * SharesOwned;
    }
}
```

Скрытие унаследованных членов

В базовом классе и подклассе могут быть определены идентичные члены. Например:

```
public class A { public int Counter = 1; }
public class B : A { public int Counter = 2; }
```

Говорят, что поле `Counter` в классе `B` скрывает поле `Counter` в классе `A`. Обычно это происходит случайно, когда член добавляется в базовый тип *после* того, как идентичный член был добавлен к подтипу. В таком случае компилятор генерирует предупреждение и затем разрешает неоднозначность следующим образом:

- ссылки на `A` (на этапе компиляции) привязываются к `A.Counter`;
- ссылки на `B` (на этапе компиляции) привязываются к `B.Counter`.

Иногда необходимо преднамеренно скрыть какой-то член; тогда к члену в подклассе можно применить ключевое слово `new`. Модификатор `new` не делает ничего сверх того, что просто подавляет выдачу компилятором соответствующего предупреждения:

```
public class A { public int Counter = 1; }
public class B : A { public new int Counter = 2; }
```

Модификатор `new` сообщает компилятору — и другим программистам — о том, что дублирование члена произошло не случайно.



Ключевое слово `new` в языке C# перегружено и в разных контекстах имеет независимый смысл. В частности, операция `new` отличается от модификатора членов `new`.

Сравнение new и override

Рассмотрим следующую иерархию классов:

```
public class BaseClass
{
    public virtual void Foo() { Console.WriteLine ("BaseClass.Foo"); }

public class Overrider : BaseClass
{
    public override void Foo() { Console.WriteLine ("Overrider.Foo"); }

public class Hider : BaseClass
{
    public new void Foo() { Console.WriteLine ("Hider.Foo"); }
```

Ниже приведен код, демонстрирующий различия в поведении классов Overrider и Hider:

```
Overrider over = new Overrider();
BaseClass b1 = over;
over.Foo();           // Overrider.Foo
b1.Foo();            // Overrider.Foo

Hider h = new Hider();
BaseClass b2 = h;
h.Foo();             // Hider.Foo
b2.Foo();            // BaseClass.Foo
```

Запечатывание функций и классов

С помощью ключевого слова **sealed** переопределенная функция может *запечатывать* свою реализацию, предотвращая ее переопределение другими подклассами. В ранее показанном примере виртуальной функции-члена можно было бы запечатать реализацию **Liability** в классе **House**, чтобы запретить переопределение **Liability** в классе, производном от **House**:

```
public sealed override decimal Liability { get { return Mortgage; } }
```

Модификатор **sealed** можно также применить к самому классу, чтобы предотвратить создание его подклассов. Запечатывание класса встречается чаще, чем запечатывание функции-члена.

Функцию-член можно запечатывать с целью запрета ее переопределения, но не *сокрытия*.

Ключевое слово base

Ключевое слово **base** похоже на ключевое слово **this**. Оно служит двум важным целям:

- доступ к функции-члену базового класса при ее переопределении в подклассе;
- вызов конструктора базового класса (см. следующий раздел).

В приведенном ниже примере ключевое слово `base` в классе `House` используется для доступа к реализации `Liability` из `Asset`:

```
public class House : Asset
{
    ...
    public override decimal Liability => base.Liability + Mortgage;
}
```

С помощью ключевого слова `base` мы получаем доступ к свойству `Liability` класса `Asset` *невиртуальным* способом. Это значит, что мы всегда обращаемся к версии данного свойства из `Asset` независимо от действительного типа экземпляра во время выполнения.

Тот же самый подход работает в ситуации, когда `Liability` скрывается, а не переопределяется. (Получить доступ к скрытым членам можно также путем приведения к базовому классу перед обращением к члену.)

Конструкторы и наследование

В подклассе должны быть объявлены собственные конструкторы. Конструкторы базового класса *доступны* в производном классе, но они никогда автоматически не *наследуются*. Например, если классы `Baseclass` и `Subclass` определены следующим образом:

```
public class Baseclass
{
    public int X;
    public Baseclass () { }
    public Baseclass (int x) => this.X = x;
}

public class Subclass : Baseclass { }
```

то приведенный ниже код будет недопустимым:

```
Subclass s = new Subclass (123);
```

Следовательно, в классе `Subclass` должны быть “повторно определены” любые конструкторы, к которым необходимо открыть доступ. Тем не менее, с применением ключевого слова `base` можно вызывать любой конструктор базового класса:

```
public class Subclass : Baseclass
{
    public Subclass (int x) : base (x) { }
```

Ключевое слово `base` работает подобно ключевому слову `this`, но только вызывает конструктор базового класса.

Конструкторы базового класса всегда выполняются первыми, гарантируя тем самым, что *базовая инициализация* произойдет перед *специализированной инициализацией*.

Неявный вызов конструктора без параметров базового класса

Если в конструкторе подкласса опустить ключевое слово `base`, то будет неявно вызываться конструктор без параметров базового класса:

```
public class BaseClass
{
    public int X;
    public BaseClass() { X = 1; }
}

public class Subclass : BaseClass
{
    public Subclass() { Console.WriteLine (X); } // 1
}
```

Если базовый класс не имеет доступного конструктора без параметров, тогда в конструкторах подклассов придется использовать ключевое слово `base`. Это означает, что базовый класс с (одним лишь) конструктором, принимающим несколько параметров, обязывает подклассы вызывать его:

```
class Baseclass
{
    public Baseclass (int x, int y, int z, string s, DateTime d) { ... }

}

public class Subclass : Baseclass
{
    public Subclass (int x, int y, int z, string s, DateTime d)
        : base (x, y, z, s, d) { ... }
}
```

Обязательные члены (C# 11)

Требование к подклассам вызывать конструктор базового класса может стать обременительным в крупных иерархиях классов, если имеется много конструкторов с многочисленными параметрами. Иногда лучшее решение — вообще избегать конструкторов и полагаться исключительно на инициализаторы объектов для установки полей или свойств во время создания экземпляров. Для содействия в этом, начиная с версии C# 11, поле или свойство можно пометить как `required` (обязательное):

```
public class Asset
{
    public required string Name;
}
```

Обязательный член должен быть заполнен через инициализатор объекта при конструировании:

```
Asset a1 = new Asset { Name="House" };           // Нормально
Asset a2 = new Asset();                          // Ошибка: не скомпилируется!
```

Если необходимо также реализовать конструктор, тогда за счет применения атрибута `[SetsRequiredMembers]` можно обойти ограничение обязательного члена для данного конструктора:

```

public class Asset
{
    public required string Name;
    public Asset() { }

    [System.Diagnostics.CodeAnalysis.SetsRequiredMembers]
    public Asset (string n) => Name = n;
}

```

Потребители теперь могут извлечь выгоду из удобства этого конструктора без каких-либо компромиссов:

```

Asset a1 = new Asset { Name = "House" };      // Нормально
Asset a2 = new Asset ("House");                // Нормально
Asset a3 = new Asset();                        // Ошибка!

```

Обратите внимание, что здесь также определен конструктор без параметров (для использования с инициализатором объекта). Его присутствие также гарантирует, что в подклассах не придется воспроизводить любой конструктор. В следующем примере принято решение не реализовывать в классе House удобный конструктор:

```

public class House : Asset { }                  // Нет конструктора - нет забот!
House h1 = new House { Name = "House" };        // Нормально
House h2 = new House();                         // Ошибка!

```

Конструктор и порядок инициализации полей

Когда объект создан, инициализация происходит в указанном ниже порядке.

От подкласса к базовому классу:

- инициализируются поля;
- вычисляются аргументы для вызова конструкторов базового класса.

От базового класса к подклассу:

- выполняются тела конструкторов.

Порядок демонстрируется в следующем коде:

```

public class B
{
    int x = 1;           // Выполняется третьим
    public B (int x)
    {
        ...             // Выполняется четвертым
    }
}

public class D : B
{
    int y = 1;           // Выполняется первым
    public D (int x)
        : base (x + 1) // Выполняется вторым
    {
        ...             // Выполняется пятым
    }
}

```

Наследование от классов с основными конструкторами

Подклассы из классов с основными конструкторами можно создавать с помощью следующего синтаксиса:

```
public class Baseclass (int x) { ... }  
public class Subclass (int x, int y) : Baseclass (x) { ... }
```

Вызов `Baseclass(x)` эквивалентен вызову `base(x)` в показанном ниже примере:

```
public class Subclass : Baseclass  
{  
    public Subclass (int x, int y) : base (x) { ... }  
}
```

Перегрузка и распознавание

Наследование оказывает интересное влияние на перегрузку методов. Предположим, что есть две перегруженные версии метода:

```
static void Foo (Asset a) { }  
static void Foo (House h) { }
```

При вызове перегруженной версии приоритет получает наиболее специфичный тип:

```
House h = new House (...);  
Foo(h); // Вызывается Foo(House)
```

Конкретная перегруженная версия, подлежащая вызову, определяется статически (на этапе компиляции), а не во время выполнения. В показанном ниже коде вызывается `Foo(Asset)` несмотря на то, что типом времени выполнения переменной `a` является `House`:

```
Asset a = new House (...);  
Foo(a); // Вызывается Foo(Asset)
```



Если привести `Asset` к `dynamic` (см. главу 4), тогда решение о том, какая перегруженная версия должна вызываться, откладывается до стадии выполнения, и выбор будет основан на действительном типе объекта:

```
Asset a = new House (...);  
Foo ((dynamic)a); // Вызывается Foo(House)
```

Тип `object`

Тип `object` (`System.Object`) представляет собой первоначальный базовый класс для всех типов. Любой тип может быть неявно приведен вверх к `object`.

Чтобы проиллюстрировать, насколько это полезно, рассмотрим универсальный стек. Стек является структурой данных, работа которой основана на принципе LIFO (“last in, first out” — “последним пришел, первым обслужен”). Стек поддерживает две операции: *помещение* объекта в стек и *извлечение* объекта из

стека. Ниже показана простая реализация, которая способна хранить до 10 объектов:

```
public class Stack
{
    int position;
    object[] data = new object[10];
    public void Push (object obj) { data[position++] = obj; }
    public object Pop() { return data[--position]; }
}
```

Поскольку `Stack` работает с типом `object`, методы `Push` и `Pop` класса `Stack` можно применять с экземплярами *любого типа*:

```
Stack stack = new Stack();
stack.Push ("sausage");
string s = (string) stack.Pop(); // Приведение вниз должно быть явным
Console.WriteLine (s); // Выводит sausage
```

Тип `object` относится к *ссылочным типам* в силу того, что представляет собой класс. Несмотря на данное обстоятельство, типы значений, такие как `int`, также можно приводить к `object`, а `object` приводить к ним, и потому они могут быть помещены в стек. Такая особенность C# называется *унификацией типов* и демонстрируется ниже:

```
stack.Push (3);
int three = (int) stack.Pop();
```

Когда запрашивается приведение между типом значения и типом `object`, среда CLR должна выполнить специальную работу по преодолению семантических отличий между типами значений и ссылочными типами. Процессы называются *упаковкой* (*boxing*) и *распаковкой* (*unboxing*).



В разделе “Обобщения” далее в главе будет показано, как усовершенствовать класс `Stack`, чтобы улучшить поддержку стеков однотипных элементов.

Упаковка и распаковка

Упаковка представляет собой действие по приведению экземпляра типа значения к экземпляру ссылочного типа. Ссылочным типом может быть либо класс `object`, либо интерфейс (см. раздел “Интерфейсы” далее в главе)¹. В следующем примере мы упаковываем `int` в `object`:

```
int x = 9;
object obj = x; // Упаковать int
```

Распаковка является обратной операцией, которая предусматривает приведение объекта к исходному типу значения:

```
int y = (int)obj; // Распаковать int
```

¹ Ссылочным типом может также быть `System.ValueType` или `System.Enum` (см. главу 6).

Распаковка требует явного приведения. Исполняющая среда проверяет, соответствует ли указанный тип значения действительному объектному типу, и генерирует исключение `InvalidCastException`, если это не так. Например, показанный далее код приведет к генерации исключения, поскольку `long` не точно соответствует `int`:

```
object obj = 9;           // Для значения 9 выводится тип int
  long x = (long) obj;    // Генерируется исключение
  InvalidCastException
```

Однако показанный далее код выполняется успешно:

```
object obj = 9;
  long x = (int) obj;
```

Следующий код также не вызывает ошибок:

```
object obj = 3.5;          // Для значения 3.5 выводится тип double
  int x = (int) (double) obj; // x теперь равно 3
```

В последнем примере (`double`) осуществляет *распаковку*, после чего (`int`) выполняет *числовое преобразование*.



Упаковывающие преобразования критически важны в обеспечении унифицированной системы типов. Тем не менее, эта система не идеальна: в разделе “Обобщения” далее в главе будет показано, что вариантность массивов и обобщений поддерживает только *ссылочные преобразования*, но не *упаковывающие преобразования*:

```
object[] a1 = new string[3];      // Допустимо
  object[] a2 = new int[3];        // Ошибка
```

Семантика копирования при упаковке и распаковке

Упаковка *копирует* экземпляр типа значения в новый объект, а распаковка *копирует* содержимое данного объекта обратно в экземпляр типа значения. В приведенном ниже примере изменение значения `i` не вызывает изменения ранее упакованной копии:

```
int i = 3;
  object boxed = i;
  i = 5;
  Console.WriteLine (boxed);           // 3
```

Статическая проверка типов и проверка типов во время выполнения

Программы на языке C# подвергаются проверке типов как статически (на этапе компиляции), так и во время выполнения (средой CLR).

Статическая проверка типов позволяет компилятору контролировать корректность программы, не запуская ее. Показанный ниже код не скомпилируется, т.к. компилятор принудительно применяет статическую проверку типов:

```
int x = "5";
```

Проверка типов во время выполнения осуществляется средой CLR, когда происходит приведение вниз через ссылочное преобразование или распаковку:

```
object y = "5";
int z = (int) y; // Ошибка времени выполнения, неудача приведения вниз
```

Проверка типов во время выполнения возможна по той причине, что каждый объект в куче внутренне хранит небольшой маркер типа. Данный маркер может быть извлечен посредством вызова метода `GetType` класса `object`.

Метод `GetType` и операция `typeof`

Все типы в C# во время выполнения представлены с помощью экземпляра `System.Type`. Получить объект `System.Type` можно двумя основными путями:

- вызвать метод `GetType` на экземпляре;
- воспользоваться операцией `typeof` на имени типа.

Результат `GetType` вычисляется во время выполнения, а `typeof` — статически на этапе компиляции (когда вовлечены параметры обобщенных типов, они распознаются компилятором JIT).

В классе `System.Type` предусмотрены свойства для имени типа, сборки, базового типа и т.д.:

```
Point p = new Point();
Console.WriteLine (p.GetType().Name); // Point
Console.WriteLine (typeof (Point).Name); // Point
Console.WriteLine (p.GetType() == typeof(Point)); // True
Console.WriteLine (p.X.GetType().Name); // Int32
Console.WriteLine (p.Y.GetType().FullName); // System.Int32

public class Point { public int X, Y; }
```

В `System.Type` также имеются методы, которые действуют в качестве шлюза для модели рефлексии времени выполнения, которая описана в главе 18.

Метод `ToString`

Метод `ToString` возвращает стандартное текстовое представление экземпляра типа. Данный метод переопределяется всеми встроенными типами. Ниже приведен пример применения метода `ToString` типа `int`:

```
int x = 1;
string s = x.ToString(); // s равно "1"
```

Переопределять метод `ToString` в специальных типах можно следующим образом:

```
Panda p = new Panda { Name = "Petey" };
Console.WriteLine (p); // Petey

public class Panda
{
    public string Name;
    public override string ToString() => Name;
}
```

Если метод `ToString` не переопределять, то он будет возвращать имя типа.



В случае вызова *переопределенного* члена класса `object`, такого как `ToString`, непосредственно на типе значения упаковка не производится. Упаковка происходит позже, только если осуществляется приведение:

```
int x = 1;
string s1 = x.ToString();      // Вызывается на неупакованном значении
object box = x;
string s2 = box.ToString();    // Вызывается на упакованном значении
```

Список членов `object`

Ниже приведен список всех членов `object`:

```
public class Object
{
    public Object();
    public extern Type GetType();
    public virtual bool Equals (object obj);
    public static bool Equals (object objA, object objB);
    public static bool ReferenceEquals (object objA, object objB);
    public virtual int GetHashCode();
    public virtual string ToString();
    protected virtual void Finalize();
    protected extern object MemberwiseClone();
}
```

Методы `Equals`, `ReferenceEquals` и `GetHashCode` будут описаны в разделе “Сравнение эквивалентности” главы 6.

Структуры

Структура похожа на класс, но обладает указанными ниже ключевыми различиями.

- Структура является типом значения, тогда как класс — ссылочным типом.
- Структура не поддерживает наследование (за исключением того, что она неявно порождена от `object`, а точнее — от `System.ValueType`).

Структура способна иметь все те же члены, что и класс, за исключением финализатора. И поскольку создавать подклассы для нее невозможно, члены не могут быть помечены как `virtual`, `abstract` или `protected`.



До выхода версии C# 10 в структурах было запрещено определять инициализаторы полей и конструкторы без параметров. Хотя сейчас этот запрет смягчен — в первую очередь в пользу структур типа записей (см. раздел “Записи” в главе 4), — стоит тщательно подумать, прежде чем определять такие конструкции, потому что они могут привести к путанице в поведении, как объясняется в разделе “Семантика конструирования структур” далее в главе.

Структура подходит там, где желательно иметь семантику типа значения. Хорошими примерами могут служить числовые типы, для которых более естественным способом присваивания будет копирование значения, а не ссылки. Поскольку структура представляет собой тип значения, каждый экземпляр не требует создания объекта в куче; это дает ощутимую экономию при создании большого количества экземпляров типа. Например, создание массива с элементами типа значения требует только одного выделения памяти в куче.

Из-за того, что структуры являются типами значений, экземпляр не может быть равен `null`. Стандартное значение для структуры — пустой экземпляр со всеми пустыми полями (установленными в свои стандартные значения).

Семантика конструирования структур



До выхода версии C# 11 каждому полю в структуре должно было быть явно присвоено значение в конструкторе (или в инициализаторе поля). Сейчас это ограничение смягчено.

Стандартный конструктор

В дополнение к любым определяемым вами конструкторам структура всегда имеет неявный конструктор без параметров, который выполняет побитовое обнуление полей структуры (устанавливая для них стандартные значения):

```
Point p = new Point();           // p.x и p.y получат значение 0
struct Point { int x, y; }
```

Даже если вы определяете собственный конструктор без параметров, то неявный конструктор без параметров по-прежнему существует, и к нему можно получить доступ через ключевое слово `default`:

```
Point p1 = new Point();           // p1.x и p1.y получат значение 1
Point p2 = default;              // p2.x и p2.y получат значение 0

struct Point
{
    int x = 1;
    int y;
    public Point() => y = 1;
}
```

В приведенном примере поле `x` инициализируется значением 1 с помощью инициализатора поля, а поле `y` — значением 1 через конструктор без параметров. И все же с использованием ключевого слова `default` мы смогли создать экземпляр `Point`, который обходит обе инициализации. Доступ к стандартному конструктору можно получить и другими способами, как демонстрируется в следующем примере:

```
var points = new Point[10]; // Все точки в массиве будут иметь значение (0,0)
var test = new Test();      // test.p будет иметь значение (0,0)

class Test { Point p; }
```



Наличие двух конструкторов без параметров может стать источником путаницы и, возможно, является хорошей причиной избегать определения инициализаторов полей и явных конструкторов без параметров в структурах.

Хорошая стратегия в отношении структур предусматривает их проектирование так, чтобы стандартное значение было допустимым состоянием, делая инициализацию избыточной. Например, вместо инициализации свойства следующим образом:

```
public string Protocol { get; set; } = "https";
```

можно поступить так:

```
struct WebOptions
{
    string protocol;
    public string Protocol { get => protocol ?? "https";
                           set => protocol = value; }
}
```

Структуры и функции, поддерживающие только чтение

К структуре можно применять модификатор `readonly`, чтобы все поля в ней были `readonly`; такой прием помогает заявить о своем намерении и предоставляет компилятору большую свободу в плане оптимизации:

```
readonly struct Point
{
    public readonly int X, Y; // X и Y обязаны быть readonly
}
```

На тот случай, когда модификатор `readonly` необходимо применять на более детализированном уровне, в C# 8 появилась возможность применять его к функциям структуры, гарантируя тем самым, что если функция попытается модифицировать любое поле, то сгенерируется ошибка на этапе компиляции:

```
struct Point
{
    public int X, Y;
    public readonly void ResetX() => X = 0; // Ошибка!
}
```

Если функция `readonly` вызывает функцию не `readonly`, тогда компилятор генерирует предупреждение (и защитным образом копирует структуру, чтобы устраниТЬ возможность ее изменения).

Ссылочные структуры



Ссылочные структуры были введены в C# 7.2 как нишевое средство в интересах структур `Span<T>` и `ReadOnlySpan<T>`, которые будут рассматриваться в главе 23 (и высокооптимизированной структуре `Utf8JsonReader`, описанной в главе 11). Упомянутые структуры оказывают содействие технологии микрооптимизации, которая направлена на сокращение выделения памяти.

В отличие от ссылочных типов, экземпляры которых всегда размещаются в куче, типы значений находятся *на месте* (где была объявлена переменная). Если тип значения относится к параметру или локальной переменной, то размещение произойдет в стеке:

```
void SomeMethod()
{
    Point p; // p будет находиться в стеке
}

struct Point { public int X, Y; }
```

Но если тип значения относится к полю в классе, тогда размещение произойдет в куче:

```
class MyClass
{
    Point p; //Находится в куче, поскольку экземпляры MyClass размещаются в куче
}
```

Аналогичным образом массивы структур находятся в куче, и упаковка структуры приводит к ее размещению в куче.

Добавление модификатора **ref** к объявлению структуры гарантирует, что она сможет размещаться только в стеке. Попытка использования *ссылочной структуры* таким способом, чтобы она могла располагаться в куче, приводит к генерации ошибки на этапе компиляции:

```
var points = new Point [100];           // Ошибка: не скомпилируется!
ref struct Point { public int X, Y; }
class MyClass { Point P; }           // Ошибка: не скомпилируется!
```

Ссылочные структуры были введены главным образом в интересах структур **Span<T>** и **ReadOnlySpan<T>**. Поскольку экземпляры **Span<T>** и **ReadOnlySpan<T>** могут существовать только в стеке, у них есть возможность безопасно содержать в себе память, выделенную в стеке.

Ссылочные структуры не могут принимать участие в каком-либо средстве C#, которое прямо или косвенно привносит вероятность существования в куче. Сюда входит несколько расширенных средств C#, которые рассматриваются в главе 4, в частности лямбда-выражения, итераторы и асинхронные функции (потому что все упомянутые средства “за кулисами” создают классы с полями). Кроме того, ссылочные структуры не могут находиться внутри нессылочных структур и не могут реализовывать интерфейсы (т.к. это может приводить к упаковке).

Модификаторы доступа

Для содействия инкапсуляции тип или член типа может ограничивать свою *доступность* другим типам и сборкам за счет добавления к объявлению одного из описанных ниже *модификаторов доступа*.

public

Полная доступность. Это неявная доступность для членов перечисления либо интерфейса.

internal

Доступность только внутри содержащей сборки или в дружественных сборках. Это стандартная доступность для невложенных типов.

private

Доступность только внутри содержащего типа. Это стандартная доступность для членов класса или структуры.

protected

Доступность только внутри содержащего типа или в его подклассах.

protected internal

Объединение доступности **protected** и **internal**. Член **protected internal** доступен двумя путями.

private protected

Пересечение доступности **protected** и **internal**. Член **private protected** доступен только внутри содержащего типа или в подклассах, которые находятся в той же самой сборке (что делает его *менее* доступным, чем **protected** либо **internal** по отдельности).

file (начиная с версии C# 11)

Доступность только внутри того же самого файла. Предназначен для использования генераторами исходного кода (см. раздел “Расширенные частичные методы” ранее в главе). Данный модификатор можно применять только к объявлениям типов.

Примеры

Класс Class2 доступен извне его сборки; Class1 — нет:

```
class Class1 {} // Class1 является internal (по умолчанию)
public class Class2 {}
```

Класс ClassB открывает поле x другим типам в той же сборке; ClassA — нет:

```
class ClassA { int x; } // x является private (по умолчанию)
class ClassB { internal int x; }
```

Функции внутри Subclass могут вызывать Bar, но не Foo:

```
class BaseClass
{
    void Foo() {} // Foo является private (по умолчанию)
    protected void Bar() {}
}
```

```
class Subclass : BaseClass
{
    void Test1() { Foo(); }           // Ошибка - доступ к Foo невозможен
    void Test2() { Bar(); }          // Нормально
}
```

Дружественные сборки

Члены `internal` можно открывать другим *дружественным* сборкам, добавляя атрибут сборки `System.Runtime.CompilerServices.InternalVisibleTo`, в котором указано имя дружественной сборки:

```
[assembly: InternalVisibleTo ("Friend")]
```

Если дружественная сборка имеет строгое имя (см. главу 17), тогда потребуется указать ее *полный* 160-байтовый открытый ключ:

```
[assembly: InternalVisibleTo ("StrongFriend, PublicKey=0024f000048c...")]
```

Извлечь полный открытый ключ из строго именованной сборки можно с помощью запроса LINQ (более детально LINQ рассматривается в главе 8):

```
string key = string.Join ("",
    Assembly.GetExecutingAssembly().GetName().GetPublicKey()
        .Select (b => b.ToString ("x2")));
```



В сопровождающем книгу примере для LINQPad предлагается выбрать сборку и затем скопировать полный открытый ключ сборки в буфер обмена.

Установление верхнего предела доступности

Тип устанавливает верхний предел доступности объявленных в нем членов. Наиболее распространенным примером такого установления является ситуация, когда есть тип `internal` с членами `public`. В качестве примера взгляните на следующий код:

```
class C { public void Foo() {} }
```

Стандартная доступность `internal` класса С устанавливает верхний предел доступности метода `Foo`, по существу делая `Foo` внутренним. Распространенная причина пометки `Foo` как `public` связана с облегчением рефакторинга, если позже будет решено изменить доступность класса С на `public`.

Ограничения, накладываемые на модификаторы доступа

При переопределении метода из базового класса доступность должна быть идентичной доступности переопределяемого метода. Например:

```
class BaseClass           { protected virtual void Foo() {} }
class Subclass1 : BaseClass { protected override void Foo() {} } // Нормально
class Subclass2 : BaseClass { public     override void Foo() {} } // Ошибка
```

(Исключением является случай переопределения метода `protected internal` в другой сборке, при котором переопределяемый метод должен быть просто `protected`.)

Компилятор предотвращает несогласованное использование модификаторов доступа. Например, подкласс может иметь меньшую доступность, чем базовый класс, но не большую:

```
internal class A {}  
public class B : A {} // Ошибка
```

Интерфейсы

Интерфейс похож на класс, но он только *задает поведение и не хранит состояние (данные)*. Интерфейс обладает следующими особенностями.

- В интерфейсе можно определять только функции, но не поля.
- Все члены интерфейса *неявно абстрактные*. (Из этого правила существуют исключения, которые будут описаны в разделах “Стандартные члены интерфейса” и “Статические члены интерфейса” далее в главе.)
- Класс (или структура) может реализовывать *несколько* интерфейсов. Напротив, класс может быть унаследован только от *одного* класса, а структура вообще не поддерживает наследование (за исключением того, что она порождена от `System.ValueType`).

Объявление интерфейса похоже на объявление класса, но интерфейс (обычно) не предоставляет никакой реализации для своих членов, т.к. они неявно абстрактные. Члены интерфейса будут реализованы классами и структурами, которые реализуют данный интерфейс. Интерфейс может содержать только функции, т.е. методы, свойства, события и индексаторы (что неслучайно в точности соответствует членам класса, которые могут быть абстрактными).

Ниже показано определение интерфейса `IEnumerator` из пространства имен `System.Collections`:

```
public interface IEnumerator  
{  
    bool MoveNext();  
    object Current { get; }  
    void Reset();  
}
```

Члены интерфейса всегда *неявно являются public*, и для них нельзя объявлять какие-либо модификаторы доступа. Реализация интерфейса означает предоставление реализации `public` для всех его членов:

```
internal class Countdown : IEnumerator  
{  
    int count = 11;  
    public bool MoveNext() => count-- > 0;  
    public object Current => count;  
    public void Reset() { throw new NotSupportedException(); }  
}
```

Объект можно неявно приводить к любому интерфейсу, который он реализует:

```
IEnumerator e = new Countdown();
while (e.MoveNext())
    Console.Write (e.Current); // 109876543210
```



Несмотря на то что `Countdown` — внутренний класс, его члены, которые реализуют интерфейс `IEnumerator`, могут открыто вызываться за счет приведения экземпляра `Countdown` к `IEnumerator`. Скажем, если какой-то открытый тип в той же сборке определяет метод следующим образом:

```
public static class Util
{
    public static object GetCountDown() => new CountDown();
```

то в вызывающем коде внутри другой сборки можно поступать так:

```
IEnumerator e = (IEnumerator) Util.GetCountDown();
e.MoveNext();
```

Если бы сам интерфейс `IEnumerator` был определен как `internal`, тогда подобное оказалось бы невозможным.

Расширение интерфейса

Интерфейсы могут быть производными от других интерфейсов. Вот пример:

```
public interface IUndoable { void Undo(); }
public interface IRedoable : IUndoable { void Redo(); }
```

Интерфейс `IRedoable` “наследует” все члены интерфейса `IUndoable`. Другими словами, типы, которые реализуют `IRedoable`, обязаны также реализовывать члены `IUndoable`.

Явная реализация членов интерфейса

Реализация множества интерфейсов временами может приводить к конфликтам между сигнатурами членов. Разрешать такие конфликты можно за счет явной реализации члена интерфейса. Рассмотрим следующий пример:

```
interface I1 { void Foo(); }
interface I2 { int Foo(); }

public class Widget : I1, I2
{
    public void Foo()
    {
        Console.WriteLine ("Widget's implementation of I1.Foo");
        // Реализация I1.Foo в Widget
    }
}
```

```

int I2.Foo()
{
    Console.WriteLine ("Widget's implementation of I2.Foo");
        // Реализация I2.Foo в Widget
    return 42;
}
}

```

Поскольку интерфейсы I1 и I2 имеют методы Foo с конфликтующими сигнатурами, метод Foo интерфейса I2 в классе Widget реализуется явно, что позволяет двум методам сосуществовать в рамках одного класса. Единственный способ вызова явно реализованного метода предусматривает приведение к его интерфейсу:

```

Widget w = new Widget();
w.Foo();                                // Реализация I1.Foo в Widget
((I1)w).Foo();                           // Реализация I1.Foo в Widget
((I2)w).Foo();                           // Реализация I2.Foo в Widget

```

Еще одной причиной явной реализации членов интерфейса может быть необходимость скрытия членов, которые являются узкоспециализированными и нарушающими нормальный сценарий использования типа. Скажем, тип, который реализует ISerializable, обычно будет избегать демонстрации членов ISerializable, если только не осуществляется явное приведение к упомянутому интерфейсу.

Реализация виртуальных членов интерфейса

Неявно реализованный член интерфейса по умолчанию будет запечатанным. Чтобы его можно было переопределить, он должен быть помечен в базовом классе как `virtual` или `abstract`. Например:

```

public interface IUndoable { void Undo(); }

public class TextBox : IUndoable
{
    public virtual void Undo() => Console.WriteLine ("TextBox.Undo");
}

public class RichTextBox : TextBox
{
    public override void Undo() => Console.WriteLine ("RichTextBox.Undo");
}

```

Обращение к такому члену интерфейса либо через базовый класс, либо через интерфейс приводит к вызову его реализации из подкласса:

```

RichTextBox r = new RichTextBox();
r.Undo();                                // RichTextBox.Undo
((IUndoable)r).Undo();                   // RichTextBox.Undo
((TextBox)r).Undo();                     // RichTextBox.Undo

```

Явно реализованный член интерфейса не может быть помечен как `virtual`, равно как и не может быть переопределен обычным образом. Однако он может быть *реализован повторно*.

Повторная реализация члена интерфейса в подклассе

Подкласс может повторно реализовывать любой член интерфейса, который уже реализован базовым классом. Повторная реализация перехватывает реализацию члена (при вызове через интерфейс) и работает вне зависимости от того, является ли член виртуальным в базовом классе. Повторная реализация также работает в ситуации, когда член реализован неявно или явно — хотя, как будет продемонстрировано, в последнем случае она работает лучше.

В показанном ниже примере класс TextBox явно реализует `IUndoable.Undo`, а потому данный метод не может быть помечен как `virtual`. Чтобы его “переопределить”, класс RichTextBox обязан повторно реализовать метод Undo интерфейса `IUndoable`:

```
public interface IUndoable { void Undo(); }

public class TextBox : IUndoable
{
    void IUndoable.Undo() => Console.WriteLine ("TextBox.Undo");
}

public class RichTextBox : TextBox, IUndoable
{
    public void Undo() => Console.WriteLine ("RichTextBox.Undo");
}
```

Обращение к повторно реализованному методу через интерфейс приводит к вызову его реализации из подкласса:

```
RichTextBox r = new RichTextBox();
r.Undo();           // RichTextBox.Undo Случай 1
((IUndoable)r).Undo(); // RichTextBox.Undo Случай 2
```

При том же самом определении RichTextBox предположим, что TextBox реализует метод Undo *неявно*:

```
public class TextBox : IUndoable
{
    public void Undo() => Console.WriteLine ("TextBox.Undo");
}
```

В итоге мы имеем еще один способ вызова метода Undo, который “нарушает” систему, как показано в случае 3:

```
RichTextBox r = new RichTextBox();
r.Undo();           // RichTextBox.Undo Случай 1
((IUndoable)r).Undo(); // RichTextBox.Undo Случай 2
((TextBox)r).Undo(); // TextBox.Undo Случай 3
```

Случай 3 демонстрирует тот факт, что перехват повторной реализации результативен, только когда член вызывается через интерфейс, а не через базовый класс. Обычно подобное нежелательно, т.к. может означать несогласованную семантику. Это делает повторную реализацию наиболее подходящей в качестве стратегии для переопределения явно реализованных членов интерфейса.

Альтернативы повторной реализации членов интерфейса

Даже при явной реализации членов повторная реализация проблематична по следующим причинам.

- Подкласс не имеет возможности вызывать метод базового класса.
- Автор базового класса мог не предполагать, что метод будет повторно реализован, и потому не учел потенциальные последствия.

Повторная реализация может оказаться хорошим последним средством в ситуации, когда создание подклассов не предвиделось. Тем не менее, лучше проектировать базовый класс так, чтобы потребность в повторной реализации никогда не возникала. Данной цели можно достичь двумя путями.

- В случае неявной реализации члена пометьте его как `virtual`, если подобное возможно.
- В случае явной реализации члена используйте следующий шаблон, если предполагается, что в подклассах может понадобиться переопределение любой логики:

```
public class TextBox : IUndoable
{
    void IUndoable.Undo()      => Undo(); //Вызывает метод, определенный ниже
    protected virtual void Undo() => Console.WriteLine ("TextBox.Undo");
}
public class RichTextBox : TextBox
{
    protected override void Undo() => Console.WriteLine("RichTextBox.Undo");
}
```

Если создание подклассов не предвидится, тогда класс можно пометить как `sealed`, чтобы предотвратить повторную реализацию членов интерфейса.

Интерфейсы и упаковка

Преобразование структуры в интерфейс приводит к упаковке. Обращение к неявно реализованному члену структуры упаковку не вызывает:

```
interface I { void Foo(); }
struct S : I { public void Foo() {} }
...
S s = new S();
s.Foo(); // Упаковка не происходит
I i = s; // Упаковка происходит во время приведения к интерфейсу
i.Foo();
```

Стандартные члены интерфейса

Начиная с версии C# 8, к члену интерфейса можно добавлять стандартную реализацию, делая его необязательным для реализации:

```
interface ILogger
{
    void Log (string text) => Console.WriteLine (text);
}
```

Такая возможность полезна, когда необходимо добавить член к интерфейсу, который определен в популярной библиотеке, не нарушая работу (потенциально многих тысяч) реализаций.

Стандартные реализации всегда явные, так что если класс, реализующий ILogger, не определит метод Log, то вызывать его можно будет только через интерфейс:

```
class Logger : ILogger { }  
...  
(ILogger)new Logger()).Log ("message");
```

Это предотвращает проблему наследования множества реализаций: если тот же самый стандартный член добавлен в два интерфейса, которые реализует класс, то никогда не возникнет неоднозначность относительно того, какой член вызывать.

Статические члены интерфейса

В интерфейсах можно также объявлять статические члены. Есть два вида статических членов интерфейсов:

- статические невиртуальные члены интерфейсов;
- статические виртуальные/абстрактные члены интерфейсов.



В отличие от членов экземпляра статические члены интерфейсов по умолчанию не являются виртуальными. Чтобы сделать статический член интерфейса виртуальным, его необходимо пометить как static abstract или static virtual.

Статические невиртуальные члены интерфейсов

Статические невиртуальные члены интерфейсов существуют главным образом для того, чтобы облегчить написание стандартных членов интерфейсов. Они не реализуются классами или структурами, а взамен потребляются напрямую. Наряду с методами, свойствами, событиями и индексаторами статические невиртуальные члены разрешают использовать поля, доступ к которым обычно осуществляется из кода внутри стандартных реализаций членов:

```
interface ILogger  
{  
    void Log (string text) =>  
        Console.WriteLine (Prefix + text);  
  
    static string Prefix = "";  
}
```

Невиртуальные члены интерфейсов по умолчанию являются открытыми, так что к ним всегда можно обращаться извне:

```
ILogger.Prefix = "File log: ";
```

Вы можете ограничить это, добавив модификатор доступности (такой как `private`, `protected` или `internal`).

Поля экземпляра (по-прежнему) запрещены, что согласуется с принципом интерфейсов, который заключается в том, что интерфейсы определяют *поведение*, но не *состояние*.

Статические виртуальные/абстрактные члены интерфейсов

Статические виртуальные/абстрактные члены интерфейсов (появившиеся в версии C# 11) обеспечивают *статический полиморфизм* — расширенное функциональное средство, которое обсуждается в главе 4. Статические абстрактные или виртуальные члены интерфейсов помечаются с помощью `static abstract` или `static virtual`:

```
interface ITypeDescribable
{
    static abstract string Description { get; }
    static virtual string Category => null;
}
```

В реализующем классе или структуре должны быть реализованы статические абстрактные члены и при необходимости могут быть реализованы статические виртуальные члены:

```
class CustomerTest : ITypeDescribable
{
    public static string Description => "Customer tests"; // Обязательно
    public static string Category     => "Unit testing"; // Необязательно
}
```

Помимо методов, свойств и событий, операции и преобразования также являются допустимыми целями для статических виртуальных членов интерфейсов (см. раздел “Перегрузка операций” главы 4). Статические виртуальные члены интерфейсов вызываются через ограниченный параметр типа, что будет демонстрироваться в разделах “Статический полиморфизм” и “Обобщенная математика” главы 4 после рассмотрения обобщений далее в текущей главе.

Написание кода класса или кода интерфейса

Запомните в качестве руководства следующие правила.

- Применяйте классы и подклассы для типов, которые естественным образом совместно используют некоторую реализацию.
- Применяйте интерфейсы для типов, которые имеют независимые реализации.

Рассмотрим показанные далее классы:

```
abstract class Animal {}
abstract class Bird           : Animal {}
abstract class Insect         : Animal {}
abstract class FlyingCreature : Animal {}
abstract class Carnivore      : Animal {}
```

```
// Конкретные классы:  
class Ostrich : Bird {}  
class Eagle   : Bird, FlyingCreature, Carnivore {} // Не допускается  
class Bee     : Insect, FlyingCreature {}          // Не допускается  
class Flea    : Insect, Carnivore {}              // Не допускается
```

Код классов `Eagle`, `Bee` и `Flea` не скомпилируется, потому что наследование от множества классов запрещено. Чтобы решить такую проблему, понадобится преобразовать некоторые типы в интерфейсы. Здесь и возникает вопрос: какие именно типы? Следуя главному правилу, мы можем сказать, что насекомые (`Insect`) разделяют реализацию и птицы (`Bird`) разделяют реализацию, а потому они остаются классами. В противоположность им летающие существа (`FlyingCreature`) имеют независимые механизмы для полета, а плотоядные животные (`Carnivore`) поддерживают независимые линии поведения при поедании, так что мы можем преобразовать `FlyingCreature` и `Carnivore` в интерфейсы:

```
interface IFlyingCreature {}  
interface ICarnivore {}
```

В типичном сценарии классы `Bird` и `Insect` могут соответствовать элементу управления Windows и веб-элементу управления, а `FlyingCreature` и `Carnivore` — интерфейсам `IPrintable` и `IUndoable`.

Перечисления

Перечисление — это специальный тип значения, который позволяет указывать группу именованных числовых констант, например:

```
public enum BorderSide { Left, Right, Top, Bottom }
```

Такое перечисление можно использовать следующим образом:

```
BorderSide topSide = BorderSide.Top;  
bool isTop = (topSide == BorderSide.Top); // true
```

Каждый член перечисления имеет лежащее в его основе целочисленное значение. По умолчанию:

- лежащие в основе значения относятся к типу `int`;
- членам перечисления присваиваются константы 0, 1, 2... (в порядке их объявления).

Можно указывать другой целочисленный тип:

```
public enum BorderSide : byte { Left, Right, Top, Bottom }
```

Для каждого члена перечисления можно явно указывать лежащие в основе значения:

```
public enum BorderSide : byte { Left=1, Right=2, Top=10, Bottom=11 }
```



Компилятор также позволяет явно присваивать значения *определенным* членам перечисления. Члены, которым не были присвоены значения, получают значения на основе инкрементирования последнего явно указанного значения. Предыдущий пример эквивалентен следующему коду:

```
public enum BorderSide : byte
{ Left=1, Right, Top=10, Bottom }
```

Преобразования перечислений

С помощью явного приведения экземпляр перечисления может быть преобразован в лежащее в основе целочисленное значение и из него:

```
int i = (int) BorderSide.Left;
BorderSide side = (BorderSide) i;
bool leftOrRight = (int) side <= 2;
```

Можно также явно приводить один тип перечисления к другому. Предположим, что определение `HorizontalAlignment` выглядит следующим образом:

```
public enum HorizontalAlignment
{
    Left = BorderSide.Left,
    Right = BorderSide.Right,
    Center
}
```

При трансляции между типами перечислений используются лежащие в их основе целочисленные значения:

```
HorizontalAlignment h = (HorizontalAlignment) BorderSide.Right;
// То же самое, что и:
HorizontalAlignment h = (HorizontalAlignment) (int) BorderSide.Right;
```

Числовой литерал 0 в выражении `enum` трактуется компилятором особым образом и явного приведения не требует:

```
BorderSide b = 0; // Приведение не требуется
if (b == 0) ...
```

Существуют две причины для специальной трактовки значения 0:

- первый член перечисления часто применяется как “стандартное” значение;
- для типов комбинированных перечислений значение 0 означает “отсутствие флагов”.

Перечисления флагов

Члены перечислений можно комбинировать. Чтобы предотвратить неоднозначности, члены комбинируемого перечисления требуют явного присваивания значений, обычно являющихся степенью двойки. Например:

```
[Flags]
public enum BorderSides { None=0, Left=1, Right=2, Top=4, Bottom=8 }
```

или:

```
enum BorderSides { None=0, Left=1, Right=1<<1, Top=1<<2, Bottom=1<<3 }
```

При работе со значениями комбинированного перечисления используются побитовые операции, такие как | и &. Они имеют дело с лежащими в основе целыми значениями:

```
BorderSides leftRight = BorderSides.Left | BorderSides.Right;
if ((leftRight & BorderSides.Left) != 0)
    Console.WriteLine ("Includes Left");           // Включает Left
string formatted = leftRight.ToString();           // "Left, Right"
BorderSides s = BorderSides.Left;
s |= BorderSides.Right;
Console.WriteLine (s == leftRight);                // True
s ^= BorderSides.Right;                          // Переключает BorderSides.Right
Console.WriteLine (s);                           // Left
```

По соглашению к типу перечисления всегда должен применяться атрибут Flags, когда члены перечисления являются комбинируемыми. Если объявить такое перечисление без атрибута Flags, то комбинировать его члены по-прежнему можно будет, но вызов ToString на экземпляре перечисления приведет к выдаче числа, а не последовательности имен.

По соглашению типу комбинируемого перечисления назначается имя во множественном, а не единственном числе. Для удобства члены комбинаций могут быть помещены в само объявление перечисления:

```
[Flags]
enum BorderSides
{
    None=0,
    Left=1, Right=1<<1, Top=1<<2, Bottom=1<<3,
    LeftRight = Left | Right,
    TopBottom = Top | Bottom,
    All      = LeftRight | TopBottom
}
```

Операции над перечислениями

Ниже указаны операции, которые могут работать с перечислениями:

```
= == != < > <= >= + - ^ & | ~
+= -= ++ -- sizeof
```

Побитовые, арифметические и операции сравнения возвращают результат обработки лежащих в основе целочисленных значений. Сложение разрешено для перечисления и целочисленного типа, но не для двух перечислений.

Проблемы безопасности типов

Рассмотрим следующее перечисление:

```
public enum BorderSide { Left, Right, Top, Bottom }
```

Поскольку тип перечисления может быть приведен к лежащему в основе целочисленному типу и наоборот, фактическое значение может выходить за пределы допустимых границ законного члена перечисления:

```
BorderSide b = (BorderSide) 12345;
Console.WriteLine (b); // 12345
```

Побитовые и арифметические операции могут аналогично давать в результате недопустимые значения:

```
BorderSide b = BorderSide.Bottom;
b++; // Ошибки не возникают
```

Недопустимый экземпляр BorderSide может нарушить работу следующего кода:

```
void Draw (BorderSide side)
{
    if      (side == BorderSide.Left) {...}
    else if (side == BorderSide.Right){...}
    else if (side == BorderSide.Top)  {...}
    else                      {...} // Предполагается BorderSide.Bottom
}
```

Одно из решений предусматривает добавление дополнительной конструкции else:

```
...
else if (side == BorderSide.Bottom) ...
else throw new ArgumentException ("Invalid BorderSide: " + side, "side");
// Недопустимое значение BorderSide
```

Еще один обходной прием заключается в явной проверке значения перечисления на предмет допустимости. Такую работу выполняет статический метод Enum.IsDefined:

```
BorderSide side = (BorderSide) 12345;
Console.WriteLine (Enum.IsDefined (typeof (BorderSide), side)); // False
```

К сожалению, метод Enum.IsDefined не работает с перечислениями флагов. Однако показанный далее вспомогательный метод (трюк, опирающийся на поведение Enum.ToString) возвращает true, если заданное перечисление флагов является допустимым:

```
for (int i = 0; i <= 16; i++)
{
    BorderSides side = (BorderSides)i;
    Console.WriteLine (IsFlagDefined (side) + " " + side);
}

bool IsFlagDefined (Enum e)
{
    decimal d;
    return !decimal.TryParse (e.ToString (), out d);
}

[Flags]
public enum BorderSides { Left=1, Right=2, Top=4, Bottom=8 }
```

Вложенные типы

Вложенный тип объявляется внутри области видимости другого типа:

```
public class TopLevel
{
    public class Nested { }                      // Вложенный класс
    public enum Color { Red, Blue, Tan }          // Вложенное перечисление
}
```

Вложенный тип обладает следующими характеристиками.

- Он может получать доступ к закрытым членам включающего типа и ко всему остальному, к чему включающий тип имеет доступ.
- Он может быть объявлен с полным диапазоном модификаторов доступа, а не только `public` и `internal`.
- Стандартной доступностью вложенного типа является `private`, а не `internal`.
- Доступ к вложенному типу извне требует указания имени включающего типа (как при обращении к статическим членам).

Например, для доступа к члену `Color.Red` извне класса `TopLevel` необходимо записать такой код:

```
TopLevel.Color color = TopLevel.Color.Red;
```

Вложение в класс или структуру допускают все типы (классы, структуры, интерфейсы, делегаты и перечисления).

Ниже приведен пример обращения к закрытому члену типа из вложенного типа:

```
public class TopLevel
{
    static int x;
    class Nested
    {
        static void Foo() { Console.WriteLine (TopLevel.x); }
    }
}
```

А вот пример использования модификатора доступа `protected` с вложенным типом:

```
public class TopLevel
{
    protected class Nested { }

    public class SubTopLevel : TopLevel
    {
        static void Foo() { new TopLevel.Nested(); }
    }
}
```

Далее показан пример ссылки на вложенный тип извне включающего типа:

```
public class TopLevel
{
    public class Nested { }
}

class Test
{
    TopLevel.Nested n;
}
```

Вложенные типы интенсивно применяются самим компилятором, когда он генерирует закрытые классы, которые хранят состояние для таких конструкций, как итераторы и анонимные методы.



Если единственной причиной для использования вложенного типа является желание избежать загромождения пространства имен слишком большим числом типов, тогда замен рассмотрите возможность применения вложенного пространства имен. Вложенный тип должен использоваться из-за его более строгих ограничений контроля доступа или же когда вложенному классу нужен доступ к закрытым членам включающего класса.

Обобщения

В C# имеются два отдельных механизма для написания кода, многократно применяемого различными типами: *наследование* и *обобщения*. В то время как наследование выражает повторное использование с помощью базового типа, обобщения делают это посредством “шаблона”, который содержит “типы-заполнители”. В сравнении с наследованием обобщения могут *увеличивать безопасность типов*, а также *сокращать количество приведений и упаковок*.



Обобщения C# и шаблоны C++ — похожие концепции, но работают они по-разному. Разница объясняется в разделе “Сравнение обобщений C# и шаблонов C++” в конце настоящей главы.

Обобщенные типы

Обобщенный тип объявляет *параметры типа* — типы-заполнители, предназначенные для заполнения потребителем обобщенного типа, который предоставляет *аргументы типа*. Ниже показан обобщенный тип `Stack<T>`, предназначенный для реализации стека экземпляров типа T. В `Stack<T>` объявлен единственный параметр типа T:

```
public class Stack<T>
{
    int position;
    T[] data = new T[100];
    public void Push (T obj) => data[position++] = obj;
    public T Pop()           => data[--position];
}
```

Вот как можно применять Stack<T>:

```
var stack = new Stack<int>();
stack.Push (5);
stack.Push (10);
int x = stack.Pop();      // x имеет значение 10
int y = stack.Pop();      // y имеет значение 5
```

Класс Stack<int> заполняет параметр типа T аргументом типа int, неявно создавая тип на лету (синтез происходит во время выполнения). Однако попытка помещения в стек типа Stack<int> строки приведет к ошибке на этапе компиляции. Фактически Stack<int> имеет показанное ниже определение (подстановки выделены полужирным, и во избежание путаницы вместо имени класса указано ###):

```
public class ###
{
    int position;
    int[] data;
    public void Push (int obj) => data[position++] = obj;
    public int Pop()           => data[--position];
}
```

Формально мы говорим, что Stack<T> — это *открытый (open) тип*, а Stack<int> — *закрытый (closed) тип*. Во время выполнения все экземпляры обобщенных типов закрываются — с заполнением их типов-заполнителей. Это значит, что показанный ниже оператор является недопустимым:

```
var stack = new Stack<T>(); // Не допускается: что собой представляет T?
```

Тем не менее, поступать так разрешено внутри класса или метода, который сам определяет T как параметр типа:

```
public class Stack<T>
{
    ...
    public Stack<T> Clone()
    {
        Stack<T> clone = new Stack<T>(); // Разрешено
        ...
    }
}
```

Для чего предназначены обобщения

Обобщения предназначены для написания кода, который может многократно использоваться различными типами. Предположим, что нам нужен стек целочисленных значений, но мы не располагаем обобщенными типами. Одно из решений предусматривает жесткое кодирование отдельной версии класса для каждого требуемого типа элементов (например, IntStack, StringStack и т.д.). Очевидно, что такой подход приведет к дублированию значительного объема кода. Другое решение заключается в написании стека, который обобщается за счет применения object в качестве типа элементов:

```

public class ObjectStack
{
    int position;
    object[] data = new object[10];
    public void Push (object obj) => data[position++] = obj;
    public object Pop()           => data[--position];
}

```

Тем не менее, класс `ObjectStack` не будет работать настолько же эффективно, как жестко закодированный класс `IntStack`, предназначенный для сохранения в стеке целочисленных значений. В частности, `ObjectStack` будет требовать упаковки и приведения вниз, которые не могут быть проверены на этапе компиляции:

```

// Предположим, что мы просто хотим сохранять целочисленные значения:
ObjectStack stack = new ObjectStack();

stack.Push ("s");           // Некорректный тип, но ошибка не возникает!
int i = (int)stack.Pop();   // Приведение вниз - ошибка времени выполнения

```

Нас интересует универсальная реализация стека, работающая со всеми типами элементов, а также возможность ее легкой специализации для конкретного типа элементов в целях повышения безопасности типов и сокращения приведений и упаковок. Именно это обеспечивают обобщения, позволяя параметризовать тип элементов. Тип `Stack<T>` обладает преимуществами и `ObjectStack`, и `IntStack`. Подобно `ObjectStack` класс `Stack<T>` написан один раз для универсальной работы со всеми типами. Как и `IntStack`, класс `Stack<T>` специализируется для конкретного типа — его элегантность заключается в том, что таким типом является `T`, который можно подставлять на лету.



Класс `ObjectStack` функционально эквивалентен `Stack<object>`.

Обобщенные методы

Обобщенный метод объявляет параметры типа внутри сигнатуры метода.

С помощью обобщенных методов многие фундаментальные алгоритмы могут быть реализованы единственным универсальным способом. Ниже показан обобщенный метод, который меняет местами содержимое двух переменных любого типа `T`:

```

static void Swap<T> (ref T a, ref T b)
{
    T temp = a;
    a = b;
    b = temp;
}

```

Метод `Swap<T>` можно вызывать следующим образом:

```

int x = 5;
int y = 10;
Swap (ref x, ref y);

```

Как правило, предоставлять аргументы типа обобщенному методу нет нужды, поскольку компилятор способен неявно вывести тип. Если имеется неоднозначность, то обобщенные методы могут быть вызваны с аргументами типа:

```
Swap<int> (ref x, ref y);
```

Внутри обобщенного *типа* метод не классифицируется как обобщенный, если только он не *вводит* параметры типа (посредством синтаксиса с угловыми скобками). Метод *Pop* в нашем обобщенном стеке просто задействует существующий параметр типа *T* и не трактуется как обобщенный.

Методы и типы — единственные конструкции, в которых могут вводиться параметры типа. Свойства, индексаторы, события, поля, конструкторы, операции и т.д. не могут объявлять параметры типа, хотя способны пользоваться любыми параметрами типа, которые уже объявлены во включающем типе. В примере с обобщенным стеком можно было бы написать индексатор, который возвращает обобщенный элемент:

```
public T this [int index] => data [index];
```

Аналогично конструкторы также могут пользоваться существующими параметрами типа, но не *вводить* их:

```
public Stack<T>() { } // Не допускается
```

Объявление параметров типа

Параметры типа могут вводиться в объявлениях классов, структур, интерфейсов, делегатов (рассматриваются в главе 4) и методов. Другие конструкции, такие как свойства, не могут *вводить* параметры типа, но могут их *использовать*. Например, свойство *Value* использует *T*:

```
public struct Nullable<T>
{
    public T Value { get; }
}
```

Обобщенный тип или метод может иметь несколько параметров:

```
class Dictionary< TKey, TValue > { ... }
```

Вот как создать его экземпляр:

```
Dictionary<int, string> myDict = new Dictionary<int, string>();
```

Или:

```
var myDict = new Dictionary<int, string>();
```

Имена обобщенных типов и методов могут быть перегружены при условии, что количество параметров типа у них отличается. Например, показанные ниже три имени типа не конфликтуют друг с другом:

```
class A          {}
class A<T>      {}
class A<T1, T2> {}
```



По соглашению обобщенные типы и методы с *единственным* параметром типа обычно именуют его как `T`, если назначение параметра очевидно. В случае *нескольких* параметров типа каждый такой параметр имеет более описательное имя (с префиксом `T`).

Операция `typeof` и несвязанные обобщенные типы

Во время выполнения открытых обобщенных типов не существует: они закрываются на этапе компиляции. Однако во время выполнения возможно существование *несвязанного* (*unbound*) обобщенного типа — исключительно как объекта `Type`. Единственным способом указания несвязанного обобщенного типа в C# является применение операции `typeof`:

```
class A<T> {}
class A<T1,T2> {}
...
Type a1 = typeof (A<>);           // Несвязанный тип (обратите внимание
                                    // на отсутствие аргументов типа)
Type a2 = typeof (A<,>);          // При указании нескольких аргументов
                                    // типа используются запятые
```

Открытые обобщенные типы применяются в сочетании с API-интерфейсом рефлексии (см. главу 18).

Операцию `typeof` можно также использовать для указания закрытого типа:

```
Type a3 = typeof (A<int,int>);
```

или открытого типа (который закроется во время выполнения):

```
class B<T> { void X() { Type t = typeof (T); } }
```

Стандартное значение для параметра обобщенного типа

Чтобы получить стандартное значение для параметра обобщенного типа, можно применить ключевое слово `default`. Стандартным значением для ссылочного типа является `null`, а для типа значения — результат побитового обнуления полей в этом типе:

```
static void Zap<T> (T[] array)
{
    for (int i = 0; i < array.Length; i++)
        array[i] = default(T);
}
```

Начиная с версии C# 7.1, аргумент типа можно опускать в случаях, когда компилятор способен вывести его. Последнюю строку кода можно было бы заменить такой строкой:

```
array[i] = default;
```

Ограничения обобщений

По умолчанию параметр типа может быть замещен любым типом. Чтобы затребовать более специфичные аргументы типа, к параметру типа можно применить *ограничения*. Ниже перечислены возможные ограничения:

```
where T : базовый-класс      // Ограничение базового класса
where T : интерфейс          // Ограничение интерфейса
where T : class               // Ограничение ссылочного типа
where T : class? // (См. раздел "Ссылочные типы, допускающие null" в главе 4)
where T : struct              // Ограничение типа значения (исключает типы,
                             // допускающие null)
where T : unmanaged           // Ограничение неуправляемого кода
where T : new()                // Ограничение конструктора без параметров
where U : T                     // Неприкрытое ограничение типа
where T : notnull              // Тип значения, не допускающий null, или
                             // ссылочный тип, не допускающий null (начиная с версии C# 8)
```

В следующем примере `GenericClass<T, U>` требует, чтобы тип `T` был производным от класса `SomeClass` (либо идентичен ему) и реализовывал интерфейс `Interface1`, а тип `U` предоставлял конструктор без параметров:

```
class SomeClass {}
interface Interface1 {}

class GenericClass<T,U> where T : SomeClass, Interface1
                           where U : new()
{...}
```

Ограничения можно применять везде, где определены параметры типа, как в методах, так и в определениях типов.



Ограничение обеспечивает ограниченность; тем не менее, основной целью ограничений параметров типа является разрешение действий, которые в противном случае были бы запрещены.

Например, ограничение `T:Foo` позволяет обрабатывать экземпляры `T` как `Foo`, а ограничение `T:new()` разрешает создавать новые экземпляры `T`.

Ограничение базового класса указывает, что параметр типа должен быть подклассом заданного класса (или совпадать с ним); *ограничение интерфейса* указывает, что параметр типа должен реализовывать этот интерфейс. Такие ограничения позволяют экземплярам параметра типа быть неявно преобразуемыми в указанный класс или интерфейс. Например, пусть необходимо написать обобщенный метод `Max`, который возвращает большее из двух значений. Мы можем задействовать обобщенный интерфейс `IComparable<T>`, определенный в пространстве имен `System`:

```
public interface IComparable<T> // Упрощенная версия интерфейса
{
    int CompareTo (T other);
}
```

Метод CompareTo возвращает положительное число, если this больше other. Применяя данный интерфейс в качестве ограничения, мы можем написать метод Max следующим образом (чтобы не отвлекать внимания, проверка на null опущена):

```
static T Max <T> (T a, T b) where T : IComparable<T>
{
    return a.CompareTo (b) > 0 ? a : b;
}
```

Метод Max может принимать аргументы любого типа, реализующего интерфейс IComparable<T> (что включает большинство встроенных типов, таких как int и string):

```
int z = Max (5, 10); // 10
string last = Max ("ant", "zoo"); // zoo
```



Начиная с версии C# 11, ограничение интерфейса также позволяет получать доступ к статическим виртуальным/абстрактным членам этого интерфейса (см. раздел “Статические виртуальные/абстрактные члены интерфейсов” в главе 1). Например, если интерфейс IFoo определяет статический абстрактный метод по имени Bar, тогда ограничение T:IFoo делает допустимым вызов T.Bar(). В разделе “Статический полиморфизм” главы 4 мы продолжим данную тему.

Ограничение class и ограничение struct указывают, что T должен быть ссылочным типом или типом значения (не допускающим null). Хорошим примером ограничения struct является структура System.Nullable<T> (мы обсудим этот тип в разделе “Типы значений, допускающие null” главы 4):

```
struct Nullable<T> where T : struct {...}
```

Ограничение неуправляемого кода (появившееся в версии C# 7.3) представляет собой более строгую версию ограничения struct: тип T обязан быть простым типом значения или структурой, которая (рекурсивно) свободна от любых ссылочных типов.

Ограничение конструктора без параметров требует, чтобы тип T имел открытый конструктор без параметров и позволял вызывать операцию new на T:

```
static void Initialize<T> (T[] array) where T : new()
{
    for (int i = 0; i < array.Length; i++)
        array[i] = new T();
}
```

Неприкрытое ограничение типа требует, чтобы один параметр типа был производным от другого параметра типа (или совпадал с ним). В следующем примере метод FilteredStack возвращает другой экземпляр Stack, содержащий только подмножество элементов, в которых параметр типа U является параметром типа T:

```
class Stack<T>
{
    Stack<U> FilteredStack<U>() where U : T {...}
}
```

Создание подклассов для обобщенных типов

Подклассы для обобщенного класса можно создавать точно так же, как в случае необобщенного класса. Подкласс может оставлять параметры типа базового класса открытыми, как показано в следующем примере:

```
class Stack<T>      {...}
class SpecialStack<T> : Stack<T>  {...}
```

Либо же подкласс может закрывать параметры обобщенного типа посредством конкретного типа:

```
class IntStack : Stack<int>      {...}
```

Подкласс может также вводить новые аргументы типа:

```
class List<T>      {...}
class KeyedList<T, TKey> : List<T>  {...}
```



Формально *все* аргументы типа в подтипе являются свежими: можно сказать, что подтип закрывает и затем повторно открывает аргументы базового типа. Это значит, что подкласс может назначать аргументам типа новые (и потенциально более осмысленные) имена, когда повторно их открывает:

```
class List<T> {...}
class KeyedList<TElement, TKey> : List<TElement> {...}
```

Самоссылающиеся объявления обобщений

При закрытии аргумента типа тип может указывать *самого себя* в качестве конкретного типа:

```
public interface IEquatable<T> { bool Equals (T obj); }

public class Balloon : IEquatable<Balloon>
{
    public string Color { get; set; }
    public int CC { get; set; }

    public bool Equals (Balloon b)
    {
        if (b == null) return false;
        return b.Color == Color && b.CC == CC;
    }
}
```

Следующий код также допустим:

```
class Foo<T> where T : IComparable<T> { ... }
class Bar<T> where T : Bar<T> { ... }
```

Статические данные

Статические данные уникальны для каждого закрытого типа:

```
Console.WriteLine (++Bob<int>.Count);           // 1
Console.WriteLine (++Bob<int>.Count);           // 2
Console.WriteLine (++Bob<string>.Count);          // 1
Console.WriteLine (++Bob<object>.Count);          // 1

class Bob<T> { public static int Count; }
```

Параметры типа и преобразования

Операция приведения в C# может выполнять преобразования нескольких видов, включая:

- числовое преобразование;
- ссылочное преобразование;
- упаковывающее/распаковывающее преобразование;
- специальное преобразование (через перегрузку операций; см. главу 4).

Решение о том, какой вид преобразования произойдет, принимается *на этапе компиляции*, базируясь на известных типах операндов. Это создает интересный сценарий с параметрами обобщенного типа, т.к. точные типы операндов на этапе компиляции не известны. Если возникает неоднозначность, тогда компилятор генерирует сообщение об ошибке.

Наиболее распространенный сценарий связан с выполнением ссылочного преобразования:

```
StringBuilder Foo<T> (T arg)
{
    if (arg is StringBuilder)
        return (StringBuilder) arg;           // Не скомпилируется
    ...
}
```

Без знания фактического типа T компилятор предполагает, что вы намереваетесь выполнить *специальное преобразование*. Простейшим решением будет использование *взамен* операции as, которая не дает неоднозначности, т.к. не позволяет осуществлять специальные преобразования:

```
StringBuilder Foo<T> (T arg)
{
    StringBuilder sb = arg as StringBuilder;
    if (sb != null) return sb;
    ...
}
```

Более общее решение предусматривает приведение сначала к object. Такой подход работает, поскольку предполагается, что преобразования в/из object должны быть не специальными, а ссылочными или упаковывающими/распаковывающими. В данном случае StringBuilder является ссылочным типом, поэтому должно происходить ссылочное преобразование:

```
return (StringBuilder) (object) arg;
```

Распаковывающие преобразования также способны привносить неоднозначность. Показанное ниже преобразование может быть распаковывающим, числовым или специальным:

```
int Foo<T> (T x) => (int) x; // Ошибка на этапе компиляции
```

И снова решение заключается в том, чтобы сначала выполнить приведение к `object`, а затем к `int` (которое в данном случае однозначно сигнализирует о распаковывающем преобразовании):

```
int Foo<T> (T x) => (int) (object) x;
```

Ковариантность

Исходя из предположения, что тип А допускает преобразование в В, тип X имеет ковариантный параметр типа, если X<A> поддается преобразованию в X.



Согласно понятию ковариантности (и контравариантности) в языке C# формулировка “поддается преобразованию” означает возможность преобразования через *неявное ссылочное преобразование*, такое как *A является подклассом B* или *A реализует B*. Сюда не входят числовые преобразования, упаковывающие преобразования и специальные преобразования.

Например, тип `IFoo<T>` имеет ковариантный тип Т, если справедливо следующее:

```
IFoo<string> s = ...;  
IFoo<object> b = s;
```

Интерфейсы допускают ковариантные параметры типа (как это делают делегаты; см. главу 4), но классы — нет. Массивы также разрешают ковариантность (массив `A[]` может быть преобразован в `B[]`, если для `A` имеется ссылочное преобразование в `B`) и обсуждаются здесь ради сравнения.



Ковариантность и контравариантность (или просто “вариантность”) — сложные концепции. Мотивация, лежащая в основе введения и расширения вариантиности в C#, заключалась в том, чтобы позволить обобщенным интерфейсам и обобщенным типам (в частности, определенным в .NET, таким как `IEnumerable<T>`) работать более предсказуемым образом. Даже не понимая все детали ковариантности и контравариантности, вы можете извлечь из них выгоду.

Вариантность не является автоматической

Чтобы обеспечить статическую безопасность типов, параметры типа не определяются как вариантные автоматически. Рассмотрим приведенный ниже код:

```
class Animal {}  
class Bear : Animal {}  
class Camel : Animal {}
```

```
public class Stack<T>          // Простая реализация стека
{
    int position;
    T[] data = new T[100];
    public void Push (T obj)      => data[position++] = obj;
    public T Pop()               => data[--position];
}
```

Следующий код не скомпилируется:

```
Stack<Bear> bears = new Stack<Bear>();
Stack<Animal> animals = bears; // Ошибка на этапе компиляции
```

Это ограничение предотвращает возможность возникновения ошибки во время выполнения из-за такого кода:

```
animals.Push (new Camel());      // Попытка добавить объект Camel в bears
```

Тем не менее, отсутствие ковариантности может послужить препятствием повторному использованию. Предположим, что требуется написать метод Wash (мыть) для стека объектов, представляющих животных:

```
public class ZooCleaner
{
    public static void Wash (Stack<Animal> animals) {...}
```

Вызов метода Wash со стеком объектов представляющих медведей (bear), приведет к генерации ошибки на этапе компиляции. Один из обходных путей предполагает переопределение метода Wash с ограничением:

```
class ZooCleaner
{
    public static void Wash<T> (Stack<T> animals) where T : Animal { ... }
```

Теперь метод Wash можно вызывать следующим образом:

```
Stack<Bear> bears = new Stack<Bear>();
ZooCleaner.Wash (bears);
```

Другое решение состоит в том, чтобы обеспечить реализацию классом Stack<T> интерфейса с ковариантным параметром типа, как вскоре будет показано.

Массивы

По историческим причинам типы массивов поддерживают ковариантность. Это значит, что массив B[] может быть приведен к A[], если B является подклассом A (и оба они являются ссылочными типами). Например:

```
Bear[] bears = new Bear[3];
Animal[] animals = bears;           // Нормально
```

Недостаток такой возможности повторного использования заключается в том, что присваивание элементов может потерпеть неудачу во время выполнения:

```
animals[0] = new Camel();          // Ошибка во время выполнения
```

Объявление ковариантного параметра типа

Параметры типа в интерфейсах и делегатах могут быть объявлены как ковариантные путем их пометки с помощью модификатора `out`. Данный модификатор гарантирует, что в отличие от массивов ковариантные параметры типа будут полностью безопасными в отношении типов.

Мы можем проиллюстрировать сказанное на классе `Stack`, обеспечив реализацию им следующего интерфейса:

```
public interface IPoppable<out T> { T Pop(); }
```

Модификатор `out` для `T` указывает, что тип `T` применяется только в *выходных позициях* (например, в возвращаемых типах для методов). Модификатор `out` помечает параметр типа как *ковариантный* и разрешает написание такого кода:

```
var bears = new Stack<Bear>();
bears.Push (new Bear());
//bears реализует IPoppable<Bear>. Мы можем преобразовать bears в IPoppable<Animal>:
IPoppable<Animal> animals = bears; // Допустимо
Animal a = animals.Pop();
```

Преобразование `bears` в `animals` разрешено компилятором в силу того, что параметр типа является ковариантным. Преобразование безопасно в отношении типов, т.к. сценарий, от которого компилятор пытается уклониться (помещение объекта `Camel` в стек), возникнуть не может, поскольку нет способа передать `Camel` в интерфейс, где `T` может встречаться только в *выходных позициях*.



Ковариантность (и контравариантность) в интерфейсах — это то, что обычно *потребляется*: необходимость в *написании* вариантовых интерфейсов возникает реже.



Любопытно, что параметры метода, помеченные как `out`, не подходят для ковариантности из-за ограничения в среде CLR.

Возможность ковариантного приведения можно задействовать для решения описанной ранее проблемы повторного использования:

```
public class ZooCleaner
{
    public static void Wash (IPoppable<Animal> animals) { ... }
```



Интерфейсы `IEnumerable<T>` и `IEnumerator<T>`, описанные в главе 7, имеют ковариантный параметр типа `T`, что позволяет приводить `IEnumerable<string>`, например, к `IEnumerable<object>`.

Компилятор генерирует ошибку, если ковариантный параметр типа применяется во *входной* позиции (скажем, в параметре метода или в записываемом свойстве).



Ковариантность (и контравариантность) работают только для элементов со *ссылочными* — не *упаковывающими* — преобразованиями. (Это применимо как к вариантиности параметров типа, так и к вариантиности массивов.) Таким образом, если имеется метод, который принимает параметр типа `IPoppable<object>`, то его можно вызывать с `IPoppable<string>`, но не с `IPoppable<int>`.

Контравариантность

Как было показано ранее, если предположить, что A разрешает неявное ссылочное преобразование в B, то тип X имеет ковариантный параметр типа, когда `X<A>` допускает ссылочное преобразование в `X`. Контравариантность существует в случае, если возможно преобразование в обратном направлении — из `X` в `X<A>`. Это поддерживается, когда параметр типа встречается только во *входных* позициях, и обозначается с помощью модификатора `in`. Продолжая предыдущий пример, пусть класс `Stack<T>` реализует следующий интерфейс:

```
public interface IPushable<in T> { void Push (T obj); }
```

Теперь вполне законно поступать так:

```
IPushable<Animal> animals = new Stack<Animal>();  
IPushable<Bear> bears = animals; // Допустимо  
bears.Push (new Bear());
```

Ни один из членов `IPushable` не содержит тип `T` в *выходной* позиции, а потому никаких проблем с приведением `animals` к `bears` не возникает (например, данный интерфейс не поддерживает метод `Pop`).



Класс `Stack<T>` может реализовывать оба интерфейса, `IPushable<T>` и `IPoppable<T>`, несмотря на то, что тип `T` в указанных двух интерфейсах имеет противоположные модификаторы вариантиности! Причина в том, что вариантиность должна использоваться через интерфейс, а не через класс; следовательно, перед выполнением вариантиного преобразования его потребуется пропустить сквозь призму либо `IPoppable`, либо `IPushable`. В результате вы будете ограничены только операциями, которые допускаются соответствующими правилами вариантиности.

Это также показывает, почему *классам* не позволено иметь вариантные параметры типа: конкретные реализации обычно требуют про текания данных в обоих направлениях.

Для другого примера необходим следующий интерфейс, который определен в пространстве имен `System`:

```
public interface IComparer<in T>  
{  
    // Возвращает значение, отражающее относительный порядок a и b  
    int Compare (T a, T b);  
}
```

Поскольку интерфейс имеет контравариантный параметр типа T, мы можем применять IComparer<object> для сравнения двух строк:

```
var objectComparer = Comparer<object>.Default;
// objectComparer реализует IComparer<object>
IComparer<string> stringComparer = objectComparer;
int result = stringComparer.Compare ("Brett", "Jemaine");
```

Зеркально отражая ковариантность, компилятор сообщит об ошибке, если вы попытаетесь использовать контравариантный параметр типа в выходной позиции (скажем, в качестве возвращаемого значения или в читаемом свойстве).

Сравнение обобщений C# и шаблонов C++

Обобщения C# в использовании похожи на шаблоны C++, но работают они совершенно по-другому. В обоих случаях должен осуществляться синтез между поставщиком и потребителем, при котором типы-заполнители заполняются потребителем. Однако в ситуации с обобщениями C# типы поставщика (т.е. открытые типы вроде List<T>) могут быть скомпилированы в библиотеку (такую как mscorelib.dll). Дело в том, что собственно синтез между поставщиком и потребителем, который создает закрытые типы, в действительности не происходит вплоть до времени выполнения. Для шаблонов C++ такой синтез производится на этапе компиляции. Это значит, что в C++ развертывать библиотеки шаблонов как сборки .dll не получится — они существуют только в виде исходного кода. Вдобавок также затрудняется динамическое инспектирование параметризованных типов, не говоря уже об их создании на лету.

Чтобы лучше понять, почему сказанное справедливо, давайте взглянем на метод Max в C#:

```
static T Max <T> (T a, T b) where T : IComparable<T>
    => a.CompareTo (b) > 0 ? a : b;
```

Почему бы ни реализовать метод Max следующим образом:

```
static T Max <T> (T a, T b)
    => (a > b ? a : b); // Ошибка на этапе компиляции
```

Причина в том, что метод Max должен быть скомпилирован один раз, но работать для всех возможных значений T. Компиляция не может пройти успешно ввиду отсутствия единого смысла операции > для всех значений T — на самом деле операция > может быть доступна далеко не в каждом типе T. Для сравнения ниже показан код того же метода Max, написанный с применением шаблонов C++. Такой код будет компилироваться отдельно для каждого значения T, пользуясь семантикой > для конкретного типа T и приводя к ошибке на этапе компиляции, если отдельный тип T не поддерживает операцию >:

```
template <class T> T Max (T a, T b)
{
    return a > b ? a : b;
}
```




Дополнительные средства языка C#

В настоящей главе будут раскрыты более сложные аспекты языка C#, которые основаны на концепциях, исследованных в главах 2 и 3. Первые четыре раздела необходимо читать последовательно, а остальные — в произвольном порядке.

Делегаты

Делегат — это объект, которому известно, как вызывать некий метод.

Тип делегата определяет вид метода, который могут вызывать экземпляры делегата. В частности он определяет *возвращаемый тип* и *типы параметров* метода. Ниже показано определение типа делегата по имени Transformer:

```
delegate int Transformer (int x);
```

Делегат Transformer совместим с любым методом, который имеет возвращаемый тип int и принимает единственный параметр int, вроде следующего:

```
int Square (int x) { return x * x; }
```

или более сжато:

```
int Square (int x) => x * x;
```

Присваивание метода переменной делегата создает экземпляр делегата:

```
Transformer t = Square;
```

Экземпляр делегата можно вызывать тем же способом, что и метод:

```
int answer = t(3); // answer получает значение 9
```

Вот завершенный пример:

```
Transformer t = Square; // Создание экземпляра делегата
int result = t(3); // Вызов делегата
Console.WriteLine (result); // 9
int Square (int x) => x * x;
delegate int Transformer (int x); // Объявление типа делегата
```

Экземпляр делегата действует в вызывающем компоненте буквально как посредник: вызывающий компонент обращается к делегату, после чего делегат вызывает целевой метод. Такая косвенность отвязывает вызывающий компонент от целевого метода.

Оператор:

Transformer t = Square;

является сокращением следующего оператора:

Transformer t = new Transformer (Square);



Формально когда мы ссылаемся на Square без скобок или аргументов, то указываем *группу методов*. Если метод перегружен, тогда компилятор C# выберет корректную перегруженную версию на основе сигнатуры делегата, которому Square присваивается.

Выражение:

t(3)

представляет собой сокращение такого вызова:

t.Invoke(3)



Делегат похож на *обратный вызов* — общий термин, который охватывает конструкции вроде указателей на функции С.

Написание подключаемых методов с помощью делегатов

Метод присваивается переменной делегата во время выполнения, что удобно при написании подключаемых методов. В следующем примере присутствует служебный метод по имени Transform, который применяет трансформацию к каждому элементу в целочисленном массиве. Метод Transform имеет параметр делегата, предназначенный для указания подключаемой трансформации:

```
int[] values = { 1, 2, 3 };
Transform (values, Square);           // Привязаться к методу Square
foreach (int i in values)
    Console.Write (i + " ");
// 1 4 9
void Transform (int[] values, Transformer t)
{
    for (int i = 0; i < values.Length; i++)
        values[i] = t(values[i]);
}
int Square (int x) => x * x;
int Cube (int x) => x * x * x;
delegate int Transformer (int x);
```

Мы можем изменить трансформацию, просто поменяв Square на Cube во второй строке кода.

Наш метод Transform является *функцией более высокого порядка*, потому что получает в качестве аргумента функцию. (Метод, который *возвращает* делегат, тоже будет функцией более высокого порядка.)

Целевые методы экземпляра и статические целевые методы

Целевой метод делегата может быть локальным, статическим или методом экземпляра. Ниже демонстрируется использование статического целевого метода:

```
Transformer t = Test.Square;
Console.WriteLine (t(10));                                // 100
class Test { public static int Square (int x) => x * x; }
delegate int Transformer (int x);
```

А так применяется целевой метод экземпляра:

```
Test test = new Test();
Transformer t = test.Square;
Console.WriteLine (t(10));                                // 100
class Test { public int Square (int x) => x * x; }
delegate int Transformer (int x);
```

Когда объекту делегата присваивается метод экземпляра, объект делегата поддерживает ссылку не только на данный метод, но также на экземпляр, которому метод принадлежит. Этот экземпляр представляет свойство Target класса System.Delegate (которое будет иметь значение null для делегата, ссылающегося на статический метод). Вот пример:

```
MyReporter r = new MyReporter();
r.Prefix = "%Complete: ";
ProgressReporter p = r.ReportProgress;
p(99);                                                 // %Complete: 99
Console.WriteLine (p.Target == r);                      // True
Console.WriteLine (p.Method);                           // void ReportProgress(Int32)
r.Prefix = "";
p(99);                                                 // 99
public delegate void ProgressReporter (int percentComplete);
class MyReporter
{
    public string Prefix = "";
    public void ReportProgress (int percentComplete)
        => Console.WriteLine (Prefix + percentComplete);
}
```

Поскольку экземпляр сохраняется в свойстве Target делегата, его время жизни расширяется (по крайней мере) до времени жизни самого делегата.

Групповые делегаты

Все экземпляры делегатов обладают возможностью *группового вызова* (multicast), т.е. экземпляр делегата может ссылаться не только на одиничный целевой метод, но также и на список целевых методов. Экземпляры делегатов комбинируются с помощью операций + и +=:

```
SomeDelegate d = SomeMethod1;
d += SomeMethod2;
```

Последняя строка функционально эквивалентна следующей строке:

```
d = d + SomeMethod2;
```

Обращение к d теперь приведет к вызову методов SomeMethod1 и SomeMethod2. Делегаты вызываются в порядке, в котором они добавлялись.

Операции - и -= удаляют правый операнд делегата из левого операнда делегата. Например:

```
d -= SomeMethod1;
```

Обращение к d теперь приведет к вызову только метода SomeMethod2.

Использование операции + или += с переменной делегата, имеющей значение null, допустимо и эквивалентно присваиванию этой переменной нового значения:

```
SomeDelegate d = null;
```

```
d += SomeMethod1; //Когда d равно null, эквивалентно оператору d = SomeMethod1;
```

Аналогичным образом применение операции -= к переменной делегата с единственным целевым методом эквивалентно присваиванию этой переменной значения null.



Делегаты являются *неизменяемыми*, так что в случае использования операции += или -= фактически создается *новый* экземпляр делегата и присваивается существующей переменной.

Если групповой делегат имеет возвращаемый тип, отличающийся от void, тогдазывающий компонент получает возвращаемое значение из последнего вызванного метода. Предшествующие методы по-прежнему вызываются, но их возвращаемые значения отбрасываются. В большинстве сценариев применения групповые делегаты имеют возвращаемые типы void, так что описанная тонкая ситуация не возникает.



Все типы делегатов неявно порождены от класса System.MulticastDelegate, который унаследован от System.Delegate. Операции +, -, += и -=, выполняемые над делегатом, транслируются в вызовы статических методов Combine и Remove класса System.Delegate.

Пример группового делегата

Предположим, что вы написали метод, выполнение которого занимает длительное время. Такой метод мог бы регулярно сообщать о ходе работ вызывающему компоненту, обращаясь к делегату. В следующем примере метод HardWork имеет параметр делегата ProgressReporter, который вызывается для отражения хода работ:

```
public delegate void ProgressReporter (int percentComplete);  
public class Util  
{
```

```

public static void HardWork (ProgressReporter p)
{
    for (int i = 0; i < 10; i++)
    {
        p (i * 10);                                // Вызвать делегат
        System.Threading.Thread.Sleep (100);        // Эмулировать длительную работу
    }
}

```

Для мониторинга хода работ метод Main создает экземпляр группового делегата p, так что ход работ отслеживается двумя независимыми методами:

```

ProgressReporter p = WriteProgressToConsole;
p += WriteProgressToFile;
Util.HardWork (p);

void WriteProgressToConsole (int percentComplete)
    => Console.WriteLine (percentComplete);

void WriteProgressToFile (int percentComplete)
    => System.IO.File.WriteAllText ("progress.txt",
                                    percentComplete.ToString ());

```

Обобщенные типы делегатов

Тип делегата может содержать параметры обобщенного типа:

```
public delegate T Transformer<T> (T arg);
```

Располагая таким определением, можно написать обобщенный служебный метод Transform, который работает с любым типом:

```

int[] values = { 1, 2, 3 };
Util.Transform (values, Square); // Привязаться к методу Square
foreach (int i in values)
    Console.Write (i + " ");           // 1 4 9

int Square (int x) => x * x;

public class Util
{
    public static void Transform<T> (T[] values, Transformer<T> t)
    {
        for (int i = 0; i < values.Length; i++)
            values[i] = t (values[i]);
    }
}

```

Делегаты Func и Action

Благодаря обобщенным делегатам становится возможным написание небольшого набора типов делегатов, которые настолько универсальны, что способны работать с методами, имеющими любой возвращаемый тип и любое (разумное) количество аргументов. Такими делегатами являются Func и Action, определенные в пространстве имен System (модификаторы in и out указывают *вариантность*, которая вскоре будет раскрыта в контексте делегатов):

```

delegate TResult Func <out TResult>();  

delegate TResult Func <in T, out TResult> (T arg);  

delegate TResult Func <in T1, in T2, out TResult> (T1 arg1, T2 arg2);  

... и так далее вплоть до T16  

delegate void Action();  

delegate void Action <in T> (T arg);  

delegate void Action <in T1, in T2> (T1 arg1, T2 arg2);  

... и так далее вплоть до T16

```

Показанные делегаты исключительно универсальны. Делегат Transformer в предыдущем примере может быть заменен делегатом Func, который принимает один аргумент типа T и возвращает значение того же самого типа:

```

public static void Transform<T> (T[] values, Func<T,T> transformer)  

{
    for (int i = 0; i < values.Length; i++)
        values[i] = transformer (values[i]);
}

```

Делегаты Func и Action не покрывают лишь практические сценарии, связанные с параметрами ref/out и параметрами указателей.



Когда язык C# только появился, делегаты Func и Action отсутствовали (поскольку не было обобщений). Именно по указанной исторической причине в большей части .NET используются специальные типы делегатов, а не Func и Action.

Сравнение делегатов и интерфейсов

Задачу, которую можно решить с помощью делегата, вполне реально решить также посредством интерфейса. Мы можем переписать исходный пример, применяя вместо делегата интерфейс ITransformer:

```

int[] values = { 1, 2, 3 };
Util.TransformAll (values, new Squarer ());
foreach (int i in values)
    Console.WriteLine (i);
public interface ITransformer
{
    int Transform (int x);
}
public class Util
{
    public static void TransformAll (int[] values, ITransformer t)
    {
        for (int i = 0; i < values.Length; i++)
            values[i] = t.Transform (values[i]);
    }
}
class Squarer : ITransformer
{
    public int Transform (int x) => x * x;
}

```

Решение на основе делегатов может оказаться более удачным, чем решение на основе интерфейсов, если соблюдено одно или более следующих условий:

- в интерфейсе определен только один метод;
- требуется возможность группового вызова;
- подписчик нуждается в многократной реализации интерфейса.

В примере с `ITransformer` групповой вызов не нужен. Однако в интерфейсе определен только один метод. Более того, подписчику может потребоваться многократная реализация интерфейса `ITransformer` для поддержки разнообразных трансформаций наподобие возведения в квадрат или куб. В случае интерфейсов нам придется писать отдельный тип для каждой трансформации, т.к. класс может реализовывать `ITransformer` только один раз. В результате получается довольно громоздкий код:

```
int[] values = { 1, 2, 3 };
Util.TransformAll (values, new Cuber ());
foreach (int i in values)
    Console.WriteLine (i);

class Squarer : ITransformer
{
    public int Transform (int x) => x * x;
}

class Cuber : ITransformer
{
    public int Transform (int x) => x * x * x;
}
```

Совместимость делегатов

Совместимость типов

Все типы делегатов несовместимы друг с другом, даже если они имеют одинаковые сигнатуры:

```
D1 d1 = Method1;
D2 d2 = d1;                                // Ошибка на этапе компиляции

void Method1() { }
delegate void D1();
delegate void D2();
```



Однако следующий код разрешен:

```
D2 d2 = new D2 (d1);
```

Экземпляры делегатов считаются равными, если они имеют одинаковые целевые методы:

```
D d1 = Method1;
D d2 = Method1;
Console.WriteLine (d1 == d2);      // True

void Method1() { }
delegate void D();
```

Групповые делегаты считаются равными, если они ссылаются на те же самые методы в одинаковом порядке.

Совместимость параметров

При вызове метода можно предоставлять аргументы, которые относятся к более специфичным типам, нежели те, что определены для параметров данного метода. Это обычное полиморфное поведение. По той же причине делегат может иметь более специфичные типы параметров, чем его целевой метод. Это называется **контравариантностью**. Вот пример:

```
StringAction sa = new StringAction (ActOnObject);
sa ("hello");
void ActOnObject (object o) => Console.WriteLine (o); // hello
delegate void StringAction (string s);
```

(Как и с варианностью параметров типа, делегаты являются вариантными только для *ссыпочных преобразований*.)

Делегат просто вызывает метод от имени кого-то другого. В таком случае `StringAction` вызывается с аргументом типа `string`. Когда аргумент затем передается целевому методу, он неявно приводится вверх к типу `object`.



Стандартный шаблон событий спроектирован для того, чтобы помочь задействовать контравариантность через использование общего базового класса `EventArgs`. Например, можно иметь единственный метод, который вызывается двумя разными делегатами с передачей одному объекта `MouseEventArgs`, а другому — `KeyEventArgs`.

Совместимость возвращаемых типов

В результате вызова метода можно получить обратно тип, который является более специфическим, чем запрошенный. Так выглядит обыкновенное полиморфное поведение. По той же самой причине целевой метод делегата может возвращать более специфический тип, чем описанный самим делегатом. Это называется **ковариантностью**:

```
ObjectRetriever o = new ObjectRetriever (RetrieveString);
object result = o();
Console.WriteLine (result); // hello
string RetrieveString() => "hello";
delegate object ObjectRetriever();
```

Делегат `ObjectRetriever` ожидает получить обратно `object`, но может быть получен также и *подкласс* `object`, потому что возвращаемые типы делегатов **ковариантны**.

Вариантность параметров типа обобщенного делегата

В главе 3 было показано, что обобщенные интерфейсы поддерживают ковариантные и контравариантные параметры типа. Та же самая возможность существует и для делегатов.

При определении обобщенного типа делегата рекомендуется поступать следующим образом:

- помечать параметр типа, применяемый только для возвращаемого значения, как ковариантный (*out*);
- помечать любой параметр типа, используемый только для параметров, как контравариантный (*in*).

В результате преобразования смогут работать естественным образом, соблюдая отношения наследования между типами.

Показанный ниже делегат (определенный в пространстве имен *System*) имеет ковариантный параметр *TResult*:

```
delegate void Action<in T> (T arg);
```

позволяя записывать так:

```
Func<string> x = ...;
Func<object> y = x;
```

Следующий делегат (определенный в пространстве имен *System*) имеет контравариантный параметр *T*:

```
delegate void Action<in T> (T arg);
```

делая возможным такой код:

```
Action<object> x = ...;
Action<string> y = x;
```

События

Во время применения делегатов обычно возникают две независимые роли: *ретранслятор* (*broadcaster*) и *подписчик* (*subscriber*).

Ретранслятор — это тип, который содержит поле делегата. Ретранслятор решает, когда делать передачу, вызывая делегат.

Подписчики — это целевые методы-получатели. Подписчик решает, когда начинать и останавливать прослушивание, используя операции *+ =* и *- =* на делегате ретранслятора. Подписчик ничего не знает о других подписчиках и не вмешивается в их работу.

События являются языковым средством, которое формализует описанный шаблон. Конструкция *event* открывает только подмножество возможностей делегата, требуемое для модели “ретранслятор/подписчик”. Основное назначение событий заключается в *предотвращении влияния подписчиков друг на друга*.

Простейший способ объявления события предусматривает помещение ключевого слова *event* перед членом делегата:

```
// Определение делегата
public delegate void PriceChangedHandler (decimal oldPrice, decimal newPrice);
public class Broadcaster
{
    // Объявление события
    public event PriceChangedHandler PriceChanged;
}
```

Код внутри типа `Broadcaster` имеет полный доступ к члену `PriceChanged` и может трактовать его как делегат. Код за пределами `Broadcaster` может только выполнять операции `+=` и `-=` над событием `PriceChanged`.

Внутренняя работа событий

При объявлении показанного ниже события “за кулисами” происходят три действия:

```
public class Broadcaster
{
    public event PriceChangedHandler PriceChanged;
}
```

Во-первых, компилятор транслирует объявление события в примерно такой код:

```
PriceChangedHandler priceChanged; // закрытый делегат
public event PriceChangedHandler PriceChanged
{
    add { priceChanged += value; }
    remove { priceChanged -= value; }
}
```

Ключевыми словами `add` и `remove` обозначаются явные средства доступа к событию, которые работают аналогично средствам доступа к свойству. Позже мы покажем, как их реализовать.

Во-вторых, компилятор ищет *внутри* класса `Broadcaster` ссылки на `PriceChanged`, в которых выполняются операции, отличающиеся от `+=` или `-=`, и переадресует их на лежащее в основе поле делегата `priceChanged`.

В-третьих, компилятор транслирует операции `+=` и `-=`, примененные к событию, в вызовы средств доступа `add` и `remove` события. Интересно, что это делает поведение операций `+=` и `-=` уникальным в случае применения к событиям: в отличие от других сценариев они не являются просто сокращением для операций `+` и `-`, за которыми следует операция присваивания.

Рассмотрим следующий пример. Класс `Stock` запускает свое событие `PriceChanged` каждый раз, когда изменяется свойство `Price` данного класса:

```
public delegate void PriceChangedHandler (decimal oldPrice,
                                         decimal newPrice);

public class Stock
{
    string symbol;
    decimal price;

    public Stock (string symbol) => this.symbol = symbol;
    public event PriceChangedHandler PriceChanged;
    public decimal Price
    {
```

```

get => price;
set
{
    if (price == value) return;           // Выйти, если ничего не изменилось
    decimal oldPrice = price;
    price = value;

    if (PriceChanged != null)           // Если список вызова не пуст,
        PriceChanged (oldPrice, price); // тогда запустить событие
}
}
}
}

```

Если в приведенном примере убрать ключевое слово `event`, чтобы `PriceChanged` превратилось в обычное поле делегата, то результаты окажутся теми же самыми. Но класс `Stock` станет менее надежным до такой степени, что подписчики смогут предпринимать следующие действия, влияя друг на друга.

- Заменять других подписчиков, переустанавливая `PriceChanged` (вместо использования операции `+=`).
- Очищать всех подписчиков (устанавливая `PriceChanged` в `null`).
- Выполнять групповую рассылку другим подписчикам путем вызова делегата.

Стандартный шаблон событий

Почти во всех сценариях, для которых определяются события в библиотеках .NET, их определение придерживается стандартного шаблона, предназначенного для обеспечения согласованности между библиотекой и пользовательским кодом. В основе стандартного шаблона событий лежит `System.EventArgs` — предопределенный класс .NET, имеющий только статическое поле `Empty`. Базовый класс `EventArgs` позволяет передавать информацию событию. В рассматриваемом примере `Stock` мы создаем подкласс `EventArgs` для передачи старого и нового значений цены, когда инициируется событие `PriceChanged`:

```

public class PriceChangedEventArgs : System.EventArgs
{
    public readonly decimal LastPrice;
    public readonly decimal NewPrice;

    public PriceChangedEventArgs (decimal lastPrice, decimal newPrice)
    {
        LastPrice = lastPrice;
        NewPrice = newPrice;
    }
}

```

Ради многократного использования подкласс `EventArgs` именован в соответствии с содержащейся в нем информацией (а не с событием, для которого он будет применяться). Обычно он открывает доступ к данным как к свойствам или полям, предназначенным только для чтения.

Имея подкласс EventArgs, далее потребуется выбрать или определить делегат для события согласно следующим трем правилам.

- Он обязан иметь возвращаемый тип void.
- Он должен принимать два аргумента: первый — object и второй — подкласс EventArgs. Первый аргумент указывает ретранслятор события, а второй аргумент содержит дополнительную информацию для передачи событию.
- Его имя должно заканчиваться на EventHandler.

В .NET определен обобщенный делегат по имени System.EventHandler<>, который соответствует этому:

```
public delegate void EventHandler<TEventArgs>
    (object source, TEventArgs e) where TEventArgs : EventArgs;
```



До появления в языке обобщений (до выхода версии C# 2.0) взамен необходимо было записывать специальный делегат следующего вида:

```
public delegate void PriceChangedHandler
    (object sender, PriceChangedEventArgs e);
```

По историческим причинам большинство событий внутри библиотек .NET используют делегаты, определенные подобным образом.

Следующий шаг — определение события выбранного типа делегата. В приведенном ниже коде применяется обобщенный делегат EventHandler:

```
public class Stock
{
    ...
    public event EventHandler<PriceChangedEventArgs> PriceChanged;
}
```

В заключение шаблон требует написания защищенного виртуального метода, который запускает событие. Имя такого метода должно совпадать с именем события, предваренным словом On, и он должен принимать единственный аргумент EventArgs:

```
public class Stock
{
    ...
    public event EventHandler<PriceChangedEventArgs> PriceChanged;
    protected virtual void OnPriceChanged (PriceChangedEventArgs e)
    {
        if (PriceChanged != null) PriceChanged (this, e);
    }
}
```



Чтобы надежно работать в многопоточных сценариях (см. главу 14), делегат необходимо присваивать временной переменной перед его проверкой и вызовом:

```
var temp = PriceChanged;
if (temp != null) temp (this, e);
```

Мы можем получить ту же самую функциональность и без переменной temp с помощью null-условной операции:

```
PriceChanged?.Invoke (this, e);
```

По причине безопасности к потокам и лаконичности это наилучший и общепринятый способ вызова событий.

В результате мы имеем центральную точку, из которой подклассы могут вызывать или переопределять событие (предполагая, что класс не запечатан).

Ниже приведен полный код примера:

```
using System;

Stock stock = new Stock ("THPW");
stock.Price = 27.10M;
// Зарегистрировать с событием PriceChanged
stock.PriceChanged += stock_PriceChanged;
stock.Price = 31.59M;
void stock_PriceChanged (object sender, PriceChangedEventArgs e)
{
    // Предупреждение об увеличении биржевого курса на 10%
    if ((e.NewPrice - e.LastPrice) / e.LastPrice > 0.1M)
        Console.WriteLine ("Alert, 10% stock price increase!");
}

public class PriceChangedEventArgs : EventArgs
{
    public readonly decimal LastPrice;
    public readonly decimal NewPrice;
    public PriceChangedEventArgs (decimal lastPrice, decimal newPrice)
    {
        LastPrice = lastPrice; NewPrice = newPrice;
    }
}
public class Stock
{
    string symbol;
    decimal price;
    public Stock (string symbol) => this.symbol = symbol;
    public event EventHandler<PriceChangedEventArgs> PriceChanged;
    protected virtual void OnPriceChanged (PriceChangedEventArgs e)
    {
        PriceChanged?.Invoke (this, e);
    }
    public decimal Price
    {
        get => price;
```

```

    set
    {
        if (price == value) return;
        decimal oldPrice = price;
        price = value;
        OnPriceChanged (new PriceChangedEventArgs (oldPrice, price));
    }
}
}

```

Когда событие не несет в себе дополнительной информации, можно использовать предопределенный необобщенный делегат `EventHandler`. Мы перепишем код класса `Stock` так, чтобы событие `PriceChanged` инициировалось после изменения цены, причем какая-либо информация о событии не требуется — необходимо сообщить лишь о самом факте его возникновения. Мы также будем применять свойство `EventArgs.Empty`, чтобы избежать ненужного создания экземпляра `EventArgs`:

```

public class Stock
{
    string symbol;
    decimal price;
    public Stock (string symbol) { this.symbol = symbol; }
    public event EventHandler PriceChanged;
    protected virtual void OnPriceChanged (EventArgs e)
    {
        PriceChanged?.Invoke (this, e);
    }
    public decimal Price
    {
        get { return price; }
        set
        {
            if (price == value) return;
            price = value;
            OnPriceChanged (EventArgs.Empty);
        }
    }
}

```

Средства доступа к событию

Средства доступа к событию представляют собой реализации его операций `+=` и `-=`. По умолчанию средства доступа реализуются неявно компилятором. Взгляните на следующее объявление события:

```
public event EventHandler PriceChanged;
```

Компилятор преобразует его в перечисленные ниже компоненты:

- в закрытое поле делегата;
- в пару открытых функций доступа к событию (`add_PriceChanged` и `remove_PriceChanged`), реализации которых переадресуют операции `+=` и `-=` закрытому полю делегата.

Контроль над процессом преобразования можно взять на себя, определив *явные* средства доступа. Вот как выглядит ручная реализация события PriceChanged из предыдущего примера:

```
private EventHandler priceChanged; // Объявить закрытый делегат
public event EventHandler PriceChanged
{
    add { priceChanged += value; }
    remove { priceChanged -= value; }
}
```

Приведенный пример функционально идентичен стандартной реализации средств доступа C# (за исключением того, что C# также обеспечивает безопасность в отношении потоков во время обновления делегата через свободный от блокировок алгоритм сравнения и обмена; см. <http://albahari.com/threading>). Определяя средства доступа к событию самостоятельно, мы указываем компилятору C# на то, что генерировать стандартное поле и логику средств доступа не требуется.

- С помощью явных средств доступа к событию можно применять более сложные стратегии хранения и обращения к лежащему в основе делегату. Ниже описаны три сценария, в которых это полезно.
- Когда средства доступа к событию просто поручают другому классу групповую передачу события.
- Когда класс открывает доступ ко многим событиям, для которых большую часть времени существует очень мало подписчиков, как в случае элемента управления Windows. В таких ситуациях лучше хранить экземпляры делегатов подписчиков в словаре, т.к. со словарем связаны меньшие накладные расходы по хранению, чем с десятками ссылок null на поля делегатов.
- Когда явно реализуется интерфейс, в котором объявлено событие.

Рассмотрим пример, иллюстрирующий последний сценарий:

```
public interface IFoo { event EventHandler Ev; }
class Foo : IFoo
{
    private EventHandler ev;
    event EventHandler IFoo.Ev
    {
        add { ev += value; }
        remove { ev -= value; }
    }
}
```



Части add и remove события транслируются в методы add_XXX и remove_XXX.

Модификаторы событий

Как и методы, события могут быть виртуальными, переопределеными, абстрактными или запечатанными. События также могут быть статическими:

```
public class Foo
{
    public static event EventHandler<EventArgs> StaticEvent;
    public virtual event EventHandler<EventArgs> VirtualEvent;
}
```

Лямбда-выражения

Лямбда-выражение — это неименованный метод, записанный вместо экземпляра делегата. Компилятор немедленно преобразует лямбда-выражение в одну из следующих двух конструкций.

- Экземпляр делегата.
- Дерево выражения, которое имеет тип `Expression<TDelegate>` и представляет код внутри лямбда-выражения в виде объектной модели, поддерживающей обход. Дерево выражения позволяет интерпретировать лямбда-выражение позже во время выполнения (см. раздел “Построение выражений запросов” в главе 8).

В показанном ниже примере лямбда-выражением является `x => x * x`:

```
Transformer sqr = x => x * x;
Console.WriteLine (sqr(3));      // 9
delegate int Transformer (int i);
```



Внутренне компилятор преобразует лямбда-выражение данного типа в закрытый метод, телом которого будет код выражения.

Лямбда-выражение имеет следующую форму:

(параметры) => выражение-или-блок-операторов

Для удобства круглые скобки можно опускать, но только в ситуации, когда есть в точности один параметр выводимого типа.

В нашем примере присутствует единственный параметр `x`, а выражением является `x * x`:

```
x => x * x;
```

Каждый параметр лямбда-выражения соответствует параметру делегата, а тип выражения (которым может быть `void`) — возвращаемому типу этого делегата. В данном примере `x` соответствует параметру `i`, а выражение `x * x` — возвращаемому типу `int` и потому оно совместимо с делегатом `Transformer`:

```
delegate int Transformer (int i);
```

Код лямбда-выражения может быть блоком операторов, а не выражением. Мы можем переписать пример следующим образом:

```
x => { return x * x; };
```

Лямбда-выражения чаще всего применяются с делегатами Func и Action, так что приведенное ранее выражение вы будете регулярно встречать в такой форме:

```
Func<int,int> sqr = x => x * x;
```

Ниже показан пример выражения, которое принимает два параметра:

```
Func<string,string,int> totalLength = (s1, s2) => s1.Length + s2.Length;  
int total = totalLength ("hello", "world"); // total равно 10
```

Если использовать параметры не нужно, тогда их можно *отбрасывать* с помощью символа подчеркивания (начиная с версии C# 9):

```
Func<string,string,int> totalLength = (_,_) => ...
```

Вот пример выражения, которое вообще не принимает аргументов:

```
Func<string> greeter = () => "Hello, world";
```

Начиная с версии C# 10, компилятор разрешает неявную типизацию с помощью лямбда-выражений, которую можно распознать посредством делегатов Func и Action, поэтому данный оператор можно сократить следующим образом:

```
var greeter = () => "Hello, world";
```

Явное указание типов параметров и возвращаемого типа лямбда-выражения

Компилятор обычно способен *выводить* типы параметров лямбда-выражения из контекста. Когда это не так, вы должны явно указывать тип для каждого параметра. Взгляните на следующие два метода:

```
void Foo<T> (T x) {}  
void Bar<T> (Action<T> a) {}
```

Приведенный далее код не скомпилируется, потому что компилятор не сможет вывести тип x:

```
Bar (x => Foo (x)); // Какой тип имеет x?
```

Исправить ситуацию можно явным указанием типа x следующим образом:

```
Bar ((int x) => Foo (x));
```

Рассматриваемый пример довольно прост и может быть исправлен еще двумя способами:

```
Bar<int> (x => Foo (x)); // Указать параметр типа для Bar  
Bar<int> (Foo); // Как и выше, но использовать группу методов
```

В следующем примере иллюстрируется еще одно использование явных типов параметров (начиная с версии C# 10):

```
var sqr = (int x) => x * x;
```

Компилятор выводит для sqr тип Func<int,int>. (Без указания int неявная типизация завершится неудачей: компилятору известно, что типом sqr должен быть Func<T,T>, но не известно, каким должен быть тип T.)

Начиная с версии C# 10, также можно указывать возвращаемый тип лямбда-выражения:

```
var sqr = int (int x) => x;
```

Указание возвращаемого типа может повысить эффективность компилятора при использовании сложных вложенных лямбда-выражений.

Стандартные параметры лямбда-выражений (C# 12)

Точно так же, как обычные методы могут иметь необязательные параметры:

```
void Print (string message = "") => Console.WriteLine (message);
```

то же самое можно сказать и о лямбда-выражениях:

```
var print = (string message = "") => Console.WriteLine (message);
print ("Hello"); print ();
```

Данное средство полезно при работе с такими библиотеками, как ASP.NET Minimal API.

Захватывание внешних переменных

Лямбда-выражение может ссылаться на любые переменные, которые доступны там, где оно определено. Такие переменные называются *внешними* и могут включать локальные переменные, параметры и поля:

```
int factor = 2;
Func<int, int> multiplier = n => n * factor;
Console.WriteLine (multiplier (3));           // 6
```

Внешние переменные, на которые ссылается лямбда-выражение, называются *захваченными переменными*. Лямбда-выражение, захватывающее переменные, называется *замыканием*.



Переменные могут захватываться также анонимными методами и локальными методами. Во всех случаях по отношению к захваченным переменным действуют те же самые правила.

Захваченные переменные вычисляются, когда делегат фактически *вызывается*, а не когда переменные были *захвачены*:

```
int factor = 2;
Func<int, int> multiplier = n => n * factor;
factor = 10;
Console.WriteLine (multiplier (3));           // 30
```

Лямбда-выражения сами могут обновлять захваченные переменные:

```
int seed = 0;
Func<int> natural = () => seed++;
Console.WriteLine (natural());                // 0
Console.WriteLine (natural());                // 1
Console.WriteLine (seed);                     // 2
```

Захваченные переменные имеют свое время жизни, расширенное до времени жизни делегата. В следующем примере локальная переменная `seed` обычно покидала бы область видимости после того, как выполнение `Natural` завершено. Но поскольку переменная `seed` была захвачена, время жизни этой переменной расширяется до времени жизни захватившего ее делегата, т.е. `natural`:

```
static Func<int> Natural()
{
    int seed = 0;
    return () => seed++;                                // Возвращает замыкание
}

static void Main()
{
    Func<int> natural = Natural();
    Console.WriteLine (natural());                         // 0
    Console.WriteLine (natural());                         // 1
}
```

Локальная переменная, созданная внутри лямбда-выражения, будет уникальной для каждого вызова экземпляра делегата. Если мы переделаем предыдущий пример, чтобы создавать `seed` внутри лямбда-выражения, то получим разные результаты (что в данном случае нежелательно):

```
static Func<int> Natural()
{
    return() => { int seed = 0; return seed++; };
}

static void Main()
{
    Func<int> natural = Natural();
    Console.WriteLine (natural());                         // 0
    Console.WriteLine (natural());                         // 0
}
```



Внутренне захватывание реализуется “займствованием” захваченных переменных и их помещением в поля закрытого класса. При вызове метода создается экземпляр этого класса и привязывается на время жизни к экземпляру делегата.

Статические лямбда-выражения

При захватывании локальных переменных, параметров, полей экземпляра или ссылки `this` компилятору может потребоваться сгенерировать закрытый класс для хранения ссылки на захваченные данные и создать его экземпляр. Это влечет за собой небольшие накладные расходы в плане производительности, т.к. память должна выделяться и впоследствии освобождаться. В ситуациях, когда производительность критична, одна из стратегий микрооптимизации предусматривает минимизацию нагрузки на сборщик мусора за счет обеспечения того, что “горячие” по производительности пути кода нуждаются в небольшом количестве выделений памяти или вообще без них обходятся.

Начиная с версии C# 9, вы можете гарантировать, что лямбда-выражение, локальная функция или анонимный метод не захватывает состояние, применив ключевое слово `static`. Это может быть полезно в сценариях микрооптимизации для предотвращения выделений памяти. Например, вот как применить модификатор `static` к лямбда-выражению:

```
Func<int, int> multiplier = static n => n * 2;
```

Если позже попытаться модифицировать лямбда-выражение, чтобы оно захватывало локальную переменную, то компилятор сообщит об ошибке:

```
int factor = 2;
```

```
Func<int, int> multiplier = static n => n * factor; // Не скомпилируется
```



Результатом вычисления самого лямбда-выражения является экземпляр делегата, который требует выделения памяти. Однако если лямбда-выражение не захватывает переменные, тогда компилятор будет многократно использовать единственный кешированный экземпляр в течение всего времени жизни приложения, так что на практике какие-либо затраты отсутствуют.

Указанную возможность допускается также применять с локальными методами. В следующем примере метод `Multiply` не имеет доступа к переменной `factor`:

```
void Foo()
{
    int factor = 123;
    static int Multiply (int x) => x * 2; // Статический локальный метод
}
```

Конечно, метод `Multiply` по-прежнему может явно выделять память, вызывая `new`. Прием защищает от потенциального скрытого выделения. Применение `static` здесь возможно также в качестве инструмента документирования, указывая на сниженный уровень связности.

Статические лямбда-выражения все же могут иметь доступ к статическим переменным и константам (поскольку они не требуют замыкания).



Ключевое слово `static` действует просто как проверка; оно не оказывает никакого влияния на код IL, производимый компилятором. Без ключевого слова `static` компилятор не генерирует замыкание, если в нем нет необходимости (и даже тогда он предпринимает уловки с целью снижения затрат).

Захватывание итерационных переменных

Когда захватывается итерационная переменная в цикле `for`, она трактуется компилятором C# так, как если бы была объявлена *вне* цикла. Таким образом, на каждой итерации захватывается *та же самая* переменная. Приведенный ниже код выводит 333, а не 012:

```
Action[] actions = new Action[3];
for (int i = 0; i < 3; i++)
    actions [i] = () => Console.WriteLine (i);
foreach (Action a in actions) a(); // 333
```

Каждое замыкание (выделенное полужирным) захватывает одну и ту же переменную *i*. (Это действительно имеет смысл, когда считать, что *i* является переменной, значение которой сохраняется между итерациями цикла; при желании *i* можно даже явно изменять внутри тела цикла.) Последствие заключается в том, что при более позднем вызове каждый делегат видит значение *i* на момент *вызыва*, т.е. 3. Чтобы лучше проиллюстрировать сказанное, развернем цикл *for*:

```
Action[] actions = new Action[3];
int i = 0;
actions[0] = () => Console.WriteLine (i);
i = 1;
actions[1] = () => Console.WriteLine (i);
i = 2;
actions[2] = () => Console.WriteLine (i);
i = 3;
foreach (Action a in actions) a(); // 333
```

Если требуется вывести на экран 012, то решение состоит в том, чтобы присвоить итерационную переменную какой-то локальной переменной с областью видимости *внутри* цикла:

```
Action[] actions = new Action[3];
for (int i = 0; i < 3; i++)
{
    int loopScopedi = i;
    actions [i] = () => Console.WriteLine (loopScopedi);
}
foreach (Action a in actions) a(); // 012
```

Из-за того, что во время любой итерации переменная *loopScopedi* создается заново, каждое замыкание захватывает *отличающуюся* переменную.



До выхода версии C# 5.0 циклы *foreach* работали аналогично. Итогом была значительная путаница: в отличие от цикла *for* итерационная переменная в цикле *foreach* неизменяема, и можно было бы ожидать, что она трактуется как локальная по отношению к телу цикла. Хорошая новость заключается в том, что теперь проблема устранена, и вы можете благополучно захватывать итерационную переменную цикла *foreach* безо всяких неожиданностей.

Сравнение лямбда-выражений и локальных методов

Функциональность локальных методов (см. раздел “Локальные методы” в главе 3) частично совпадает с функциональностью лямбда-выражений. Локальные методы обладают следующими тремя преимуществами:

- они могут быть рекурсивными (вызывать сами себя) без применения неусложных трюков;
- они лишены беспорядка, связанного с указанием типа делегата;
- они требуют чуть меньших накладных расходов.

Локальные методы более эффективны, потому что избегают косвенности делегата (за которую приходится платить дополнительными циклами центрального процессора и выделением памяти). Они также могут получать доступ к локальным переменным содержащего метода, не заставляя компилятор “захватывать” захваченные переменные и помещать их в скрытый класс.

Тем не менее, во многих случаях делегат *необходим*, чаще всего при вызове функции более высокого порядка, т.е. метода с параметром типа делегата:

```
public void Foo (Func<int, bool> predicate) { ... }
```

(Дополнительные сведения ищите в главе 8.) В ситуациях подобного рода, так или иначе, необходим делегат, и они представляют собой в точности те случаи, когда лямбда-выражения обычно короче и яснее.

Анонимные методы

Анонимные методы — это функциональная возможность, появившаяся в C# 2.0, которая по большей части относится к лямбда-выражениям, введенным в версии C# 3.0. Анонимный метод похож на лямбда-выражение, но в нем отсутствуют:

- неявно типизированные параметры;
- синтаксис выражений (анонимный метод должен всегда быть блоком операторов);
- возможность компиляции в дерево выражения путем присваивания объекту типа Expression<T>.

В анонимном методе используется ключевое слово `delegate`, за которым следует (необязательное) объявление параметра и тело метода. Например:

```
Transformer sqr = delegate (int x) { return x * x; };
Console.WriteLine (sqr(3));                                // 9
delegate int Transformer (int i);
```

Первая строка семантически эквивалентна приведенному ниже лямбда-выражению:

```
Transformer sqr = (int x) => { return x * x; };
```

Или просто:

```
Transformer sqr = x => x * x;
```

Анонимные методы захватывают внешние переменные в точности как лямбда-выражения и могут предваряться ключевым словом `static`, которое заставляет их вести себя подобно статическим лямбда-выражениям.



Уникальной особенностью анонимных методов является возможность полностью опускать объявление параметра — даже если делегат его ожидает. Это может быть удобно при объявлении событий со стандартным пустым обработчиком:

```
public event EventHandler Clicked = delegate { };
```

В итоге устраняется необходимость проверки на равенство null перед запуском события. Приведенный далее код также будет допустимым:

```
// Обратите внимание, что параметры не указаны:  
Clicked += delegate { Console.WriteLine ("clicked"); };
```

Операторы `try` и исключения

Оператор `try` указывает блок кода, предназначенный для обработки ошибок или очистки. За блоком `try` должен следовать один или большее количество блоков `catch` и/или блок `finally` либо то и другое. Блок `catch` выполняется, когда происходит ошибка в блоке `try`. Блок `finally` выполняется после выполнения блока `try` (или блока `catch`, если он присутствует), обеспечивая очистку независимо от того, возникла ошибка или нет.

Блок `catch` имеет доступ к объекту `Exception`, который содержит информацию об ошибке. Блок `catch` применяется либо для компенсации последствий ошибки, либо для *повторной генерации* исключения. Исключение генерируется повторно, если требуется просто зарегистрировать сам факт возникновения проблемы в журнале или если необходимо сгенерировать исключение нового типа более высокого уровня.

Блок `finally` добавляет к программе детерминизм: среда CLR старается выполнять его всегда. Он полезен для проведения задач очистки вроде закрытия сетевых подключений.

Оператор `try` выглядит следующим образом:

```
try  
{  
    ... // Во время выполнения этого блока может возникнуть исключение  
}  
catch (ExceptionA ex)  
{  
    ... // Обработка исключения типа ExceptionA  
}  
catch (ExceptionB ex)  
{  
    ... // Обработка исключения типа ExceptionB  
}  
finally  
{  
    ... // Код очистки  
}
```

Взгляните на показанную ниже программу:

```
int y = Calc (0);
Console.WriteLine (y);
int Calc (int x) => 10 / x;
```

Поскольку x имеет нулевое значение, исполняющая среда генерирует исключение DivideByZeroException и программа прекращает работу. Чтобы предотвратить такое поведение, мы перехватываем исключение:

```
try
{
    int y = Calc (0);
    Console.WriteLine (y);
}
catch (DivideByZeroException ex)
{
    Console.WriteLine ("x cannot be zero"); // x не может иметь нулевое значение
}
Console.WriteLine ("program completed"); // программа завершена
int Calc (int x) => 10 / x;
```

Вот результирующий вывод:

```
x cannot be zero
program completed
```



Приведенный простой пример предназначен только для демонстрации обработки исключений. На практике вместо реализации такого сценария лучше перед вызовом Calc явно проверять делитель на равенство нулю.

Проверка с целью предотвращения ошибок предпочтительнее реализации блоков try/catch, т.к. обработка исключений является относительно затратной в плане ресурсов, требуя немало процессорного времени.

Когда исключение возникает внутри оператора try, среда CLR выполняет следующую проверку.

Имеет ли оператор try совместимые блоки catch?

Если да, то управление переходит к совместимому блоку catch, далее к блоку finally (при его наличии) и затем продолжается нормальное выполнение.

Если нет, то управление переходит прямо к блоку finally (при его наличии), после чего среда CLR ищет в стеке вызовов другие блоки try; в случае их нахождения она повторяет проверку.

Если ни одна из функций в стеке вызовов не взяла на себя ответственность за исключение, тогда программа прекращает работу.

Конструкция `catch`

Конструкция `catch` указывает тип исключения, подлежащего перехвату. Типом может быть либо класс `System.Exception`, либо какой-то подкласс `System.Exception`.

Указание типа `System.Exception` приводит к перехвату всех возможных ошибок. Это удобно в следующих ситуациях:

- программа потенциально способна восстанавливаться независимо от конкретного типа исключения;
- планируется повторная генерация исключения (возможно, после его регистрации в журнале);
- обработчик ошибок является последним средством перед тем, как программа прекратит работу.

Однако более обычной является ситуация, когда перехватываются *исключения специфических типов*, чтобы не иметь дела с исключениями, на которые обработчик не был рассчитан (скажем, `OutOfMemoryException`).

Перехватывать исключения нескольких типов можно с помощью множества конструкций `catch` (и снова данный пример проще реализовать посредством явной проверки аргументов, а не за счет обработки исключений):

```
class Test
{
    static void Main (string[] args)
    {
        try
        {
            byte b = byte.Parse (args[0]);
            Console.WriteLine (b);
        }
        catch (IndexOutOfRangeException)
        {
            // Должен быть предоставлен хотя бы один аргумент
            Console.WriteLine ("Please provide at least one argument");
        }
        catch (FormatException)
        {
            // Аргумент должен быть числом
            Console.WriteLine ("That's not a number!");
        }
        catch (OverflowException)
        {
            // Возникло переполнение
            Console.WriteLine ("You've given me more than a byte!");
        }
    }
}
```

Для заданного исключения выполняется только одна конструкция `catch`. Если вы хотите предусмотреть сетку безопасности для перехвата общих исключений (вроде `System.Exception`), то должны размещать более специфические обработчики *первыми*.

Исключение может быть перехвачено без указания переменной, если доступ к свойствам исключения не нужен:

```
catch (OverflowException) // Переменная не указана
{
    ...
}
```

Кроме того, можно опускать и переменную, и тип (тогда будут перехватываться все исключения):

```
catch { ... }
```

Фильтры исключений

В конструкции `catch` можно указывать *фильтр исключений* с помощью конструкции `when`:

```
catch (WebException ex) when (ex.Status == WebExceptionStatus.Timeout)
{
    ...
}
```

Если в приведенном примере генерируется исключение `WebException`, тогда вычисляется булевское выражение, находящееся после ключевого слова `when`. Если результатом оказывается `false`, то данный блок `catch` игнорируется и просматриваются любые последующие конструкции `catch`. Благодаря фильтрам исключений может появиться смысл в повторном перехвате исключения того же самого типа:

```
catch (WebException ex) when (ex.Status == WebExceptionStatus.Timeout)
{ ... }
catch (WebException ex) when (ex.Status == WebExceptionStatus.SendFailure)
{ ... }
```

Булевское выражение в конструкции `when` может иметь побочные эффекты, например, вызывать метод, который фиксирует в журнале сведения об исключении для целей диагностики.

Блок `finally`

Блок `finally` выполняется всегда — независимо от того, возникало ли исключение, и полностью ли был выполнен блок `try`. Блоки `finally` обычно используются для размещения кода очистки.

Блок `finally` выполняется в любом из следующих случаев:

- после завершения блока `catch` (или генерации нового исключения);
- после завершения блока `try` (или генерации исключения, для которого не был предусмотрен блок `catch`);
- после того, как поток управления покидает блок `try` из-за наличия оператора перехода (например, `return` или `goto`).

Единственное, что может воспрепятствовать выполнению блока `finally` — бесконечный цикл или неожиданное завершение процесса.

Блок `finally` содействует повышению детерминизма программы. В показанном ниже примере открываемый файл *всегда* закрывается независимо от перечисленных далее обстоятельств:

- блок `try` завершается нормально;
- происходит преждевременный возврат из-за того, что файл пуст (`EndOfStream`);
- во время чтения файла возникает исключение `IOException`:

```
void ReadFile()
{
    StreamReader reader = null; // Из пространства имен System.IO
    try
    {
        reader = File.OpenText ("file.txt");
        if (reader.EndOfStream) return;
        Console.WriteLine (reader.ReadToEnd ());
    }
    finally
    {
        if (reader != null) reader.Dispose ();
    }
}
```

Здесь мы закрываем файл с помощью вызова `Dispose` на `StreamReader`. Вызов `Dispose` на объекте внутри блока `finally` представляет собой стандартное соглашение, которое явно поддерживается в C# посредством оператора `using`.

Оператор `using`

Многие классы инкапсулируют неуправляемые ресурсы, такие как файловые и графические дескрипторы или подключения к базам данных. Классы подобного рода реализуют интерфейс `System.IDisposable`, в котором определен единственный метод без параметров по имени `Dispose`, предназначенный для очистки этих ресурсов. Оператор `using` предлагает элегантный синтаксис для вызова `Dispose` на объекте реализации `IDisposable` внутри блока `finally`.

Таким образом, код:

```
using (StreamReader reader = File.OpenText ("file.txt"))
{
    ...
}
```

в точности эквивалентен следующему коду:

```
{
    StreamReader reader = File.OpenText ("file.txt");
    try
    {
        ...
    }
    finally
    {
        if (reader != null)
            ((IDisposable)reader).Dispose ();
    }
}
```

Объявления using

Если опустить круглые скобки и блок операторов, следующий за оператором `using` (C# 8+), то он становится *объявлением using*. В результате ресурс освобождается, когда поток управления выходит за пределы *включающего* блока операторов:

```
if (File.Exists ("file.txt"))
{
    using var reader = File.OpenText ("file.txt");
    Console.WriteLine (reader.ReadLine ());
    ...
}
```

В данном случае память для `reader` будет освобождена, как только поток управления окажется за пределами блока оператора `if`.

Генерация исключений

Исключения могут генерироваться либо исполняющей средой, либо пользовательским кодом. В приведенном далее примере метод `Display` генерирует исключение `System.ArgumentNullException`:

```
try { Display (null); }
catch (ArgumentNullException ex)
{
    Console.WriteLine ("Caught the exception"); // Исключение перехвачено
}

void Display (string name)
{
    if (name == null)
        throw new ArgumentNullException (nameof (name));
    Console.WriteLine (name);
}
```



Поскольку проверка аргумента на предмет `null` и генерация исключения `ArgumentNullException` — довольно распространенный шаблон кода, в .NET 6 для него предусмотрено сокращение:

```
void Display (string name)
{
    ArgumentNullException.ThrowIfNull (name);
    Console.WriteLine (name);
}
```

Обратите внимание, что указывать имя параметра не пришлось. Причина объясняется в разделе “Атрибут `CallerArgumentExpression`” далее в главе.

Выражения `throw`

Конструкция `throw` может появляться и как выражение в функциях, сжатых до выражения:

```
public string Foo () => throw new NotImplementedException();
```

Выражение `throw` может также находиться внутри тернарной условной операции:

```
string ProperCase (string value) =>
    value == null ? throw new ArgumentException ("value") :
    value == "" ? "" :
    char.ToUpper (value[0]) + value.Substring (1);
```

Повторная генерация исключения

Исключение можно перехватывать и генерировать повторно:

```
try { ... }
catch (Exception ex)
{
    // Записать в журнал информацию об ошибке
    ...
    throw; // Повторно сгенерировать то же самое исключение
}
```



Если вместо `throw` указать `throw ex`, то пример сохранит работоспособность, но свойство `StackTrace` исключения больше не будет отражать исходную ошибку.

Повторная генерация в подобной манере дает возможность зарегистрировать в журнале информацию об ошибке, не подавляя ее. Она также позволяет отказаться от обработки исключения, если обстоятельства сложились не так, как ожидалось. Еще один распространенный сценарий предусматривает повторную генерацию исключения более специфического типа:

```
try
{
    ... // Получить значение DateTime из данных XML-элемента
}
catch (FormatException ex)
{
    throw new XmlException ("Invalid DateTime", ex); //Недопустимый формат DateTime
}
```

Обратите внимание, что при создании экземпляра `XmlException` мы передаем конструктору во втором аргументе исходное исключение `ex`. Этот аргумент заполняет свойство `InnerException` нового экземпляра исключения и содействует отладке. Практически все типы исключений предлагают аналогичный конструктор.

Повторная генерация *менее* специфичного исключения может осуществляться при пересечении границы доверия, чтобы не допустить утечки технической информации потенциальным взломщикам.

Основные свойства класса `System.Exception`

Ниже описаны наиболее важные свойства класса `System.Exception`.

`StackTrace`

Строка, представляющая все методы, которые были вызваны, начиная с источника исключения и заканчивая блоком `catch`.

Message

Строка с описанием ошибки.

InnerException

Внутреннее исключение (если есть), которое привело к генерации внешнего исключения. Может иметь еще одно свойство InnerException.



Все исключения в C# происходят во время выполнения — в языке C# отсутствует эквивалент проверяемых исключений этапа компиляции, которые есть в Java.

Общие типы исключений

Перечисленные ниже типы исключений широко используются в CLR и библиотеках .NET. Их можно генерировать либо применять в качестве базовых классов для порождения специальных типов исключений.

System.ArgumentException

Генерируется, когда функция вызывается с недопустимым аргументом. Как правило, указывает на наличие ошибки в программе.

System.ArgumentNullException

Подкласс ArgumentException, который генерируется, когда аргумент функции (непредсказуемо) равен null.

System.ArgumentOutOfRangeException

Подкласс ArgumentException, который генерируется, когда (обычно числовой) аргумент имеет слишком большое или слишком малое значение. Например, такое исключение возникает при передаче отрицательного числа в функцию, которая принимает только положительные значения.

System.InvalidOperationException

Генерируется, когда состояние объекта оказывается неподходящим для успешного выполнения метода независимо от любых заданных значений аргументов. В качестве примеров можно назвать чтение неоткрытого файла или получение следующего элемента из перечислителя в случае, если лежащий в основе список был изменен на середине выполнения итерации.

System.NotSupportedException

Генерируется для указания на то, что специфическая функциональность не поддерживается. Хорошим примером может служить вызов метода Add на коллекции, для которой свойство IsReadOnly возвращает true.

System.NotImplementedException

Генерируется для указания на то, что функция пока еще не реализована.

System.ObjectDisposedException

Генерируется, когда объект, на котором вызывается функция, был освобожден.

Еще одним часто встречающимся типом исключения является `NullReferenceException`. Среда CLR генерирует такое исключение, когда вы пытаетесь получить доступ к члену объекта, значение которого равно `null` (указывая на ошибку в коде). Исключение `NullReferenceException` можно генерировать напрямую (в тестовых целях) следующим образом:

```
throw null;
```

Шаблон методов TryXXX

При написании метода в ситуации, когда что-то пошло не так, у вас есть выбор — возвратить код неудачи некоторого вида либо сгенерировать исключение. В общем случае исключение следует генерировать, если ошибка находится за рамками нормального рабочего потока или ожидается, что непосредственно вызывающий код неспособен справиться с ошибкой. Тем не менее, иногда лучше предложить потребителю оба варианта. Примером может служить тип `int`, в котором определены две версии метода `Parse`, отвечающего за разбор:

```
public int Parse (string input);
public bool TryParse (string input, out int returnValue);
```

Если разбор заканчивается неудачей, то метод `Parse` генерирует исключение, а `TryParse` возвращает значение `false`.

Такой шаблон можно реализовать, обеспечив вызов метода `TryXXX` внутри метода `XXX`:

```
public возвращаемый-тип XXX (входной-тип input)
{
    возвращаемый-тип returnValue;
    if (!TryXXX (input, out returnValue))
        throw new YYException (...);
    return returnValue;
}
```

Альтернативы исключений

Как и метод `int.TryParse`, функция может сообщать о неудаче путем возвращения в вызывающую функцию кода ошибки через возвращаемый тип или параметр. Хотя такой подход хорошо работает с простыми и предсказуемыми отказами, он становится громоздким при необходимости охвата необычных или непредсказуемых ошибок, засоряя сигнатуры методов и привнося ненужную сложность и беспорядок.

Кроме того, его нельзя распространить на функции, не являющиеся методами, такие как операции (например, деление) или свойства. В качестве альтернативы информация об ошибке может храниться в общем местоположении, в котором ее способны видеть все функции из стека вызовов (скажем, можно иметь статический метод, сохраняющий текущий признак ошибки для потока). Тем не менее, это требует от каждой функции участия в шаблоне распространения ошибок, который мало того, что громоздкий, но по иронии судьбы сам подвержен ошибкам.

Перечисление и итераторы

Перечисление

Перечислитель — это допускающий только чтение односторонний курсор по *последовательности значений*. Компилятор C# трактует тип как перечислитель, если он обладает одной из следующих характеристик:

- имеет открытый метод без параметров по имени `MoveNext` и свойство по имени `Current`;
- реализует интерфейс `System.Collections.Generic.IEnumerator<T>`;
- реализует интерфейс `System.Collections.IEnumerator`.

Оператор `foreach` выполняет итерацию по *перечислимому* объекту. Перечислимый объект является логическим представлением последовательности. Это не собственно курсор, а объект, который производит курсор на себе самом. Компилятор C# трактует тип как перечислимый, если он обладает любой из следующих характеристик (проверка осуществляется в указанном порядке):

- имеет открытый метод без параметров по имени `GetEnumerator`, который возвращает перечислитель;
- реализует интерфейс `System.Collections.Generic.IEnumerable<T>`;
- реализует интерфейс `System.Collections.IEnumerable`;

(начиная с версии C# 9) может быть привязан к *расширяющему* методу `GetEnumerator`, который возвращает перечислитель (см. раздел “Расширяющие методы” далее в главе).

Шаблон перечисления выглядит так:

```
class Enumerator // Обычно реализует интерфейс IEnumerator или IEnumerator<T>
{
    public ТипПеременнойПеречислителя Current { get {...} }
    public bool MoveNext() {...}
}

class Enumerable // Обычно реализует интерфейс IEnumerable или IEnumerable<T>
{
    public Enumerator GetEnumerator() {...}
}
```

Ниже показан высокоуровневый способ выполнения итерации по символам в слове “beer” с использованием оператора `foreach`:

```
foreach (char c in "beer")
    Console.WriteLine (c);
```

А вот низкоуровневый метод проведения итерации по символам в слове “beer” без применения оператора `foreach`:

```
using (var enumerator = "beer".GetEnumerator())
    while (enumerator.MoveNext())
    {
        var element = enumerator.Current;
        Console.WriteLine (element);
    }
```

Если перечислитель реализует интерфейс `IDisposable`, тогда оператор `foreach` также действует как оператор `using`, неявно освобождая объект перечислителя.

Интерфейсы перечисления более подробно рассматриваются в главе 7.

Инициализаторы и выражения коллекций

Перечислимый объект можно создать и заполнить за один шаг с помощью инициализатора коллекции:

```
using System.Collections.Generic;
var list = new List<int> {1, 2, 3};
```

Начиная с версии C# 12, это выражение можно сократить за счет использования выражения коллекции (обратите внимание на квадратные скобки):

```
using System.Collections.Generic;
List<int> list = [1, 2, 3];
```



Выражения коллекции имеют *целевую типизацию*, т.е. тип выражения коллекции `[1, 2, 3]` зависит от типа, которому оно присваивается (в данном случае `List<int>`). В следующем примере целевыми типами являются `int[]` и `Span<int>` (которые будут рассматриваться в главе 23):

```
int[] array = [1, 2, 3];
Span<int> span = [1, 2, 3];
```

Целевая типизация означает, что тип можно опускать в других сценариях, где компилятор способен его определить, например, при вызове методов:

```
Foo ([1, 2, 3]);
void Foo (List<int> numbers) { ... }
```

Компилятор транслирует это в следующий код:

```
using System.Collections.Generic;
List<int> list = new List<int>();
list.Add (1);
list.Add (2);
list.Add (3);
```

Здесь требуется, чтобы перечислимый объект реализовывал интерфейс `System.Collections.IEnumerable` и потому имел метод `Add`, который принимает соответствующее количество параметров для вызова. (Благодаря выражениям коллекций компилятор также поддерживает другие шаблоны, которые позволяют создавать коллекции, доступные только для чтения.)

Похожим образом можно инициализировать словари (см. раздел “Словари” в главе 7):

```
var dict = new Dictionary<int, string>()
{
    { 5, "five" },
    { 10, "ten" }
};
```

Или более компактно:

```
var dict = new Dictionary<int, string>()
{
    [3] = "three",
    [10] = "ten"
};
```

Последний прием допустим не только со словарями, но и с любым типом, для которого существует индексатор.

Итераторы

В то время как оператор `foreach` является *потребителем* перечислителя, итератор выступает в качестве *поставщика* перечислителя. В приведенном ниже примере итератор используется для возвращения последовательности чисел Фибоначчи (в которой каждое число является суммой двух предыдущих чисел):

```
using System;
using System.Collections.Generic;

foreach (int fib in Fibs(6))
    Console.Write (fib + " ");
}

IEnumerable<int> Fibs (int fibCount)
{
    for (int i = 0, prevFib = 1, curFib = 1; i < fibCount; i++)
    {
        yield return prevFib;
        int newFib = prevFib+curFib;
        prevFib = curFib;
        curFib = newFib;
    }
}
```

Вывод выглядит так:

```
1 1 2 3 5 8
```

Оператор `return` выражает: “Вот значение, которое должно быть возвращено из этого метода”, а оператор `yield return` сообщает: “Вот следующий элемент, который должен быть выдан этим перечислителем”. С каждым оператором `yield` управление возвращается вызывающему компоненту, но состояние вызываемого метода сохраняется, так что данный метод может продолжить свое выполнение, как только вызывающий компонент перечислит следующий элемент. Жизненный цикл такого состояния ограничен перечислителем, поэтому состояние может быть освобождено, когда вызывающий компонент завершит перечисление.



Компилятор преобразует методы итератора в закрытые классы, которые реализуют интерфейсы `IEnumerable<T>` и/или `IEnumerator<T>`. Логика внутри блока итератора “инвертируется” и сращивается с методом `MoveNext` и свойством `Current` класса перечислителя, которые сгенерированы компилятором. Это значит,

что при вызове метода итератора всего лишь создается экземпляр сгенерированного компилятором класса; никакой написанный вами код на самом деле не выполняется! Ваш код запускается только когда начинается перечисление по результирующей последовательности, обычно с помощью оператора `foreach`.

Итераторы могут быть локальными методами (см. раздел “Локальные методы” в главе 3).

Семантика итератора

Итератор представляет собой метод, свойство или индексатор, который содержит один или большее количество операторов `yield`. Итератор должен возвращать один из следующих четырех интерфейсов (иначе компилятор сообщит об ошибке):

```
// Перечислимые интерфейсы
System.Collections.IEnumerable
System.Collections.Generic.IEnumerable<T>

// Интерфейсы перечислителя
System.Collections.IEnumerator
System.Collections.Generic.IEnumerator<T>
```

Семантика итератора отличается в зависимости от того, что он возвращает — реализацию *перечислимого* интерфейса или реализацию интерфейса *перечислителя* (за более подробным описанием обращайтесь в главу 7).

Разрешено применять *несколько операторов yield*:

```
foreach (string s in Foo())
    Console.WriteLine(s); // Выводит "One", "Two", "Three"
IEnumerable<string> Foo()
{
    yield return "One";
    yield return "Two";
    yield return "Three";
}
```

Оператор `yield break`

Наличие оператора `return` в блоке итератора не допускается — вместо него должен использоваться оператор `yield break` для указания на то, что блок итератора должен быть завершен преждевременно, не возвращая больше элементов. Для его демонстрации мы можем модифицировать метод `Foo`:

```
IEnumerable<string> Foo (bool breakEarly)
{
    yield return "One";
    yield return "Two";
    if (breakEarly)
        yield break;
    yield return "Three";
}
```

Итераторы и блоки `try/catch/finally`

Оператор `yield return` не может присутствовать в блоке `try`, который имеет конструкцию `catch`:

```
IEnumerable<string> Foo()
{
    try { yield return "One"; }           // Не допускается
    catch { ... }
}
```

Также оператор `yield return` нельзя применять внутри блока `catch` или `finally`. Указанные ограничения объясняются тем фактом, что компилятор должен транслировать итераторы в обычные классы с членами `MoveNext`, `Current` и `Dispose`, а трансляция блоков обработки исключений может привести к чрезмерной сложности.

Однако оператор `yield` можно использовать в блоке `try`, который имеет (только) блок `finally`:

```
IEnumerable<string> Foo()
{
    try { yield return "One"; }           // Нормально
    finally { ... }
}
```

Код в блоке `finally` выполняется, когда потребляемый перечислитель достигает конца последовательности или освобождается. Оператор `foreach` неявно освобождает перечислитель, если произошло преждевременное завершение, обеспечивая безопасный способ применения перечислителей. При явной работе с перечислителем частой ловушкой оказывается преждевременное прекращение перечисления без освобождения перечислителя, т.е. в обход блока `finally`. Во избежание подобного риска код, явно использующий итератор, можно поместить внутрь оператора `using`:

```
string firstElement = null;
var sequence = Foo();
using (var enumerator = sequence.GetEnumerator())
{
    if (enumerator.MoveNext())
        firstElement = enumerator.Current;
```

Компоновка последовательностей

Итераторы в высшей степени компонуемы. Мы можем расширить наш пример с числами Фибоначчи, выводя только четные числа Фибоначчи:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
foreach (int fib in EvenNumbersOnly (Fibs(6)))
    Console.WriteLine (fib);
IEnumerable<int> Fibs (int fibCount)
{
    for (int i = 0, prevFib = 1, curFib = 1; i < fibCount; i++)
    {
```

```

yield return prevFib;
int newFib = prevFib+curFib;
prevFib = curFib;
curFib = newFib;
}
}

IEnumerable<int> EvenNumbersOnly (IEnumerable<int> sequence)
{
    foreach (int x in sequence)
        if ((x % 2) == 0)
            yield return x;
}

```

Каждый элемент не вычисляется вплоть до последнего момента — когда он запрашивается операцией MoveNext. На рис. 4.1 проиллюстрированы запросы, а также вывод данных с течением времени.

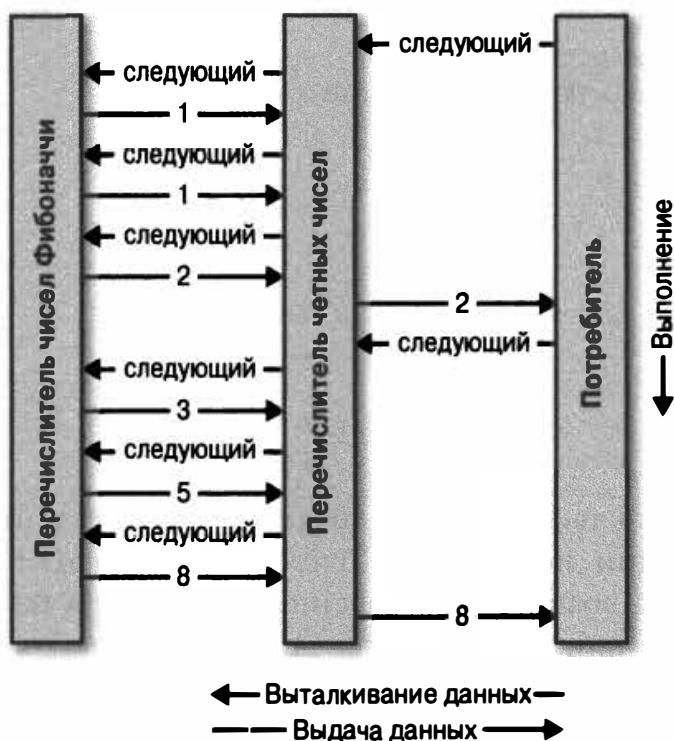


Рис. 4.1. Пример компоновки последовательностей

Возможность компоновки, поддерживаемая шаблоном итератора, жизненно необходима при построении запросов LINQ; мы подробно обсудим данную тему в главе 8.

Типы значений, допускающие null

Ссылочные типы могут представлять несуществующее значение с помощью ссылки null. Тем не менее, типы значений не обладают способностью представлять значения null обычным образом:

```

string s = null; // Нормально, ссылочный тип
int i = null; // Ошибка на этапе компиляции, тип значения не может быть null

```

Чтобы представить null с помощью типа значения, нужно применять специальную конструкцию, которая называется *типом, допускающим null*. Тип, допускающий null, обозначается как тип значения, за которым следует символ ?:

```
int? i = null; // Нормально; тип, допускающий null
Console.WriteLine (i == null); // True
```

Структура Nullable<T>

Тип T? транслируется в System.Nullable<T> — легковесную неизменяющую структуру, которая имеет только два поля, предназначенные для представления значения (Value) и признака наличия значения (HasValue). По существу структура System.Nullable<T> очень проста:

```
public struct Nullable<T> where T : struct
{
    public T Value {get;}
    public bool HasValue {get;}
    public T GetValueOrDefault();
    public T GetValueOrDefault (T defaultValue);
    ...
}
```

Код:

```
int? i = null;
Console.WriteLine (i == null); // True
```

транслируется в:

```
Nullable<int> i = new Nullable<int>();
Console.WriteLine (! i.HasValue); // True
```

Попытка извлечь значение Value, когда в поле HasValue содержится false, приводит к генерации исключения InvalidOperationException. Метод GetValueOrDefault возвращает значение Value, если HasValue равно true, и результат new T() или заданное стандартное значение в противном случае.

Стандартным значением T? является null.

Неявные и явные преобразования с участием типов, допускающих null

Преобразование из T в T? будет неявным, в то время как из T? в T — явным:

```
int? x = 5; // неявное
int y = (int)x; // явное
```

Явное приведение полностью эквивалентно обращению к свойству Value объекта типа, допускающего null. Следовательно, если HasValue равно false, тогда генерируется исключение InvalidOperationException.

Упаковка и распаковка значений типов, допускающих null

Когда T? упаковывается, упакованное значение в куче содержит T, а не T?. Такая оптимизация возможна из-за того, что упакованное значение относится к ссылочному типу, который уже способен выражать null.

В C# также разрешено распаковывать типы, допускающие null, с помощью операции as. Если приведение не удаётся, тогда результатом будет null:

```
object o = "string";
int? x = o as int?;
Console.WriteLine (x.HasValue);    // False
```

Подъем операций

В структуре Nullable<T> не определены такие операции, как <, > или даже ==. Несмотря на это, следующий код успешно компилируется и выполняется:

```
int? x = 5;
int? y = 10;
bool b = x < y;                      // true
```

Код работает благодаря тому, что компилятор заимствует, или “поднимает”, операцию “меньше чем” у лежащего в основе типа значения. Семантически предыдущее выражение сравнения транслируется так:

```
bool b = (x.HasValue && y.HasValue) ? (x.Value < y.Value) : false;
```

Другими словами, если x и y имеют значения, то сравнение производится посредством операции “меньше чем” типа int; в противном случае результатом будет false.

Подъем операций означает возможность неявного использования операций из типа T для T?. Вы можете определить операции для типа T?, чтобы представить специализированное поведение в отношении null, но в подавляющем большинстве случаев лучше полагаться на автоматическое применение компилятором систематической логики работы со значением null. Ниже показано несколько примеров:

```
int? x = 5;
int? y = null;

// Примеры использования операции эквивалентности
Console.WriteLine (x == y);          // False
Console.WriteLine (x == null);        // False
Console.WriteLine (x == 5);           // True
Console.WriteLine (y == null);        // True
Console.WriteLine (y == 5);           // False
Console.WriteLine (y != 5);           // True

// Примеры применения операций отношения
Console.WriteLine (x < 6);           // True
Console.WriteLine (y < 6);           // False
Console.WriteLine (y > 6);           // False

// Примеры использования всех других операций
Console.WriteLine (x + 5);           // 10
Console.WriteLine (x + y);           // null (выводит пустую строку)
```

Компилятор представляет логику в отношении null по-разному в зависимости от категории операции. Правила объясняются в последующих разделах.

Операции эквивалентности (== и !=)

Поднятые операции эквивалентности обрабатывают значения null точно так же, как поступают ссылочные типы. Это означает, что два значения null равны:

```
Console.WriteLine (      null ==      null);      // True
Console.WriteLine ((bool?)null == (bool?)null);    // True
```

Более того:

- если в точности один операнд имеет значение null, то операнды не равны;
- если оба операнда отличаются от null, то сравниваются их свойства Value.

Операции отношения (<, <=, >=, >)

Работа операций отношения основана на принципе, согласно которому сравнение операндов null не имеет смысла. Это означает, что сравнение null либо с null, либо со значением, отличающимся от null, дает в результате false:

```
bool b = x < y; // Транслируется в:
bool b = (x.HasValue && y.HasValue)
        ? (x.Value < y.Value)
        : false;
// b равно false (предполагая, что x равно 5, а y - null)
```

Остальные операции (+, -, *, /, %, &, |, ^, <<, >>, +, ++, --, !, ~)

Остальные операции возвращают null, когда любой из операндов равен null. Такой шаблон должен быть хорошо знаком пользователям языка SQL:

```
int? c = x + y; // Транслируется в:
int? c = (x.HasValue && y.HasValue)
        ? (int?) (x.Value + y.Value)
        : null;
// c равно null (предполагая, что x равно 5, а y - null)
```

Исключением будет ситуация, когда операции & и | применяются к bool?, что мы вскоре обсудим.

Смешивание типов, допускающих и не допускающих null

Типы, допускающие и не допускающие null, можно смешивать (прием работает, поскольку существует неявное преобразование из T в T?):

```
int? a = null;
int b = 2;
int? c = a + b; // c равно null - эквивалентно a + (int?)b
```

Тип `bool?` и операции `&` и `|`

Когда предоставляются операнды типа `bool?`, операции `&` и `|` трактуют `null` как *неизвестное значение*. Таким образом, `null | true` дает `true` по следующим причинам:

- если неизвестное значение равно `false`, то результатом будет `true`;
- если неизвестное значение равно `true`, то результатом будет `true`.

Аналогичным образом `null & false` дает `false`. Подобное поведение должно быть знакомо пользователям языка SQL. Ниже приведены другие комбинации:

```
bool? n = null;
bool? f = false;
bool? t = true;
Console.WriteLine (n | n);      // (null)
Console.WriteLine (n | f);      // (null)
Console.WriteLine (n | t);      // True
Console.WriteLine (n & n);      // (null)
Console.WriteLine (n & f);      // False
Console.WriteLine (n & t);      // (null)
```

Типы значений, допускающие `null`, и операции для работы с `null`

Типы значений, допускающие `null`, особенно хорошо работают с операцией `??` (см. раздел “Операция объединения с `null`” в главе 2), как иллюстрируется в следующем примере:

```
int? x = null;
int y = x ?? 5;                      // y равно 5
int? a = null, b = 1, c = 2;
Console.WriteLine (a ?? b ?? c); // 1(первое значение, отличающееся от null)
```

Использование операции `??` эквивалентно вызову метода `GetValueOrDefault` с явным стандартным значением за исключением того, что выражение для стандартного значения никогда не вычисляется, если переменная не равна `null`.

Типы значений, допускающие `null`, также удобно применять с `null`-условной операцией (см. раздел “`null`-условная операция” в главе 2). В показанном далее примере переменная `length` получает значение `null`:

```
System.Text.StringBuilder sb = null;
int? length = sb?.ToString().Length;
```

Скомбинировав такой код с операцией объединения с `null`, переменной `length` можно присвоить значение 0 вместо `null`:

```
int length = sb?.ToString().Length ?? 0;    // length получает значение 0,
                                              // если sb равно null
```

Сценарии использования типов значений, допускающих null

Один из самых распространенных сценариев использования типов значений, допускающих null — представление неизвестных значений. Он часто встречается в программировании для баз данных, когда класс отображается на таблицу со столбцами, допускающими значение null. Если такие столбцы хранят строковые значения (например, столбец EmailAddress в таблице Customer), то никаких проблем не возникает, потому что string в среде CLR является ссылочным типом, который может быть null. Однако большинство других типов столбцов SQL отображаются на типы структур CLR, что делает типы значений, допускающие null, очень удобными при отображении типов SQL на типы CLR:

```
// Отображается на таблицу Customer в базе данных
public class Customer
{
    ...
    public decimal? AccountBalance;
}
```

Тип, допускающий null, может также применяться для представления поддерживающего поля в так называемом *свойстве окружения* (ambient property). Когда свойство окружения равно null, оно возвращает значение своего родителя:

```
public class Row
{
    ...
    Grid parent;
    Color? color;

    public Color Color
    {
        get { return color ?? parent.Color; }
        set { color = value == parent.Color ? (Color?)null : value; }
    }
}
```

Альтернативы типам значений, допускающим null

До того, как типы значений, допускающие null, стали частью языка C# (т.е. до версии C# 2.0), существовало много стратегий для работы с такими типами, и по историческим причинам их примеры по-прежнему можно встретить в библиотеках .NET. Одна из таких стратегий предусматривала назначение определенного значения, отличающегося от null, в качестве “значения null”; пример можно найти в классах строк и массивов. Метод string.IndexOf возвращает “магическое” значение -1, когда символ в строке не обнаружен:

```
int i = "Pink".IndexOf ('b');
Console.WriteLine (i); // -1
```

Тем не менее, метод `Array.IndexOf` возвращает `-1`, только если индекс ограничен нулем. Более общий рецепт заключается в том, что `IndexOf` возвращает значение на единицу меньше нижней границы массива. В следующем примере `IndexOf` возвращает `0`, если элемент не найден:

```
// Создать массив, нижняя граница которого равна 1, а не 0:  
Array a = Array.CreateInstance (typeof (string),  
                               new int[] {2}, new int[] {1});  
a.SetValue ("a", 1);  
a.SetValue ("b", 2);  
Console.WriteLine (Array.IndexOf (a, "c")); // 0
```

Выбор “магического” значения сопряжен с проблемами по нескольким причинам.

- Такой подход приводит к тому, что каждый тип значения имеет разное представление `null`. По контрасту с этим типы, допускающие `null`, предлагаю один общий шаблон, который работает для всех типов значений.
- Приемлемого значения может и не быть. В предыдущем примере всегда использовать `-1` не получится. То же самое справедливо для ранее приведенного примера, представляющего неизвестный баланс счета (`AccountBalance`).
- Если забыть о проверке на равенство “магическому” значению, то появится некорректное значение, которое может оказаться незамеченным вплоть до стадии выполнения — когда обнаружится неожиданное поведение. С другой стороны, если забыть о проверке `HasValue` на равенство `null`, тогда немедленно генерируется исключение `InvalidOperationException`.
- Способность значения быть `null` не отражена в *type*. Типы сообщают о целях программы, позволяя компилятору проверять корректность и применять согласованный набор правил.

Ссылочные типы, допускающие `null`

В то время как *типы значений, допускающие null*, наделяют типы значений способностью принимать значение `null`, *ссылочные типы, допускающие null* (C# 8+), делают противоположное. Когда включены, они привносят в ссылочные типы определенную долю *возможности не быть null*, цель которой — избежать возникновения ошибок `NullReferenceException`.

Ссылочные типы, допускающие `null`, вводят уровень безопасности, обеспечиваемый исключительно компилятором в форме предупреждений, когда он обнаруживает код, который подвержен риску генерации `NullReferenceException`.

Чтобы включить ссылочные типы, допускающие `null`, потребуется добавить элемент `Nullable` в файл проекта `.csproj` (при желании их включения для всего проекта):

```
<PropertyGroup>  
  <Nullable>enable</Nullable>  
</PropertyGroup>
```

и/или использовать следующие директивы в коде там, где они должны вступить в силу:

```
#nullable enable      // Включает ссылочные типы, допускающие null,  
                      // начиная с этой точки  
#nullable disable    // Отключает ссылочные типы, допускающие null,  
                      // начиная с этой точки  
#nullable restore    // Переустанавливает ссылочные типы, допускающие null,  
                      // согласно настройке проекта
```

После включения компилятор по умолчанию считает, что ссылочный тип не может быть `null`: если вы хотите, чтобы ссылочный тип принимал значения `null` без генерации компилятором предупреждения, тогда должны применять суффикс `?` для обозначения *ссылочного типа, допускающего null*. В показанном ниже примере `s1` не допускает значение `null`, тогда как `s2` допускает:

```
#nullable enable      // Включить ссылочные типы, допускающие null  
string s1 = null;     // Компилятор генерирует предупреждение!  
string? s2 = null;  // Нормально: s2 - ссылочный тип, допускающий null
```



Поскольку ссылочные типы, допускающие `null`, являются конструкциями этапа компиляции, во время выполнения между `string` и `string?` нет никакой разницы. Напротив, типы значений, допускающие `null`, привносят в систему типов кое-что конкретное, а именно — структуру `Nullable<T>`.

Следующий код также приводит к генерации предупреждения из-за отсутствия инициализации `x`:

```
class Foo { string x; }
```

Предупреждение исчезнет, если вы инициализируете `x` посредством инициализатора поля или с помощью кода в конструкторе.

null-терпимая операция

Компилятор также выдаст предупреждение при разыменовании ссылочного типа, допускающего `null`, если посчитает, что может возникнуть исключение `NullReferenceException`. В показанном далее коде доступ к свойству `Length` строки вызывает генерацию предупреждения:

```
void Foo (string? s) => Console.Write (s.Length);
```

Избавиться от предупреждения можно за счет использования *null-терпимой операции* (!):

```
void Foo (string? s) => Console.Write (s!.Length);
```

Применение *null-терпимой операции* в этом примере опасно тем, что в конечном итоге мы можем получить то же самое исключение `NullReferenceException`, которое в первую очередь пытались избежать. Вот как можно было бы исправить ситуацию:

```
void Foo (string? s)
{
    if (s != null) Console.WriteLine (s.Length);
}
```

Обратите внимание, что теперь null-терпимая операция не нужна. На самом деле компилятор выполняет *статический анализ потока управления* и достаточно интеллектуален, чтобы сделать вывод (по крайней мере, в простых случаях) о том, что разыменование безопасно и шансов на возникновение исключения NullReferenceException нет.

Способность компилятора обнаруживать и предупреждать не является “пленепробиваемой”, к тому же существуют пределы в плане того, что возможно охватить. Например, компилятор не может знать, заполнены ли элементы массива, а потому следующий код не приводит к выдаче предупреждения:

```
var strings = new string[10];
Console.WriteLine (strings[0].Length);
```

Разъединение контекстов с заметками и с предупреждениями

Включение ссылочных типов, допускающих null, через директиву `#nullable enable` (или посредством настройки проекта `<Nullable>enable </Nullable>`) выполняет два действия.

- Включает контекст с заметками о допустимости значения null, который сообщает компилятору о необходимости трактовки всех объявлений переменных ссылочных типов как не допускающих null, если только они не снабжены суффиксом ?.
- Включает контекст с предупреждениями о допустимости значения null, который сообщает компилятору о необходимости выдавать предупреждения при обнаружении кода, где есть риск генерации исключения NullReferenceException.

Иногда полезно разъединять эти две концепции и включать только контекст с заметками или (что менее полезно) только контекст с предупреждениями:

```
#nullable enable annotations      // Включить контекст с заметками
// ИЛИ:
(nullable enable warnings       // Включить контекст с предупреждениями
```

(Тот же самый трюк работает с `#nullable disable` и `#nullable restore`.) Вы также можете достичь цели через файл проекта:

```
<Nullable>annotations</Nullable>
<!-- ИЛИ -->
<Nullable>warnings</Nullable>
```

Включение только контекста с заметками для отдельного класса или сборки может стать хорошим первым шагом к вводу ссылочных типов, допускающих null, в унаследованную кодовую базу. За счет корректной пометки открытых членов класс или сборка сможет действовать как “добропорядочный гражданин” в отношении других классов или сборок, так что у них появится возмож-

ность в полной мере использовать ссылочные типы, допускающие null, без необходимости иметь дело с предупреждениями в классе или сборке.

Трактовка предупреждений о допустимости значения null как ошибок

В проектах, реализуемых с нуля, имеет смысл с самого начала включать контекст, допускающий null. Возможно, вы захотите предпринять дополнительный шаг в плане трактовки предупреждений о допустимости значения null как ошибок, чтобы ваш проект не мог успешно скомпилироваться до тех пор, пока не будут устранены все предупреждения, касающиеся допустимости значения null:

```
<PropertyGroup>
  <Nullable>enable</Nullable>
  <WarningsAsErrors>CS8600;CS8602;CS8603</WarningsAsErrors>
</PropertyGroup>
```

Расширяющие методы

Расширяющие методы позволяют расширять существующий тип новыми методами, не изменяя определение исходного типа. Расширяющий метод — это статический метод статического класса, в котором к первому параметру применен модификатор `this`. Типом первого параметра должен быть тип, который расширяется:

```
public static class StringHelper
{
    public static bool IsCapitalized (this string s)
    {
        if (string.IsNullOrEmpty(s)) return false;
        return char.ToUpper (s[0]);
    }
}
```

Расширяющий метод `IsCapitalized` может вызываться так, как если бы он был методом экземпляра класса `string`:

```
Console.WriteLine ("Perth".IsCapitalized());
```

Вызов расширяющего метода при компиляции транслируется в обычный вызов статического метода:

```
Console.WriteLine (StringHelper.IsCapitalized ("Perth"));
```

Такая трансляция работает следующим образом:

```
arg0.Method (arg1, arg2, ...); // Вызов расширяющего метода
StaticClass.Method (arg0, arg1, arg2, ...); // Вызов статического метода
```

Интерфейсы тоже можно расширять:

```
public static T First<T> (this IEnumerable<T> sequence)
{
    foreach (T element in sequence)
        return element;
```

```
        throw new InvalidOperationException ("No elements!"); //Элементы отсутствуют
    }
    ...
    Console.WriteLine ("Seattle".First()); // S
```

Цепочки расширяющих методов

Как и методы экземпляра, расширяющие методы предлагают аккуратный способ для связывания вызовов функций в цепочки. Взгляните на следующие две функции:

```
public static class StringHelper
{
    public static string Pluralize (this string s) {...}
    public static string Capitalize (this string s) {...}
}
```

Строковые переменные `x` и `y` эквивалентны и получают значение `"Sausages"`, но `x` использует расширяющие методы, тогда как `y` — статические:

```
string x = "sausage".Pluralize().Capitalize();
string y = StringHelper.Capitalize (StringHelper.Pluralize ("sausage"));
```

Неоднозначность и распознавание

Пространства имен

Расширяющий метод не может быть доступен до тех пор, пока его пространство имен не окажется в области видимости, обычно за счет импорта посредством оператора `using`. Взгляните на приведенный далее расширяющий метод `IsCapitalized`:

```
using System;
namespace Utils
{
    public static class StringHelper
    {
        public static bool IsCapitalized (this string s)
        {
            if (string.IsNullOrEmpty(s)) return false;
            return char.IsUpper (s[0]);
        }
    }
}
```

Для применения метода `IsCapitalized` в показанном ниже приложении должно импортироваться пространство имен `Utils`, иначе на этапе компиляции возникнет ошибка:

```
namespace MyApp
{
    using Utils;
    class Test
    {
        static void Main() => Console.WriteLine ("Perth".IsCapitalized());
    }
}
```

Расширяющий метод или метод экземпляра

Любой совместимый метод экземпляра всегда будет иметь преимущество над расширяющим методом. В следующем примере предпочтение всегда будет отдаваться методу Foo класса Test — даже если осуществляется вызов с аргументом x типа int:

```
class Test
{
    public void Foo (object x) { } // Этот метод всегда имеет преимущество
}
static class Extensions
{
    public static void Foo (this Test t, int x) { }
}
```

Единственный способ обратиться к расширяющему методу в такой ситуации — воспользоваться нормальным статическим синтаксисом; другими словами, Extensions.Foo(...).

Расширяющий метод или другой расширяющий метод

Если два расширяющих метода имеют одинаковые сигнатуры, тогда расширяющий метод должен вызываться как обычный статический метод, чтобы устранить неоднозначность при вызове. Однако если один расширяющий метод имеет более специфичные аргументы, то предпочтение будет отдаваться ему.

В целях иллюстрации рассмотрим два класса:

```
static class StringHelper
{
    public static bool IsCapitalized (this string s) {...}
}
static class ObjectHelper
{
    public static bool IsCapitalized (this object s) {...}
}
```

В следующем коде вызывается метод IsCapitalized класса StringHelper:

```
bool test1 = "Perth".IsCapitalized();
```

Классы и структуры считаются более специфичными, чем интерфейсы.

Понижение уровня расширяющего метода

Интересный сценарий может возникнуть, когда в Microsoft добавят в библиотеку времени выполнения .NET расширяющий метод, который конфликтует с расширяющим методом в какой-то существующей сторонней библиотеке. Как автор сторонней библиотеки, вы можете принять решение “отозвать” свой метод расширения, но не удалять его и не нарушать двоичную совместимость с существующими потребителями.

К счастью, этого легко добиться, просто удалив ключевое слово this из определения расширяющего метода. В итоге расширяющий метод понижается до обычного статического метода. Изящество такого решения заключается в том, что любая сборка, скомпилированная с использованием старой библиоте-

ки, продолжит работать (и привязываться к методу, как и ранее). Причина в том, что на этапе компиляции вызовы расширяющих методов преобразуются в вызовы статических методов.

Потребители будут затронуты понижением уровня только в случае перекомпиляции своего кода, и тогда вызовы прежнего расширяющего метода будут привязаны к версии Microsoft (в случае импортирования соответствующего пространства имен). Если потребитель по-прежнему пожелает обратиться к вашему методу, тогда он может вызвать его как статический метод.

Анонимные типы

Анонимный тип — это простой класс, созданный на лету с целью хранения набора значений. Для создания анонимного типа применяется ключевое слово `new` с инициализатором объекта, указывающим свойства и значения, которые будет содержать тип; например:

```
var dude = new { Name = "Bob", Age = 23 };
```

Компилятор транслирует данный оператор в (приблизительно) такой код:

```
internal class AnonymousGeneratedTypeName
{
    private string name;      // Фактическое имя поля несущественно
    private int    age;        // Фактическое имя поля несущественно
    public AnonymousGeneratedTypeName (string name, int age)
    {
        this.name = name; this.age = age;
    }

    public string Name => name;
    public int    Age   => age;

    // Методы Equals и GetHashCode переопределены (см. главу 6).
    // Метод ToString также переопределен.
}
...
var dude = new AnonymousGeneratedTypeName ("Bob", 23);
```

При ссылке на анонимный тип должно использоваться ключевое слово `var`, т.к. имя этого типа не известно.

Имя свойства анонимного типа может быть выведено из выражения, которое само по себе является идентификатором (или заканчивается им); таким образом:

```
int Age = 23;
var dude = new { Name = "Bob", Age, Age.ToString().Length };
```

эквивалентно:

```
var dude = new { Name = "Bob", Age = Age, Length = Age.ToString().Length };
```

Два экземпляра анонимного типа, объявленные внутри одной сборки, будут иметь один и тот же лежащий в основе тип, если их элементы идентично именованы и типизированы:

```
var a1 = new { X = 2, Y = 4 };
var a2 = new { X = 2, Y = 4 };
Console.WriteLine (a1.GetType() == a2.GetType()); // True
```

Кроме того, метод `Equals` переопределен, чтобы выполнять *структурное сравнение эквивалентности* (сравнение данных):

```
Console.WriteLine (a1.Equals (a2)); // True
```

С другой стороны операция сравнения эквивалентности (`==`) выполняет ссылочное сравнение:

```
Console.WriteLine (a1 == a2); // False
```

Можно создавать массивы анонимных типов, как показано ниже:

```
var dudes = new []
{
    new { Name = "Bob", Age = 30 },
    new { Name = "Tom", Age = 40 }
};
```

Метод не может (удобно) возвращать объект анонимного типа, поскольку писать метод с возвращаемым типом `var` не допускается:

```
var Foo() => new { Name = "Bob", Age = 30 }; // Незаконно!
```

(В последующих разделах будут описаны записи и кортежи, которые предлагают альтернативные подходы для возвращения нескольких значений из метода.)

Анонимные типы являются неизменяемыми, поэтому их экземпляры нельзя модифицировать после создания. Тем не менее, начиная с версии C# 10, можно использовать ключевое слово `with` для создания копии с вариациями (*неразрушающее изменение*):

```
var a1 = new { A = 1, B = 2, C = 3, D = 4, E = 5 };
var a2 = a1 with { E = 10 };
Console.WriteLine (a2); // { A = 1, B = 2, C = 3, D = 4, E = 10 }
```

Анонимные типы особенно удобны при написании запросов LINQ (глава 8).

Кортежи

Подобно анонимным типам кортежи предлагают простой способ хранения набора значений. Главный замысел кортежей — безопасно возвращать множество значений из метода, не прибегая к параметрам `out` (то, что невозможно делать с помощью анонимных типов). Однако тогда были введены записи, предлагающие краткий типизированный подход, который рассматривается в следующем разделе.



Кортежи поддерживают почти все, что обеспечивают анонимные типы, и обладают потенциальным преимуществом, будучи типами значений, но их основной недостаток связан со стиранием типов во время выполнения вместе с именованными элементами (как вскоре будет показано).

Создать **литеральный кортеж** проще всего, указав в круглых скобках список желаемых значений. В результате создается кортеж с *неименованными* элементами, на которые можно ссылаться как на Item1, Item2 и т.д.:

```
var bob = ("Bob", 23); // Позволить компилятору вывести типы элементов  
Console.WriteLine (bob.Item1); // Bob  
Console.WriteLine (bob.Item2); // 23
```

Кортежи являются *типами значений с изменяемыми (допускающими чтение/запись) элементами*:

```
var joe = bob; // joe - *копия* bob  
joe.Item1 = "Joe"; // Изменить значение элемента Item1 в joe с Bob на Joe  
Console.WriteLine (bob); // (Bob, 23)  
Console.WriteLine (joe); // (Joe, 23)
```

В отличие от анонимных типов *тип кортежа* можно указывать явно. Нужно лишь перечислить типы элементов в круглых скобках:

```
(string,int) bob = ("Bob", 23); // Ключевое слово var для кортежей  
// не обязательно!
```

Это означает, что кортеж можно удобно возвращать из метода:

```
(string,int) person = GetPerson(); // При желании взамен можно было бы  
// применить var  
Console.WriteLine (person.Item1); // Bob  
Console.WriteLine (person.Item2); // 23  
(string,int) GetPerson() => ("Bob", 23);
```

Кортежи хорошо сочетаются с обобщениями, так что все следующие типы законны:

```
Task<(string,int)>  
Dictionary<(string,int),Uri>  
IEnumerable<(int id, string name)> // Именование элементов описано ниже
```

Именование элементов кортежа

При создании литературных кортежей элементам можно дополнительно назначать *содержательные имена*:

```
var tuple = (name:"Bob", age:23);  
Console.WriteLine (tuple.name); // Bob  
Console.WriteLine (tuple.age); // 23
```

То же самое разрешено делать при указании *типов кортежей*:

```
var person = GetPerson();  
Console.WriteLine (person.name); // Bob  
Console.WriteLine (person.age); // 23  
(string name, int age) GetPerson() => ("Bob", 23);
```



В разделе “Записи” далее в главе будет показано, как можно определять простые классы или структуры, упрощая определение формального типа возвращаемого значения:

```
var person = GetPerson();
Console.WriteLine (person.Name);                                // Bob
Console.WriteLine (person.Age);                                 // 23

Person GetPerson() => new ("Bob", 23);
record Person (string Name, int Age);
```

В отличие от кортежей свойства записи (*Name* и *Age*) строго типизированы, поэтому их можно легко реорганизовать. Такой подход также снижает дублирование кода и способствует эффективному проектированию несколькими способами. Во-первых, процесс выбора простого, ненадуманного имени для типа помогает проверить правильность проекта (невозможность поступить так может указывать на отсутствие единой связной цели). Во-вторых, вполне вероятно, что в конечном итоге к записи будут добавлены методы или другой код (правильно названные типы обычно *привлекают код*), а перенос кода в данные является базовым принципом качественного объектно-ориентированного проектирования.

Обратите внимание, что элементы по-прежнему можно трактовать как неименованные и ссылаться на них как на *Item1*, *Item2* и т.д. (хотя Visual Studio скрывает эти поля от средства IntelliSense).

Имена элементов автоматически выводятся из имен свойств или полей:

```
var now = DateTime.Now;
var tuple = (now.Day, now.Month, now.Year);
Console.WriteLine (tuple.Day);                                  // Нормально
```

Кортежи совместимы по типу друг с другом, если типы их элементов совпадают (по порядку). Совпадение имен элементов не обязательно:

```
(string name, int age, char sex) bob1 = ("Bob", 23, 'M');
(string age, int sex, char name) bob2 = bob1;                // Ошибки нет!
```

Рассматриваемый пример приводит к сбивающим с толку результатам:

```
Console.WriteLine (bob2.Name);                                // M
Console.WriteLine (bob2.Age);                                 // Bob
Console.WriteLine (bob2.Sex);                                // 23
```

Стирание типов

Ранее мы заявляли, что компилятор C# поддерживает анонимные типы путем построения специальных классов с именованными свойствами для каждого элемента. В случае кортежей компилятор C# работает по-другому и задействует существующее семейство обобщенных структур:

```
public struct ValueTuple<T1>
public struct ValueTuple<T1, T2>
public struct ValueTuple<T1, T2, T3>

...
```

Каждая структура `ValueTuple<>` содержит поля с именами `Item1`, `Item2` и т.д. Следовательно, `(string, int)` является псевдонимом для `ValueTuple<string, int>`, а это значит, что именованные элементы кортежей не имеют соответствующих имен свойств внутри лежащих в основе типов. Взамен имена существуют только в исходном коде и в “воображении” компилятора. Во время выполнения имена по обыкновению исчезают, так что после декомпиляции программы, которая ссылается на именованные элементы кортежей, вы увидите только ссылки на `Item1`, `Item2` и т.д. Более того, когда вы исследуете переменную типа кортежа в отладчике после ее присваивания экземпляру `object` (или выводите ее на экран в LINQPad), имена элементов отсутствуют. И самое главное — вы не можете использовать *рефлексию* (глава 18) для определения имен элементов кортежа во время выполнения. Это означает, что с помощью таких API-интерфейсов, как `System.Net.Http.HttpClient`, кортежи не могут заменять анонимные типы в сценариях вроде показанного ниже:

```
// Создать полезную нагрузку JSON:  
var json = JsonContent.Create (new { id = 123, name = "Test" })
```



Мы говорим, что имена исчезают *по обыкновению*, т.к. существует исключение. Для методов/свойств, которые возвращают именованные типы кортежей, компилятор выпускает имена элементов, применяя к возвращаемому типу члена специальный атрибут под названием `TupleElementNamesAttribute` (см. раздел “Атрибуты” далее в главе). Это позволяет именованным элементам работать при вызове методов в другой сборке (исходный код которой компилятору не доступен).

Назначение псевдонимов кортежам (C# 12)

Начиная с версии C# 12, с использованием директивы `using` можно определять псевдонимы для кортежей:

```
using Point = (int, int);  
Point p = (3, 4);
```

Такой прием работает и с кортежами, имеющими именованные элементы:

```
using Point = (int X, int Y); // Допустимо (но не обязательно *хорошо*!)  
Point p = (3, 4);
```

Вскоре вы увидите, что записи предлагают полностью типизированное решение с таким же уровнем краткости:

```
Point p = new (3, 4);  
record Point (int X, int Y);
```

Метод `ValueTuple.Create`

Кортежи можно создавать также через фабричный метод из (необщенного) типа `ValueTuple`:

```
ValueTuple<string, int> bob1 = ValueTuple.Create ("Bob", 23);  
(string, int) bob2 = ValueTuple.Create ("Bob", 23);  
(string name, int age) bob3 = ValueTuple.Create ("Bob", 23);
```

Деконструирование кортежей

Кортежи неявно поддерживают шаблон деконструирования (см. раздел “Деконструкторы” в главе 3), поэтому кортеж можно легко *деконструировать* в индивидуальные переменные. Взгляните на следующий код:

```
var bob = ("Bob", 23);
string name = bob.Item1;
int age = bob.Item2;
```

С помощью деконструктора кортежа этот код можно упростить:

```
var bob = ("Bob", 23);
(string name, int age) = bob;      // Деконструировать кортеж bob в
                                    // отдельные переменные (name и age).
Console.WriteLine (name);
Console.WriteLine (age);
```

Синтаксис деконструирования очень похож на синтаксис объявления кортежа с именованными элементами, что может привести к путанице. Разница подчеркивается в приведенном ниже коде:

```
(string name, int age) = bob; // Деконструирование кортежа
(string name, int age) bob2 = bob; // Объявление нового кортежа
```

Вот еще один пример, на этот раз с вызовом метода и выведением типа (var):

```
var (name, age, sex) = GetBob();
Console.WriteLine (name);           // Bob
Console.WriteLine (age);            // 23
Console.WriteLine (sex);           // M
string, int, char) GetBob() => ("Bob", 23, 'M');
```

Деконструировать можно также прямо в поля и свойства, что обеспечивает удобный сокращенный прием для заполнения множества полей или свойств в конструкторе:

```
class Point
{
    public readonly int X, Y;
    public Point (int x, int y) => (X, Y) = (x, y);
}
```

Сравнение эквивалентности

Как и в анонимных типах, метод Equals выполняет структурное сравнение эквивалентности, т.е. сравнивает *данные*, а не ссылки:

```
var t1 = ("one", 1);
var t2 = ("one", 1);
Console.WriteLine (t1.Equals (t2)); // True
```

Кроме того, типы ValueTuple<> перегружают операции == и !=:

```
Console.WriteLine (t1 == t2);      // True (начиная с версии C# 7.3)
```

Кортежи также переопределяют метод GetHashCode, делая практическим использование кортежей в качестве ключей в словарях. Сравнение эквивалентно-

сти подробно рассматривается в разделе “Сравнение эквивалентности” главы 6, а словари — в главе 7.

Типы `ValueTuple`<> также реализуют интерфейс `IComparable` (см. раздел “Сравнение порядка” в главе 6), делая возможным применение кортежей как ключей сортировки.

Классы `System.Tuple`

В пространстве имен `System` вы обнаружите еще одно семейство обобщенных типов под названием `Tuple` (не `ValueTuple`). Они появились еще в 2010 году и были определены как классы (тогда как типы `ValueTuple` являются структурами). Оглядываясь назад, можно сказать, что определение кортежей как классов было заблуждением: в сценариях, в которых обычно используются кортежи, структуры дают небольшое преимущество в плане производительности (за счет избегания излишних выделений памяти), практически не имея недостатков. Поэтому при добавлении языковой поддержки для кортежей в версии C# 7 существующие типы `Tuple` были проигнорированы в пользу новых типов `ValueTuple`. Вы по-прежнему можете встречать классы `Tuple` в коде, написанном до выхода C# 7. Они не располагают специальной языковой поддержкой и применяются следующим образом:

```
Tuple<string,int> t = Tuple.Create ("Bob", 23);           // Фабричный метод
Console.WriteLine (t.Item1);                                // Bob
Console.WriteLine (t.Item2);                                // 23
```

Записи

Запись (record) представляет собой особый вид класса, который предназначен для эффективной работы с неизменяемыми (допускающими только чтение) данными. Наиболее полезной характеристикой записей является *неразрушающее изменение*, но их также удобно использовать для создания типов, которые просто объединяют или хранят данные. В простых случаях записи позволяют избавиться от стереотипного кода и одновременно соблюдают семантику эквивалентности, наиболее подходящую для неизменяемых типов.

Записи представляют собой конструкцию C#, существующую только на этапе компиляции. Во время выполнения среда CLR видит их просто как классы или структуры (с группой дополнительных “синтезированных” членов, добавленных компилятором).

Подоплека

Реализация неизменяемых типов (поля которых не могут быть модифицированы после инициализации) — популярная стратегия упрощения программного обеспечения и уменьшения количества дефектов. Она также является основным аспектом функционального программирования, при котором избегают изменяемого состояния, а функции трактуются как данные. Такой принцип был мотивом появления LINQ.

Чтобы “модифицировать” неизменяемый объект, потребуется создать новый объект и скопировать в него данные, включая модификации (что называется *неразрушающим изменением*). С точки зрения производительности это не настолько неэффективно, как можно было бы ожидать, поскольку всегда будет достаточно *поверхностной копии* (*глубокая копия*, предусматривающая копирование также подобъектов и коллекций, не нужна, если данные неизменяемы). Но с точки зрения усилий по написанию кода реализация неразрушающего изменения может оказаться крайне неэффективной, особенно при наличии множества свойств. Записи решают проблему посредством шаблона, поддерживающего самим языком.

Вторая проблема связана с тем, что программисты — особенно занимающиеся *функциональным программированием* — временами используют неизменяемые типы только для объединения данных (не добавляя линии поведения). Определение таких типов сопряжено с большими трудозатратами и требует написания конструктора для присваивания каждого параметра каждому открытому свойству (деконструктор тоже может оказаться полезным). Благодаря записям работа подобного рода возлагается на компилятор.

Наконец, одно из последствий неизменяемости объекта заключается в том, что его идентичность не может меняться, а потому для таких типов удобнее реализовывать *структурную эквивалентность*, нежели *сырьенную эквивалентность*. Структурная эквивалентность означает, что два экземпляра будут одинаковыми, если одинаковы их данные (как в случае кортежей). По умолчанию записи обеспечивают структурную эквивалентность — независимо от того, является базовый тип классом или структурой — без какого-либо стереотипного кода.

Определение записи

Определение записи похоже на определение класса или структуры и может содержать такие же виды членов, включая поля, свойства, методы и т.д. Записи могут реализовывать интерфейсы, а (основанные на классах) записи могут быть подклассами других (основанных на классах) записей.

По умолчанию типом, лежащим в основе в записи, является класс:

```
record Point { } // Point является классом
```

Начиная с версии C# 10, типом, лежащим в основе в записи, также может быть структура:

```
record struct Point { } // Point является структурой
```

(Разрешено определение record class, которое представляет собой то же самое, что и record.)

Простая запись может содержать лишь набор свойств, допускающих только инициализацию, и вполне вероятно конструктор:

```
record Point
{
    public Point (double x, double y) => (X, Y) = (x, y);
    public double X { get; init; }
    public double Y { get; init; }
}
```



В конструкторе задействовано сокращение, которое было описано в предыдущем разделе; показанный ниже код:

```
(X, Y) = (x, y);  
эквивалентен (в данном случае) следующему коду:  
{ this.X = x; this.Y = y; }
```

Компилятор C# трансформирует определение записи в класс (или структуру) и выполняет перечисленные ниже дополнительные шаги:

- реализует защищенный конструктор копирования (и скрытый метод клонирования), способствуя неразрушающему изменению;
- переопределяет/перегружает функции, связанные с эквивалентностью, для реализации структурной эквивалентности;
- переопределяет метод `ToString` (для расширения открытых свойств записи, как в случае анонимных типов).

Предыдущее определение записи расширяется примерно так:

```
class Point  
{  
    public Point (double x, double y) => (X, Y) = (x, y);  
  
    public double X { get; init; }  
    public double Y { get; init; }  
  
    protected Point (Point original) // "Конструктор копирования"  
    {  
        this.X = original.X; this.Y = original.Y  
    }  
  
    // Этот метод имеет странное имя, сгенерированное компилятором:  
    public virtual Point <Clone>$() => new Point (this); // Метод  
                                            // клонирования  
  
    // Дополнительный код для переопределения  
    // Equals, ==, !=, GetHashCode, ToString  
    // ...  
}
```



Хотя ничто не может воспрепятствовать добавлению к конструктору необязательных параметров, общепринятый шаблон (по крайней мере, в открытых библиотеках) предусматривает вынесение их за пределы конструктора и реализацию в виде свойств, допускающих только инициализацию:

```
new Foo (123, 234) { Optional2 = 345 };  
record Foo  
{  
    public Foo (int required1, int required2) { ... }  
    public int Required1 { get; init; }  
    public int Required2 { get; init; }  
    public int Optional1 { get; init; }  
    public int Optional2 { get; init; }  
}
```

Преимущество этого шаблона заключается в том, что позже вы сможете безопасно добавлять свойства только для инициализации, не нарушая двоичной совместимости с потребителями, которые были скомпилированы с более старыми версиями вашей сборки.

Списки параметров

Определение записи может быть сокращено посредством *списка параметров*:

```
record Point (double X, double Y)
{
    // Здесь можно определить дополнительные члены класса...
}
```

Параметры могут иметь модификаторы `in` и `params`, но не `out` или `ref`. Если список параметров указан, тогда компилятор выполняет следующие дополнительные шаги:

- реализует для каждого параметра свойство, допускающее только инициализацию;
- реализует *основной конструктор* для заполнения свойств;
- реализует деструктор.

Это значит, что если мы объявим запись `Point` просто как

```
record Point (double X, double Y);
```

то компилятор в итоге сгенерирует (почти) в точности то, что было показано ранее в расширении определения записи. Небольшое отличие связано с тем, что *основной конструктор* будет иметь параметры `X` и `Y`, но не `x` и `y`:

```
public Point (double X, double Y)          // "Основной конструктор"
{
    this.X = X; this.Y = Y;
}
```



Кроме того, из-за принадлежности к основному конструктору параметры `X` и `Y` “магическим” образом становятся доступными любым инициализаторам полей или свойств в вашей записи. Мы обсудим все тонкости в разделе “Основные конструкторы” далее в главе.

Еще одно отличие при определении списка параметров связано с тем, что компилятор также генерирует деструктор:

```
public void Deconstruct (out double X, out double Y) // Деструктор
{
    X = this.X; Y = this.Y;
}
```

С применением следующего синтаксиса можно создавать подклассы записей со списками параметров:

```
record Point3D (double X, double Y, double Z) : Point (X, Y);
```

Компилятор тогда выпустит основной конструктор такого вида:

```
class Point3D : Point
{
    public double Z { get; init; }

    public Point3D (double X, double Y, double Z) : base (X, Y)
        => this.Z = Z;
}
```



Списки параметров предлагают удобный сокращенный прием на тот случай, когда необходим класс, который просто объединяет вместе набор значений (*тип-произведение* в функциональном программировании), и также могут быть полезны для создания прототипов. Как будет показано позже, они не настолько удобны, когда к средствам доступа только для инициализации нужно добавлять логику (вроде проверки достоверности аргументов).

Изменяемость с помощью структур типа записей

При определении списка параметров в структуре типа записи компилятор генерирует свойства, поддерживающие запись, вместо свойств, доступных только для инициализации, если только объявление записи не предварено префиксом `readonly`:

```
readonly record struct Point (double X, double Y);
```

Обоснование заключается в том, что в типовых случаях использования преимущества неизменяемости в плане безопасности возникают не из-за того, что *структура неизменяема*, а по той причине, что ее *исходная часть* является неизменяемой. В следующем примере нельзя изменять поле `X`, хотя оно доступно для записи:

```
var test = new Immutable();
test.Field.X++; // Запрещено, т.к. Field допускает только чтение
test.Prop.X++; // Запрещено, т.к. в Prop определено только средство {get;}
class Immutable
{
    public readonly Mutable Field;
    public Mutable Prop { get; }
}
struct Mutable { public int X, Y; }
```

А пока можно было бы поступить следующим образом:

```
var test = new Immutable();
Mutable m = test.Prop;
m.X++;
```

Все, чего удастся добиться — это изменить локальную переменную (копию `test.Prop`). Изменение локальной переменной может быть полезной оптимизацией и не отменяет преимуществ системы неизменяемых типов.

И наоборот, если сделать `Field` доступным для записи полем, а `Prop` — доступным для записи свойством, то можно было бы просто заменить их содержимое вне зависимости от способа объявления структуры `Mutable`.

Неразрушающее изменение

Самым важным шагом, который компилятор выполняет со всеми записями, считается реализация **конструктора копирования** (и скрытого метода **клонирования**), что делает возможным неразрушающее изменение через ключевое слово **with**:

```
Point p1 = new Point (3, 3);
Point p2 = p1 with { Y = 4 };
Console.WriteLine (p2);           // Point { X = 3, Y = 4 }
record Point (double X, double Y);
```

В приведенном примере **p2** является копией **p1**, но с его свойством **Y**, установленным в 4. Преимущество становится более явным при наличии большего количества свойств:

```
Test t1 = new Test (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8);
Test t2 = t1 with { A = 10, C = 30 };
Console.WriteLine (t2);
record Test (int A, int B, int C, int D, int E, int F, int G, int H);
```

Вот вывод:

```
Test { A = 10, B = 2, C = 30, D = 4, E = 5, F = 6, G = 7, H = 8 }
```

Неразрушающее изменение происходит в два этапа.

Сначала **конструктор копирования** клонирует запись. По умолчанию он копирует каждое внутреннее поле записи, создавая точную копию и минуя накладные расходы на выполнение любой логики в средствах доступа только для инициализации. Включаются все поля (открытые и закрытые, а также скрытые поля, которые поддерживают автоматические свойства).

Затем обновляется каждое свойство в **списке инициализаторов членов** (на этот раз с использованием средств доступа только для инициализации).

Компилятор транслирует следующий код:

```
Test t2 = t1 with { A = 10, C = 30 };
```

в примерно такой функционально эквивалентный вариант:

```
Test t2 = new Test(t1);          // Использовать конструктор копирования для
                                // клонирования t1 поле за полем
t2.A = 10;                     // Обновить свойство A
t2.C = 30;                     // Обновить свойство C
```

(Тот же самый код не скомпилируется, если вы напишете его явно, поскольку **A** и **C** — свойства, допускающие только инициализацию. Кроме того, конструктор копирования является **защищенным**; компилятор C# обходит это за счет его вызова через скрытый метод **public** по имени **<Clone>\$**, реализованный для записи.) При необходимости вы можете определять собственный конструктор копирования. Тогда компилятор C# будет применять ваше определение, не генерируя свое:

```
protected Point (Point original)
{
    this.X = original.X; this.Y = original.Y;
}
```

Писать специальный конструктор копирования может быть полезно, когда ваша запись содержит изменяемые подобъекты или коллекции, которые вы хотите клонировать, либо при наличии вычисляемых полей, которые желательно очистить. К сожалению, стандартную реализацию можно только заменять, но не *расширять*.



При создании подкласса другой записи конструктор копирования несет ответственность за копирование только собственных полей. Чтобы скопировать поля базовой записи, делегируйте ей работу:

```
protected Point (Point original) : base (original)
{
    ...
}
```

Проверка достоверности свойств

С помощью явных свойств логику проверки достоверности можно помещать внутрь средств доступа только для инициализации. В приведенном ниже примере мы гарантируем, что X не может быть NaN:

```
record Point
{
    // Обратите внимание, что мы присваиваем x свойству X (не полю _x):
    public Point (double x, double y) => (X, Y) = (x, y);

    double _x;
    public double X
    {
        get => _x;
        init
        {
            if (double.IsNaN (value))
                throw new ArgumentException ("X Cannot be NaN");
                // X не может быть NaN
            _x = value;
        }
    }
    public double Y { get; init; }
}
```

Наше решение обеспечивает выполнение проверки достоверности как при конструировании, так и во время неразрушающего изменения объекта:

```
Point p1 = new Point (2, 3);
Point p2 = p1 with { X = double.NaN }; // Генерируется исключение
```

Вспомните, что генерируемый компилятором *конструктор копирования* копирует все поля и автоматические свойства. Это означает, что сгенерированный конструктор копирования теперь будет выглядеть примерно так:

```
protected Point (Point original)
{
    _x = original._x; Y = original.Y;
}
```

Обратите внимание, что копирование поля `_x` обходит средство доступа свойства `X`. Тем не менее, ничего не нарушается, т.к. в точности копируется объект, который уже был благополучно заполнен через средство доступа только для инициализации свойства `X`.

Вычисляемые поля и ленивая оценка

Популярным шаблоном функционального программирования, который хорошо работает с неизменяемыми типами, является *ленивая оценка*, когда значение не вычисляется до тех пор, пока оно не потребуется, и затем кешируется для многократного потребления. Предположим, например, что мы хотим определить в записи `Point` свойство, которое возвращает расстояние от начала координат $(0, 0)$:

```
record Point (double X, double Y)
{
    public double DistanceFromOrigin => Math.Sqrt (X*X + Y*Y);
}
```

Давайте теперь попробуем провести рефакторинг, чтобы избежать затрат на повторное вычисление значения `DistanceFromOrigin` при каждом обращении к свойству. Мы начнем с удаления списка свойств и определения `X`, `Y` и `DistanceFromOrigin` как свойств только для чтения. Затем мы можем вычислять `DistanceFromOrigin` в конструкторе:

```
record Point
{
    public double X { get; }
    public double Y { get; }
    public double DistanceFromOrigin { get; }
    public Point (double x, double y) =>
        (X, Y, DistanceFromOrigin) = (x, y, Math.Sqrt (x*x + y*y));
}
```

Прием работает, но он не поддерживает неразрушающее изменение (изменение `X` и `Y` на свойства, допускающие только инициализацию, нарушит работу кода, поскольку свойство `DistanceFromOrigin` будет устаревать после выполнения средств доступа только для инициализации). Решение также не оптимально в том, что вычисление всегда выполняется вне зависимости от того, читается ли в принципе свойство `DistanceFromOrigin`. Оптимальное решение предусматривает кеширование значения свойства в поле и его заполнение *ленивым* образом (при первом использовании):

```
record Point
{
    ...
    double? _distance;
    public double DistanceFromOrigin
    {
        get
        {
            if (_distance == null)
```



```
_distance = Math.Sqrt (X*X + Y*Y);  
return distance.Value;
```

Формально в показанном выше коде мы изменяем `_distance`. Однако тип `Point` по-прежнему законно называть неизменяемым. Изменение поля исключительно для заполнения значения, оцениваемого ленивым образом, не делает недействительными принципы или преимущества неизменяемости и даже может быть замаскировано с помощью типа `Lazy<T>`, который рассматривается в главе 21.

Благодаря операции присваивания с объединением с null (??=) языка C# мы можем сократить объявление свойства до одной строки кода:

```
public double DistanceFromOrigin => distance ??= Math.Sqrt (X*X + Y*Y);
```

(Код означает следующее: возвратить значение `_distance`, если оно не равно `null`, а иначе возвратить значение `Math.Sqrt (X*X + Y*Y)` и одновременно присвоить его `_distance`.)

Для работы со свойствами, допускающими только инициализацию, необходим еще один шаг — очистка кешированного поля `_distance`, когда X или Y обновляется через средство доступа `init`. Ниже приведен полный код:

```
record Point
{
    public Point (double x, double y) => (X, Y) = (x, y);
    double _x, _y;
    public double X { get => _x; init { _x = value; _distance = null; } }
    public double Y { get => _y; init { _y = value; _distance = null; } }
    double? _distance;
    public double DistanceFromOrigin => _distance ??= Math.Sqrt (X*X + Y*Y);
}
```

Теперь запись Point можно изменять неразрушающим образом:

```
Point p1 = new Point (2, 3);
Console.WriteLine (p1.DistanceFromOrigin);      // 3.605551275463989
Point p2 = p1 with { Y = 4 };
Console.WriteLine (p2.DistanceFromOrigin);      // 4.47213595499958
```

Приятный бонус заключается в том, что автоматически сгенерированный конструктор копирования переписывает кешированное поле `_distance`. Это означает, что если запись имеет другие свойства, которые не участвуют в вычислении, тогда неразрушающее изменение таких свойств не приведет к нежелательной утрате кешированного значения. Если указанный бонус вас не интересует, то альтернативой очистке кешированного значения в средствах доступа `init` является реализация специального конструктора копирования, который игнорирует кешированное поле. Код будет более лаконичным, потому что он работает со списками параметров, к тому же специальный конструктор копирования может задействовать деконструктор:

```

record Point (double X, double Y)
{
    double? _distance;
    public double DistanceFromOrigin => _distance ??= Math.Sqrt (X*X + Y*Y);
    protected Point (Point other) => (X, Y) = other;
}

```

Имейте в виду, что в любом решении добавление полей, вычисляемых ленивым образом, нарушает стандартное сравнение структурной эквивалентности (поскольку такие поля могут заполняться, а могут и не заполняться), хотя вскоре будет показано, что это относительно легко исправить.

Основные конструкторы

При определении записи со списком параметров компилятор автоматически генерирует объявления свойств, а также основной конструктор (и деструктор). Как демонстрировалось ранее, прием хорошо работал в простых случаях, а в более сложных ситуациях список параметров можно было опускать и записывать код объявления свойств и конструктора вручную.

В языке C# также предлагается умеренно полезный промежуточный вариант (если вы готовы иметь дело с необычной семантикой основных конструкторов), который предусматривает определение списка параметров и самостоятельное написание отдельных или всех объявлений свойств:

```

record Student (string ID, string LastName, string GivenName)
{
    public string ID { get; } = ID;
}

```

В этом случае мы “взяли на себя” объявление свойства ID, определив его как допускающее только чтение (а не только инициализацию), что предотвращает его участие в неразрушающем изменении. Если вам не нужно изменять специфическое свойство неразрушающим образом, то его превращение в допускающее только чтение позволяет хранить вычисляемые данные в записи без необходимости в написании кода механизма обновления.

Обратите внимание, что мы должны включить инициализатор свойства (выделенный полужирным):

```
public string ID { get; } = ID;
```

Когда вы берете на себя объявление свойства, то также отвечаете за инициализацию его значения; основной конструктор больше не делает ее автоматически. (Это в точности соответствует поведению при определении основных конструкторов в классах или структурах.) Кроме того, имейте в виду, что выделенный полужирным ID относится к *параметру основного конструктора*, в не к свойству ID.



Благодаря структурам типа записей появляется законная возможность переопределить свойство как поле:

```

record struct Student (string ID)
{
    public string ID = ID;
}

```

В соответствии с семантикой основных конструкторов классов и структур (см. раздел “Основные конструкторы” ранее в главе), параметры основного конструктора (в данном случае `ID`, `LastName` и `GivenName`) “магическим” образом доступны всем инициализаторам полей и свойств. Мы можем проиллюстрировать сказанное, расширив пример:

```
record Student (string ID, string LastName, string FirstName)
{
    public string ID { get; } = ID;
    readonly int _enrollmentYear = int.Parse (ID.Substring (0, 4));
}
```

И снова выделенный полужирным идентификатор `ID` относится к параметру основного конструктора, а не к свойству. (Причина отсутствия неоднозначности заключается в том, что доступ к свойствам из инициализаторов незаконен.)

В показанном примере мы вычисляем `_enrollmentYear` по первым четырем цифрам `ID`. Хотя безопасно хранить это в поле только для чтения (т.к. свойство `ID` допускает только чтение и потому не может быть изменено неразрушающим образом), в реальности данный код не будет работать настолько же хорошо. Дело в том, что из-за отсутствия явного конструктора нет центрального места для проверки достоверности значения `ID` и генерации содержательного исключения, если оно недопустимо (общее требование).

Проверка достоверности также является веской причиной написания явных средств доступа только для инициализации (как обсуждалось в разделе “Проверка достоверности свойств” ранее в главе). К сожалению, в таком сценарии основные конструкторы не работают надлежащим образом. В целях иллюстрации рассмотрим следующую запись, где средство доступа `init` выполняет проверку на предмет равенства `null`:

```
record Person (string Name)
{
    string _name = Name;
    public string Name
    {
        get => _name;
        init => _name = value ?? throw new ArgumentNullException ("Name");
    }
}
```

Поскольку `Name` — не автоматическое свойство, для него нельзя определить инициализатор. Лучшее, что мы можем предпринять — это обеспечить инициализатор для поддерживающего поля (выделен полужирным). К несчастью, в таком случае пропускается проверка на предмет равенства `null`:

```
var p = new Person (null); // Успешно! (Проверка на равенство null
                           // пропускается)
```

Сложность в том, что нет способа присвоить параметр основного конструктора свойству, не написав код самого конструктора. Несмотря на существование обходных путей (вроде вынесения логики проверки достоверности из средства доступа `init` в отдельный статический метод, который вызывается дважды), самый простой прием заключается в том, чтобы полностью отказаться от спи-

ска параметров и реализовать обычный конструктор вручную (а также при необходимости деструктор):

```
record Person
{
    public Person (string name) => Name = name; // Присвоить значение *СВОЙСТВУ*
    string _name;
    public string Name { get => _name; init => ... }
}
```

Записи и сравнение эквивалентности

Подобно структурам, анонимным типам и кортежам записи обеспечивают структурную эквивалентность в готовом виде, т.е. две записи равны, если равны их поля (и автоматические свойства):

```
var p1 = new Point (1, 2);
var p2 = new Point (1, 2);
Console.WriteLine (p1.Equals (p2));           // True
record Point (double X, double Y);
```

Операция эквивалентности работает также и с записями (как с кортежами):

```
Console.WriteLine (p1 == p2);                // True
```

Стандартная реализация эквивалентности для записей неизбежно оказывается хрупкой. В частности, ее работа нарушается, если запись содержит значения, вычисляемые ленивым образом, переходные значения, массивы или коллекции (которые требуют специальной обработки при сравнении эквивалентности). К счастью, ситуацию относительно легко исправить (когда нужно, чтобы сравнение эквивалентности работало), причем объем работы будет меньше, чем при добавлении полноценного поведения эквивалентности в классы или структуры.

В отличие от классов и структур вы не переопределяете метод `object.Equals` (и не можете это делать), а заменяете открытый метод `Equals` со следующей сигнатурой:

```
record Point (double X, double Y)
{
    double _someOtherField;
    public virtual bool Equals (Point other) =>
        other != null && X == other.X && Y == other.Y;
}
```

Метод `Equals` должен быть `virtual` (не `override`) и строго типизированным, чтобы принимать фактический тип записи (в данном случае `Point`, не `object`). Как только вы обеспечите корректную сигнатуру, компилятор будет автоматически вставлять ваш метод.

В рассматриваемом примере мы изменяем логику эквивалентности, так что сравниваются только `X` и `Y` (а `_someOtherField` игнорируется).

В случае создания подкласса другой записи вы можете вызывать метод `base.Equals`:

```
public virtual bool Equals (Point other) => base.Equals (other) && ...
```

Как и с любым типом, если вы занялись сравнением эквивалентности, то также должны переопределить метод GetHashCode. Приятная особенность записей в том, что вы не перегружаете операцию != или == и не реализуете интерфейс IEquatable<T>: все это сделано за вас. Мы полностью раскроем тему сравнения эквивалентности в разделе “Сравнение эквивалентности” главы 6.

Шаблоны

В главе 3 было продемонстрировано, как использовать операцию is для проверки, будет ли успешным ссылочное преобразование:

```
if (obj is string)
    Console.WriteLine (((string) obj).Length);
```

Или более лаконично:

```
if (obj is string s)
    Console.WriteLine (s.Length);
```

Здесь задействован так называемый *шаблон типа*. Операция is также поддерживает другие шаблоны, которые появились в недавних версиях C#, наподобие *шаблона свойства*:

```
if (obj is string { Length: 4 })
    Console.WriteLine ("A string with 4 characters");
```

Шаблоны поддерживаются в следующих контекстах:

- после операции is (переменная is шаблон);
- в операторах switch;
- в выражениях switch.

Мы уже раскрывали шаблон типа (и вкратце шаблон кортежа) в разделах “Переключение по типам” главы 2 и “Операция is” главы 3. В настоящем разделе мы рассмотрим более сложные шаблоны, которые были введены в последних версиях C#.

Некоторые из более специализированных шаблонов предназначены главным образом для применения в операторах/выражениях switch, где они уменьшают потребность в конструкциях when и позволяют использовать switch там, где раньше делать это было нельзя.



Шаблоны, обсуждаемые в настоящем разделе, в небольшой или умеренной степени полезны в ряде сценариев. Помните, что вы всегда можете заменить сильно шаблонизированные выражения switch простыми операторами if — или в некоторых случаях тернарной условной операцией — и часто без значительного объема добавочного кода.

Шаблон константы

Шаблон константы позволяет выполнять сопоставление непосредственно с константой; он удобен при работе с типом `object`:

```
void Foo (object obj)
{
    if (obj is 3) ...
}
```

Выражение, выделенное полужирным, эквивалентно такому выражению:

```
obj is int && (int)obj == 3
```

(Из-за статической типизации компилятор C# не разрешит использовать операцию `==` для сравнения экземпляра `object` напрямую с константой, т.к. ему заранее должны быть известны типы.)

Сам по себе данный шаблон не особо полезен, потому что существует разумная альтернатива:

```
if (3.Equals (obj)) ...
```

Как вскоре будет показано, шаблон константы может стать более полезным благодаря комбинациям шаблонов.

Реляционные шаблоны

Начиная с версии C# 9, в шаблонах можно применять операции `<`, `>`, `<=` и `>=`:

```
if (x is > 100) Console.WriteLine ("x is greater than 100"); // x больше 100
```

Еще большее удобство это приносит в `switch`:

```
string GetWeightCategory (decimal bmi) => bmi switch
{
    < 18.5m => "underweight",           // недостаток в весе
    < 25m     => "normal",              // нормальный вес
    < 30m     => "overweight",          // избыточный вес
    _           => "obese"                // ожирение
};
```

Реляционные шаблоны становятся даже более полезными в сочетании с комбинациями шаблонов.



Реляционный шаблон также работает в ситуации, когда на этапе компиляции переменная имеет тип `object`, но вы должны быть крайне осторожными при использовании числовых констант. В следующем примере последняя строка кода выводит `False`, т.к. там предпринимается попытка сопоставления десятичного значения с целочисленным литералом:

```
object obj = 2m;                      // obj - десятичное значение
Console.WriteLine (obj is < 3m); // True
Console.WriteLine (obj is < 3);   // False
```

Комбинаторы шаблонов

Начиная с версии C# 9, можно применять ключевые слова `and`, `or` и `not` для объединения шаблонов:

```
bool IsJanetOrJohn (string name) => name.ToUpper() is "JANET" or "JOHN";
bool IsVowel (char c) => c is 'a' or 'e' or 'i' or 'o' or 'u';
bool Between1And9 (int n) => n is >= 1 and <= 9;
bool IsLetter (char c) => c is >= 'a' and <= 'z'
                           or >= 'A' and <= 'Z';
```

Подобно операциям `&&` и `||` комбинатор `and` имеет более высокий приоритет, чем комбинатор `or`. Вы можете переопределить это с помощью круглых скобок.

Интересным трюком будет объединение комбинатора `not` с шаблоном типа для проверки, не относится ли объект к указанному типу:

```
if (obj is not string) ...
```

Такое решение выглядит изящнее следующего:

```
if (!(obj is string)) ...
```

Шаблон `var`

Шаблон `var` является вариацией шаблона *типа*, в котором имя типа заменено ключевым словом `var`. Такое преобразование всегда проходит успешно, а потому его цель — просто позволить повторно использовать переменную, следующую за `var`:

```
bool IsJanetOrJohn (string name) =>
    name.ToUpper() is var upper && (upper == "JANET" || upper == "JOHN");
```

Ниже представлен эквивалентный код:

```
bool IsJanetOrJohn (string name)
{
    string upper = name.ToUpper();
    return upper == "JANET" || upper == "JOHN";
}
```

Возможность введения и применения промежуточной переменной (в данном случае `upper`) в методах, сжатых до выражений, весьма удобна — в частности в лямбда-выражениях. К сожалению, она работает, только когда метод возвращает тип `bool`.

Шаблоны кортежей и позиционные шаблоны

Шаблон *кортежа* (появившийся в версии C# 8) позволяет выполнять сопоставление с кортежем:

```
var p = (2, 3);
Console.WriteLine (p is (2, 3)); // True
```

Вы можете использовать его для переключения по множеству значений:

```
int AverageCelsiusTemperature (Season season, bool daytime) =>
    (season, daytime) switch
    {
        (Season.Spring, true) => 20,
        (Season.Spring, false) => 16,
        (Season.Summer, true) => 27,
        (Season.Summer, false) => 22,
        (Season.Fall, true) => 18,
        (Season.Fall, false) => 12,
        (Season.Winter, true) => 10,
        (Season.Winter, false) => -2,
        _ => throw new Exception ("Unexpected combination")
            // Непредвиденная комбинация
    };
enum Season { Spring, Summer, Fall, Winter };
```

Шаблон кортежа можно считать особым случаем *позиционного шаблона* (C# 8+), который обеспечивает сопоставление с любым типом, имеющим метод `Deconstruct` (см. раздел “Деконструкторы” в главе 3). В приведенном ниже примере задействован генерированный компилятором деконструктор записи `Point`:

```
var p = new Point (2, 2);
Console.WriteLine (p is (2, 2));                                // True
record Point (int X, int Y); // Имеет генерированный компилятором деконструктор
```

В ходе сопоставления деконструировать можно с использованием следующего синтаксиса:

```
Console.WriteLine (p is (var x, var y) && x == y); // True
```

Вот выражение `switch`, которое объединяет шаблон типа с позиционным шаблоном:

```
string Print (object obj) => obj switch
{
    Point (0, 0)                  => "Empty point",
    Point (var x, var y) when x == y => "Diagonal"
    ...
};
```

Шаблоны свойств

Шаблон *свойства* (C# 8+) соответствует одному или большему количеству значений свойств объекта. Ранее мы приводили простой пример в контексте операции `is`:

```
if (obj is string { Length:4 }) ...
```

Тем не менее, экономия получается не особо большая по сравнению со следующим подходом:

```
if (obj is string s && s.Length == 4) ...
```

Шаблоны свойств более полезны с операторами и выражениями `switch`. Возьмем класс `System.Uri`, который представляет URI. Он имеет свойства, включающие `Scheme`, `Host`, `Port` и `IsLoopback`. При реализации брандмауэра мы могли бы принимать решение о том, разрешать или блокировать URI, с применением выражения `switch`, в котором используются шаблоны свойств:

```
bool ShouldAllow (Uri uri) => uri switch
{
    { Scheme: "http", Port: 80 } => true,
    { Scheme: "https", Port: 443 } => true,
    { Scheme: "ftp", Port: 21 } => true,
    { IsLoopback: true } => true,
    => false
};
```

Свойства можно вкладывать друг в друга, делая законной следующую конструкцию:

```
{ Scheme: { Length: 4 }, Port: 80 } => true,
```

которую, начиная с версии C# 10, можно упростить:

```
{ Scheme.Length: 4, Port: 80 } => true,
```

Внутри шаблонов свойств можно применять другие шаблоны, включая реляционный шаблон:

```
{ Host: { Length: < 1000 }, Port: > 0 } => true,
```

Более сложные условия могут выражаться посредством конструкции `when`:

```
{ Scheme: "http" } when string.IsNullOrWhiteSpace (uri.Query) => true,
```

Можно также объединять шаблон свойства с шаблоном типа:

```
bool ShouldAllow (object uri) => uri switch
{
    Uri { Scheme: "http", Port: 80 } => true,
    Uri { Scheme: "https", Port: 443 } => true,
    ...
}
```

Как и можно было ожидать от шаблонов типов, в конце конструкции допускается вводить переменную и затем пользоваться ею:

```
Uri { Scheme: "http", Port: 80 } httpUri => httpUri.Host.Length < 1000,
```

Эту переменную можно также использовать в конструкции `when`:

```
Uri { Scheme: "http", Port: 80 } httpUri
      when httpUri.Host.Length < 1000 => true,
```

С шаблонами свойств связан несколько причудливый трюк — вводить переменные можно также на уровне *свойств*:

```
{ Scheme: "http", Port: 80, Host: string host } => host.Length < 1000,
```

Поскольку разрешена неявная типизация, `string` можно заменить `var`. Вот полный пример:

```
bool ShouldAllow (Uri uri) => uri switch
{
    { Scheme: "http", Port: 80, Host: var host } => host.Length < 1000,
    { Scheme: "https", Port: 443 } => true,
    { Scheme: "ftp", Port: 21 } => true,
    { IsLoopback: true } => true,
    => false
};
```

Придумать примеры, в которых такой прием сэкономил бы значительное количество символов, не особенно легко. В нашем случае альтернатива на самом деле короче:

```
{ Scheme: "http", Port: 80 } => uri.Host.Length < 1000 => ...
```

Или:

```
{ Scheme: "http", Port: 80, Host: { Length: < 1000 } } => ...
```

Шаблоны списков

Шаблоны списков (введенные в версии C# 11) работают с коллекцией любого вида, которая поддерживает подсчет (с помощью свойства Count или Length) и индексацию (с помощью индексатора типа int или System.Index).

Шаблон списка соответствует последовательности элементов в квадратных скобках:

```
int[] numbers = { 0, 1, 2, 3, 4 };
Console.Write (numbers is [0, 1, 2, 3, 4]); // True
```

Подчеркивание соответствует одному элементу любого значения:

```
Console.Write (numbers is [0, 1, _, _, 4]); // True
```

Шаблон var также работает при сопоставлении с одним элементом:

```
Console.Write (numbers is [0, 1, var x, 3, 4] && x > 1); // True
```

Две точки обозначают срез. Срез соответствует нулю или большему количеству элементов:

```
Console.Write (numbers is [0, ..., 4]); // True
```

Массивы и другие типы, поддерживающие индексы и диапазоны (см. раздел “Индексы и диапазоны” в главе 2), позволяют следовать за срезом с помощью шаблона var:

```
Console.Write (numbers is [0, .. var mid, 4] && mid.Contains (2)); // True
```

Шаблон списка может включать не более одного среза.

Атрибуты

Вам уже знакомо понятие снажения элементов кода признаками в форме модификаторов, таких как virtual или ref. Эти конструкции встроены в язык. Атрибуты представляют собой расширяемый механизм для добавления специ-

альной информации к элементам кода (сборкам, типам, членам, возвращаемым значениям и параметрам обобщенных типов). Такая расширяемость удобна для служб, глубоко интегрированных в систему типов, и не требует специальных ключевых слов или конструкций в языке C#.

Хороший сценарий для атрибутов связан с *сериализацией* — процессом преобразования произвольных объектов в и из определенного формата с целью хранения или передачи. В таком сценарии атрибут на поле может указывать трансляцию между представлением поля в C# и его представлением в используемом формате.

Классы атрибутов

Атрибут определяется классом, который унаследован (прямо или косвенно) от абстрактного класса `System.Attribute`. Чтобы присоединить атрибут к элементу кода, перед элементом необходимо указать имя типа атрибута в квадратных скобках. Например, в показанном ниже коде к классу `Foo` присоединяется атрибут `ObsoleteAttribute`:

```
[ObsoleteAttribute]  
public class Foo { ... }
```

Данный атрибут распознается компилятором и приводит к тому, что компилятор выдает предупреждение, если производится ссылка на тип или член, помеченный как устаревший (`obsolete`). По соглашению имени всех типов атрибутов заканчиваются на слово `Attribute`. Такое соглашение поддерживается компилятором C# и позволяет опускать суффикс `Attribute`, когда присоединяется атрибут:

```
[Obsolete]  
public class Foo { ... }
```

Тип `ObsoleteAttribute` объявлен в пространстве имен `System` следующим образом (для краткости код упрощен):

```
public sealed class ObsoleteAttribute : Attribute { ... }
```

Библиотеки .NET включают множество предопределенных атрибутов. В главе 18 будет объясняться, как создавать собственные атрибуты.

Именованные и позиционные параметры атрибутов

Атрибуты могут иметь параметры. В показанном далее примере мы применяем к классу атрибут `XmlAttributeAttribute`. Он указывает сериализатору XML (из пространства имен `System.Xml.Serialization`), каким образом объект представлен в XML, и принимает несколько *параметров атрибута*. Следующий атрибут отображает класс `CustomerEntity` на XML-элемент по имени `Customer`, принадлежащий пространству имен `http://oreilly.com`:

```
[XmlAttribute ("Customer", Namespace="http://oreilly.com")]  
public class CustomerEntity { ... }
```

(Сериализация XML и JSON описана в дополнительных материалах книги, доступных на веб-сайте издательства.)

Параметры атрибутов относятся к одной из двух категорий: *позиционные* либо *именованные*. В предыдущем примере первый аргумент является позиционным параметром, а второй — именованным параметром. Позиционные параметры соответствуют параметрам открытых конструкторов типа атрибута. Именованные параметры соответствуют открытым полям или открытым свойствам типа атрибута.

При указании атрибута должны включаться позиционные параметры, которые соответствуют одному из конструкторов класса атрибута. Именованные параметры необязательны.

В главе 18 будут описаны допустимые типы параметров и правила, используемые для их проверки.

Применение атрибутов к сборкам и поддерживающим полям

Неявно целью атрибута является элемент кода, находящийся непосредственно за атрибутом, который обычно представляет собой тип или член типа. Тем не менее, атрибуты можно присоединять и к сборке. При этом требуется явно указывать цель атрибута. Вот как использовать атрибут AssemblyFileVersion для присоединения версии к сборке:

```
[assembly: AssemblyFileVersion ("1.2.3.4")]
```

С помощью префикса `field:` атрибут можно применять к поддерживающим полям автоматических свойств, что удобно в особых случаях, таких как применение (теперь устаревшего) атрибута `NonSerialized`:

```
[field:NonSerialized]  
public int MyProperty { get; set; }
```

Применение атрибутов к лямбда-выражениям

Начиная с версии C# 10, атрибуты можно применять к методу, параметрам и возвращаемому значению лямбда-выражения:

```
Action<int> a = [Description ("Method")]  
    [return: Description ("Return value")]  
    ([Description ("Parameter")]int x) => Console.Write (x);
```



Прием полезен при работе с инфраструктурами вроде ASP.NET, которые полагаются на размещение атрибутов в написанных вами методах. Благодаря данному средству вы можете избежать необходимости создавать именованные методы для простых операций.

Эти атрибуты применяются к методу, созданному компилятором, на который указывает делегат. В главе 18 будет показано, как использовать рефлексию атрибутов в коде. На данный момент вот дополнительный код, который понадобится для разрешения такой косвенности:

```
var methodAtt = a.GetMethodInfo ().GetCustomAttributes ();  
var paramAtt = a.GetMethodInfo ().GetParameters () [0].GetCustomAttributes ();  
var returnAtt = a.GetMethodInfo ().ReturnParameter.GetCustomAttributes ();
```

Чтобы избежать синтаксической неоднозначности во время применения атрибутов к параметру лямбда-выражения, всегда требуются круглые скобки. В лямбда-выражениях дерева выражений атрибуты не допускаются.

Указание нескольких атрибутов

Для одного элемента кода разрешено указывать несколько атрибутов. Атрибуты могут быть заданы либо внутри единственной пары квадратных скобок (и разделяться запятыми), либо в отдельных парах квадратных скобок (или с помощью комбинации двух способов). Следующие три примера семантически идентичны:

```
[Serializable, Obsolete, CLSCompliant(false)]  
public class Bar {...}  
  
[Serializable] [Obsolete] [CLSCompliant(false)]  
public class Bar {...}  
  
[Serializable, Obsolete]  
[CLSCompliant(false)]  
public class Bar {...}
```

Атрибуты информации о вызывающем компоненте

Необязательные параметры можно помечать одним из трех *атрибутов информации о вызывающем компоненте*, которые сообщают компилятору о том, что в стандартное значение параметра необходимо поместить информацию, полученную из исходного кода вызывающего компонента:

- `[CallerMemberName]` применяет имя члена вызывающего компонента;
- `[CallerFilePath]` применяет путь к файлу исходного кода вызывающего компонента;
- `[CallerLineNumber]` применяет номер строки в файле исходного кода вызывающего компонента.

В показанном ниже методе `Foo` демонстрируется использование всех трех атрибутов:

```
using System;  
using System.Runtime.CompilerServices;  
class Program  
{  
    static void Main() => Foo();  
    static void Foo (  
        [CallerMemberName] string memberName = null,  
        [CallerFilePath] string filePath = null,  
        [CallerLineNumber] int lineNumber = 0)  
    {  
        Console.WriteLine (memberName);  
        Console.WriteLine (filePath);  
        Console.WriteLine (lineNumber);  
    }  
}
```

Предполагая, что код находится в файле c:\source\test\Program.cs, вывод будет таким:

```
Main  
c:\source\test\Program.cs  
6
```

Как и со стандартными необязательными параметрами, подстановка делается в *месте вызова*. Следовательно, наш метод Main является “синтаксическим сахаром” для следующего кода:

```
static void Main() => Foo ("Main", @"c:\source\test\Program.cs", 6);
```

Атрибуты информации озывающем компоненте полезны для регистрации в журнале, а также для реализации шаблонов, подобных инициированию одиночного события уведомления об изменении всякий раз, когда модифицируется любое свойство объекта. На самом деле для этого в пространстве имен System.ComponentModel предусмотрен стандартный интерфейс по имени INotifyPropertyChanged:

```
public interface INotifyPropertyChanged  
{  
    event PropertyChangedEventHandler PropertyChanged;  
}  
public delegate void PropertyChangedEventHandler  
    (object sender, PropertyChangedEventArgs e);  
public class PropertyChangedEventArgs : EventArgs  
{  
    public PropertyChangedEventArgs (string propertyName);  
    public virtual stringPropertyName { get; }  
}
```

Обратите внимание, что конструктор класса PropertyChangedEventArgs требует имени свойства, значение которого изменяется. Однако за счет применения атрибута [CallerMemberName] мы можем реализовать данный интерфейс и вызвать событие, даже не указывая имена свойств:

```
public class Foo : INotifyPropertyChanged  
{  
    public event PropertyChangedEventHandler PropertyChanged = delegate { };  
    void RaisePropertyChanged ([CallerMemberName] string propertyName = null)  
        => PropertyChanged (this, new PropertyChangedEventArgs (propertyName));  
    string customerName;  
    public string CustomerName  
    {  
        get => customerName;  
        set  
        {  
            if (value == customerName) return;  
            customerName = value;  
            RaisePropertyChanged();  
            // Компилятор преобразует предыдущую строку кода в:  
            // RaisePropertyChanged ("CustomerName");  
        }  
    }  
}
```

Атрибут `CallerArgumentExpression`

Параметр метода, к которому применяется атрибут `[CallerArgumentExpression]` (C# 10), захватывает выражение аргумента из вызывающего компонента:

```
Print (Math.PI * 2);
void Print (double number,
            [CallerArgumentExpression("number")] string expr = null)
    => Console.WriteLine (expr);
// Вывод: Math.PI * 2
```

Компилятор буквальным образом передает исходный код вызывающего выражения, включая комментарии:

```
Print (Math.PI /*(п)*/ * 2);
// Вывод: Math.PI /*(п)*/ * 2
```

Данное средство в основном используется при написании библиотек проверки достоверности и утверждений. В следующем примере выдается исключение, сообщение которого включает текст `2 + 2 == 5`, что помогает в отладке:

```
Assert (2 + 2 == 5);
void Assert (bool condition,
            [CallerArgumentExpression ("condition")] string message = null)
{
    if (!condition) throw new Exception ("Assertion failed: " + message);
}
```

Еще один пример — статический метод `ThrowIfNull` класса `ArgumentNullException`, который появился в .NET 6 и определяется следующим образом:

```
public static void ThrowIfNull (object argument,
                                [CallerArgumentExpression("argument")] string paramName = null)
{
    if (argument == null)
        throw new ArgumentNullException (paramName);
}
```

Вот как он применяется:

```
void Print (string message)
{
    ArgumentNullException.ThrowIfNull (message);
    ...
}
```

Атрибут `CallerArgumentExpression` можно использовать несколько раз, чтобы захватить множество выражений аргументов.

Динамическое связывание

Динамическое связывание откладывает связывание — процесс распознавания типов, членов и операций — с этапа компиляции до времени выполнения. Динамическое связывание удобно, когда на этапе компиляции вы знаете, что определенная функция, член или операция существует, но компилятору об этом

ничего не известно. Обычно подобное происходит при взаимодействии с динамическими языками (такими как IronPython) и COM, а также в сценариях, в которых иначе использовалась бы рефлексия.

Динамический тип объявляется с помощью контекстного ключевого слова `dynamic`:

```
dynamic d = GetSomeObject();
d.Quack();
```

Динамический тип предлагает компилятору смягчить требования. Мы ожидаем, что тип времени выполнения `d` должен иметь метод `Quack`. Мы просто не можем доказать это статически. Поскольку `d` относится к динамическому типу, компилятор откладывает связывание `Quack` с `d` до времени выполнения. Понимание смысла такого действия требует уяснения различий между *статическим связыванием* и *динамическим связыванием*.

Сравнение статического и динамического связывания

Каноническим примером связывания является отображение имени на специфическую функцию при компиляции выражения. Чтобы скомпилировать следующее выражение, компилятор должен найти реализацию метода по имени `Quack`:

```
d.Quack();
```

Давайте предположим, что статическим типом `d` является `Duck`:

```
Duck d = ...
d.Quack();
```

В простейшем случае компилятор осуществляет связывание за счет поиска в типе `Duck` метода без параметров по имени `Quack`. Если найти такой метод не удалось, тогда компилятор распространяет поиск на методы, принимающие необязательные параметры, методы базовых классов `Duck` и расширяющие методы, которые принимают тип `Duck` в своем первом параметре. Если совпадений не обнаружено, тогда возникает ошибка компиляции. Независимо от того, к какому методу произведено связывание, суть в том, что связывание делается компилятором, и оно полностью зависит от статических сведений о типах операндов (в данном случае `d`). Именно потому описанный процесс называется *статическим связыванием*.

А теперь изменим статический тип `d` на `object`:

```
object d = ...
d.Quack();
```

Вызов `Quack` приводит к ошибке на этапе компиляции, т.к. несмотря на то, что хранящееся в `d` значение способно содержать метод по имени `Quack`, компилятор не может об этом знать, поскольку единственной доступной ему информацией является тип переменной — `object` в рассматриваемом случае. Но давайте изменим статический тип `d` на `dynamic`:

```
dynamic d = ...
d.Quack();
```

Тип `dynamic` похож на `object`, т.к. он в равной степени не описывает тип. Отличие заключается в том, что тип `dynamic` допускает применение способами, которые на этапе компиляции не известны. Динамический объект связывается во время выполнения на основе своего типа времени выполнения, а не типа при компиляции. Когда компилятор встречает динамически связываемое выражение (которое в общем случае представляет собой выражение, содержащее любое значение типа `dynamic`), он просто упаковывает его так, чтобы связывание могло быть произведено позже во время выполнения.

Если динамический объект реализует `IDynamicMetaObjectProvider`, то данный интерфейс используется для связывания во время выполнения. Если же нет, то связывание проходит в основном так же, как в ситуации, когда компилятору известен тип динамического объекта времени выполнения. Две упомянутые альтернативы называются *специальным связыванием* и *языковым связыванием*.

Специальное связывание

Специальное связывание происходит, когда динамический объект реализует интерфейс `IDynamicMetaObjectProvider` (`IDMOP`). Хотя интерфейс `IDMOP` можно реализовать в типах, которые вы пишете на языке C#, и поступать так удобно, более распространенный случай предусматривает запрос объекта, реализующего `IDMOP`, из динамического языка, который внедряется в .NET через исполняющую среду динамического языка (Dynamic Language Runtime — DLR), скажем, IronPython или IronRuby. Объекты из таких языков неявно реализуют интерфейс `IDMOP` в качестве способа для прямого управления смыслом выполняемых над ними операций.

Мы детально обсудим специальные средства привязки в главе 19, но в целях демонстрации сейчас рассмотрим простое средство привязки:

```
using System;
using System.Dynamic;

dynamic d = new Duck();
d.Quack();      // Вызван метод Quack
d.Waddle();    // Вызван метод Waddle

public class Duck : DynamicObject
{
    public override bool TryInvokeMember (
        InvokeMemberBinder binder, object[] args, out object result)
    {
        Console.WriteLine (binder.Name + " method was called");
        result = null;
        return true;
    }
}
```

Класс `Duck` на самом деле не имеет метода `Quack`. Взамен он применяет специальное связывание для перехвата и интерпретации всех обращений к методам.

Языковое связывание

Языковое связывание происходит, если динамический объект не реализует интерфейс `IDMOP`. Языковое связывание удобно, когда приходится иметь дело с неудачно спроектированными типами или врожденными ограничениями системы типов `.NET` (в главе 19 будут представлены и другие сценарии). Обычной проблемой, возникающей во время работы с числовыми типами, является отсутствие общего интерфейса. Ранее было показано, что методы могут быть привязаны динамически; то же самое справедливо и для операций:

```
int x = 3, y = 4;  
Console.WriteLine (Mean (x, y));  
dynamic Mean (dynamic x, dynamic y) => (x + y) / 2;
```

Преимущество очевидно — не приходится дублировать код для каждого числового типа. Тем не менее, утрачивается безопасность типов, повышая риск генерации исключений во время выполнения вместо получения ошибок на этапе компиляции.



Динамическое связывание обходит статическую безопасность типов, но не динамическую безопасность типов. В отличие от рефлексии (см. главу 18) динамическое связывание не позволяет обойти правила доступности членов.

Согласно проектному решению языковое связывание во время выполнения ведет себя максимально похоже на статическое связывание, как будто типы времени выполнения динамических объектов были известны еще на этапе компиляции. Если в предыдущем примере жестко закодировать метод `Mean` для работы с типом `int`, то поведение программы останется идентичным. Наиболее заметным исключением при проведении аналогии между статическим и динамическим связыванием являются расширяющие методы, которые мы рассмотрим в разделе “Невызываемые функции” далее в главе.



Динамическое связывание также приводит к снижению производительности. Однако из-за механизмов кеширования среды `DLR` повторяющиеся обращения к одному и тому же динамическому выражению оптимизируются, позволяя эффективно работать с динамическими выражениями в цикле. Такая оптимизация доводит типичные накладные расходы в плане времени при выполнении простого динамического выражения на современном оборудовании до менее 100 нс.

Иключение `RuntimeBinderException`

Если привязка к члену не удается, тогда генерируется исключение `RuntimeBinderException`. Его можно считать ошибкой этапа компиляции, перенесенной на время выполнения:

```
dynamic d = 5;
d.Hello(); // Генерируется исключение RuntimeBinderException
```

Исключение генерируется из-за того, что тип `int` не имеет метода `Hello`.

Представление типа `dynamic` во время выполнения

Между типами `dynamic` и `object` имеется глубокая эквивалентность. Исполняющая среда трактует следующее выражение как `true`:

```
typeof (dynamic) == typeof (object)
```

Данный принцип распространяется на составные типы и массивы:

```
typeof (List<dynamic>) == typeof (List<object>)
typeof (dynamic[]) == typeof (object[])
```

Подобно объектной ссылке динамическая ссылка может указывать на объект любого типа (кроме типов указателей):

```
dynamic x = "hello";
Console.WriteLine (x.GetType().Name); // String
x = 123; // Ошибки нет (несмотря на то, что переменная та же самая)
Console.WriteLine (x.GetType().Name); // Int32
```

Структурно какие-либо отличия между объектной ссылкой и динамической ссылкой отсутствуют. Динамическая ссылка просто разрешает выполнение динамических операций над объектом, на который она указывает. Чтобы выполнить любую динамическую операцию над `object`, тип `object` можно преобразовать в `dynamic`:

```
object o = new System.Text.StringBuilder();
dynamic d = o;
d.Append ("hello");
Console.WriteLine (o); // hello
```



При выполнении рефлексии для типа, предлагающего (открытые) члены `dynamic`, обнаруживается, что такие члены представлены как аннотированные члены типа `object`. Например, следующее определение:

```
public class Test
{
    public dynamic Foo;
}
```

эквивалентно такому:

```
public class Test
{
    [System.Runtime.CompilerServices.DynamicAttribute]
    public object Foo;
}
```

Это позволяет потребителям типа знать, что член `Foo` должен трактоваться как `dynamic`, а другим языкам, не поддерживающим динамическое связывание, необходимо работать с ним как с `object`.

Динамические преобразования

Тип `dynamic` поддерживает неявные преобразования во все остальные типы и из них:

```
int i = 7;
dynamic d = i;
long j = d; // Приведение не требуется (неявное преобразование)
```

Чтобы преобразование прошло успешно, тип времени выполнения динамического объекта должен быть неявно преобразуемым в целевой статический тип. Предшествующий пример работает по той причине, что тип `int` неявно преобразуем в `long`.

В следующем примере генерируется исключение `RuntimeBinderException`, т.к. тип `int` не может быть неявно преобразован в `short`:

```
int i = 7;
dynamic d = i;
short j = d; // Генерируется исключение RuntimeBinderException
```

Сравнение `var` и `dynamic`

Несмотря на внешнее сходство типов `var` и `dynamic`, разница между ними существенна:

- `var` сообщает: позволить компилятору выяснить тип;
- `dynamic` сообщает: позволить исполняющей среде выяснить тип.

Ниже показана иллюстрация:

```
dynamic x = "hello";      // Статическим типом является dynamic,
                          // а типом времени выполнения - string
var y = "hello";          // Статическим типом является string,
                          // а типом времени выполнения - string
int i = x;                // Ошибка во время выполнения
                          // (невозможно преобразовать string в int)
int j = y;                // Ошибка на этапе компиляции
                          // (невозможно преобразовать string в int)
```

Статическим типом переменной, объявленной с ключевым словом `var`, может быть `dynamic`:

```
dynamic x = "hello";
var y = x; // Статическим типом у является dynamic
int z = y; //Ошибка во время выполнения (невозможно преобразовать string в int)
```

Динамические выражения

Поля, свойства, методы, события, конструкторы, индексаторы, операции и преобразования можно вызывать динамически. Попытка потребления результата динамического выражения с возвращаемым типом `void` пресекается — точно как в случае статически типизированного выражения. Отличие связано с тем, что ошибка возникает во время выполнения:

```
dynamic list = new List<int>();
var result = list.Add (5); //Генерируется исключение RuntimeBinderException
```

Выражения, содержащие динамические операнды, обычно сами являются динамическими, т.к. эффект отсутствия информации о типе имеет каскадный характер:

```
dynamic x = 2;
var y = x * 3;           // Статическим типом у является dynamic
```

Из такого правила существует пара очевидных исключений. Во-первых, приведение динамического выражения к статическому типу дает статическое выражение:

```
dynamic x = 2;
var y = (int)x;          // Статическим типом у является int
```

Во-вторых, вызовы конструкторов всегда дают статические выражения — даже если они производятся с динамическими аргументами. В следующем примере переменная x статически типизирована как `StringBuilder`:

```
dynamic capacity = 10;
var x = new System.Text.StringBuilder (capacity);
```

Кроме того, существует несколько краевых случаев, когда выражение, содержащее динамический аргумент, является статическим, включая передачу индекса массиву и выражения для создания делегатов.

Динамические вызовы без динамических получателей

В каноническом сценарии использования `dynamic` участвует динамический получатель. Это значит, что получателем динамического вызова функции будет динамический объект:

```
dynamic x = ...;
x.Foo();                // x является получателем
```

Тем не менее, статически известные функции можно вызывать также и с динамическими аргументами. Такие вызовы распознаются динамической перегрузкой и могут включать:

- статические методы;
- конструкторы экземпляра;
- методы экземпляра на получателях со статически известным типом.

В приведенном ниже примере конкретный метод `Foo`, который привязывается динамически, зависит от типа времени выполнения динамического аргумента:

```
class Program
{
    static void Foo (int x)    => Console.WriteLine ("int");
    static void Foo (string x) => Console.WriteLine ("string");
    static void Main()
    {
        dynamic x = 5;
        dynamic y = "watermelon";
        Foo (x); // int
        Foo (y); // string
    }
}
```

Поскольку динамический получатель не задействован, компилятор может статически выполнить базовую проверку успешности динамического вызова. Он проверяет, существует ли функция с корректным именем и количеством параметров. Если кандидаты не найдены, тогда возникает ошибка на этапе компиляции:

```
class Program
{
    static void Foo (int x)    => Console.WriteLine ("int");
    static void Foo (string x) => Console.WriteLine ("string");
    static void Main()
    {
        dynamic x = 5;
        Foo (x, x); //Ошибка на этапе компиляции - неправильное количество параметров
        Fook (x); //Ошибка на этапе компиляции - метод с таким именем отсутствует
    }
}
```

Статические типы в динамических выражениях

Тот факт, что динамические типы применяются в динамическом связывании, вполне очевиден. Однако участие в динамическом связывании также и статических типов не настолько очевидно. Взгляните на следующий код:

```
class Program
{
    static void Foo (object x, object y) { Console.WriteLine ("oo"); }
    static void Foo (object x, string y) { Console.WriteLine ("os"); }
    static void Foo (string x, object y) { Console.WriteLine ("so"); }
    static void Foo (string x, string y) { Console.WriteLine ("ss"); }
    static void Main()
    {
        object o = "hello";
        dynamic d = "goodbye";
        Foo (o, d); // os
    }
}
```

Вызов `Foo (o, d)` привязывается динамически, т.к. один из его аргументов, `d`, определен как `dynamic`. Но поскольку переменная `o` статически известна, связывание — хотя оно происходит динамически — будет использовать именно ее. В данном случае механизм распознавания перегруженных версий выберет вторую реализацию `Foo` из-за статического типа `o` и типа времени выполнения `d`. Другими словами, компилятор является “настолько статическим, насколько это возможно”.

Невызываемые функции

Некоторые функции не могут быть вызваны динамически. Нельзя вызывать динамически:

- расширяющие методы (через синтаксис расширяющих методов);
- члены интерфейса, если для этого необходимо выполнить приведение к данному интерфейсу;
- члены базового класса, которые скрыты подклассом.

Понимание причин важно для понимания динамического связывания в целом.

Динамическое связывание требует двух порций информации: имени вызываемой функции и объекта, на котором должна вызываться функция. Тем не менее, в каждом из трех невызываемых сценариев задействован *дополнительный тип*, который известен только на этапе компиляции. На момент написания главы не было способа динамического указания таких дополнительных типов.

При вызове расширяющих методов этот дополнительный тип является неявным. Он представляет собой статический класс, в котором определен расширяющий метод. Компилятор ищет его с учетом директив `using`, присутствующих в исходном коде. В результате расширяющие методы превращаются в концепции, существующие только на этапе компиляции, т.к. после компиляции директивы `using` исчезают (после завершения своей работы в рамках процесса связывания, которая заключается в отображении простых имен на имена, уточненные пространствами имен).

При вызове членов через интерфейс дополнительный тип указывается посредством неявного или явного приведения. Существуют два сценария, когда подобное может пригодиться: при вызове явно реализованных членов интерфейса и при вызове членов интерфейса, реализованных в типе, который является внутренним в другой сборке. Второй сценарий можно проиллюстрировать с помощью следующих двух типов:

```
interface IFoo { void Test(); }
class Foo : IFoo { void IFoo.Test() {} }
```

Для вызова метода `Test` потребуется выполнить приведение к интерфейсу `IFoo`. При статической типизации это делается легко:

```
IFoo f = new Foo(); // Неявное приведение к типу интерфейса
f.Test();
```

А теперь рассмотрим ситуацию с динамической типизацией:

```
IFoo f = new Foo();
dynamic d = f;
d.Test(); // Генерируется исключение
```

Выделенное полужирным неявное приведение сообщает компилятору о необходимости привязки последующих вызовов членов `f` к `IFoo`, а не к `Foo` — другими словами, для просмотра данного объекта сквозь призму интерфейса `IFoo`. Однако во время выполнения такая призма теряется, а потому среда DLR не может завершить связывание. Упомянутая потеря продемонстрирована ниже:

```
Console.WriteLine (f.GetType().Name); // Foo
```

Похожая ситуация возникает при вызове скрытого члена базового класса: дополнительный тип должен указываться либо через приведение, либо с помощью ключевого слова `base` — и этот дополнительный тип утрачивается во время выполнения.



Если нужно динамически обращаться к членам интерфейса, то обходной путь предусматривает использование библиотеки с открытым кодом Uncapsulator, которая доступна на NuGet и GitHub. Библиотека Uncapsulator была написана автором книги для решения этой проблемы и применяет *специальное связывание* для обеспечения лучшей динамичности, чем dynamic:

```
IFoo f = new Foo();
dynamic uf = f.Uncapsulate();
uf.Test();
```

Библиотека Uncapsulator также позволяет выполнять приведение к базовым типам и интерфейсам по имени, динамически вызывать статические члены и получать доступ к закрытым членам типа.

Перегрузка операций

Операции могут быть перегружены для предоставления специальным типам более естественного синтаксиса. Перегрузку операций целесообразнее всего применять при реализации специальных структур, которые представляют относительно примитивные типы данных. Например, хорошим кандидатом на перегрузку операций может служить специальный числовой тип.

Разрешено перегружать следующие символические операции:

+ (унарная)	- (унарная)	!	~	++
--	+	-	*	/
%	&		^	<<
>>	==	!=	>	<
>=	<=			

Перечисленные ниже операции также могут быть перегружены:

- явные и неявные преобразования (с использованием ключевых слов `explicit` и `implicit`);
- операции (не литералы) `true` и `false`.

Следующие операции перегружаются косвенно:

- составные операции присваивания (например, `+=`, `/=`) неявно перегружаются при перегрузке обычных операций (т.е. `+`, `/`);
- условные операции `&&` и `||` неявно перегружаются при перегрузке побитовых операций `&` и `|`.

Функции операций

Операция перегружается за счет объявления *функции операции*. Функция операции подчиняется перечисленным далее правилам.

- Имя функции указывается с помощью ключевого слова `operator`, за которым следует символ операции.
- Функция операции должна быть помечена как `static` и `public`.
- Параметры функции операции представляют операнды.
- Возвращаемый тип функции операции представляет результат выражения.
- По меньшей мере, один из операндов должен иметь тип, для которого объявляется функция операции.

В следующем примере мы определяем структуру по имени `Note`, представляющую музыкальную ноту, и затем перегружаем операцию `+`:

```
public struct Note
{
    int value;
    public Note (int semitonesFromA) { value = semitonesFromA; }
    public static Note operator + (Note x, int semitones)
    {
        return new Note (x.value + semitones);
    }
}
```

Перегруженная версия операции `+` позволяет добавлять значение `int` к `Note`:

```
Note B = new Note (2);
Note CSharp = B + 2;
```

Перегрузка операции приводит к автоматической перегрузке соответствующей составной операции присваивания. Поскольку в примере перегружена операция `+`, можно также применять операцию `+=`:

```
CSharp += 2;
```

Подобно методам и свойствам функции операций, состоящие из одиночного выражения, в C# разрешено записывать более компактно с помощью синтаксиса функций, сжатых до выражений:

```
public static Note operator + (Note x, int semitones)
    => new Note (x.value + semitones);
```

Проверяемые операции

Начиная с версии C# 11, при объявлении функции операции также можно объявить версию `checked`:

```
public static Note operator + (Note x, int semitones)
    => new Note (x.value + semitones);

public static Note operator checked + (Note x, int semitones)
    => checked (new Note (x.value + semitones));
```

Проверяемая версия будет вызываться внутри проверяемых выражений или блоков:

```
Note B = new Note (2);
Note other = checked (B + int.MaxValue); // генерирует исключение OverflowException
```

Перегрузка операций эквивалентности и сравнения

Операции эквивалентности и сравнения часто перегружаются при написании структур и в редких случаях — при написании классов. При перегрузке операций эквивалентности и сравнения должны соблюдаться специальные правила и обязательства, которые будут подробно рассматриваться в главе 6. Ниже приведен краткий обзор этих правил.

- **Парность.** Компилятор C# требует, чтобы операции, которые представляют собой логические пары, были определены обе. Такими операциями являются $(== !=)$, $(< >)$ и $(<= >=)$.
- **Equals и GetHashCode.** В большинстве случаев при перегрузке операций $==$ и $!=$ потребуется переопределять методы `Equals` и `GetHashCode` класса `object`, чтобы обеспечить осмысленное поведение. Компилятор C# выдаст предупреждение, если это не сделано. (Дополнительные сведения предоставлялись в разделе “Сравнение эквивалентности” ранее в главе.)
- **IComparable и IComparable<T>.** Если перегружаются операции $(< >)$ и $(<= >=)$, тогда обязательно должны быть реализованы интерфейсы `IComparable` и `IComparable<T>`.

Специальные неявные и явные преобразования

Неявные и явные преобразования являются перегружаемыми операциями. Как правило, они перегружаются для того, чтобы сделать преобразования между тесно связанными типами (такими как числовые типы) лаконичными и естественными.

Для преобразования между слабо связанными типами больше подходят следующие стратегии:

- написать конструктор, принимающий параметр типа, из которого выполняется преобразование;
- написать методы `ToXXX` и (статические) методы `FromXXX`, предназначенные для преобразования между типами.

Как объяснялось при обсуждении типов, логическое обоснование неявных преобразований заключается в том, что они гарантированно выполняются успешно и не приводят к потере информации. И наоборот, явное преобразование должно быть обязательным либо когда успешность преобразования определяется обстоятельствами во время выполнения, либо если в результате преобразования может быть потеряна информация.

В показанном далее примере мы определяем преобразования между типом `Note` и типом `double` (с использованием которого представлена частота в герцах данной ноты):

```
...
// Преобразование в герцы
public static implicit operator double (Note x)
    => 440 * Math.Pow (2, (double) x.value / 12 );
```

```

// Преобразование из герц (с точностью до ближайшего полутона)
public static explicit operator Note (double x)
    => new Note ((int) (0.5 + 12 * (Math.Log (x/440) / Math.Log(2) ) ));
...
Note n = (Note) 554.37;                                // явное преобразование
double x = n;                                         // неявное преобразование

```



Следуя нашим собственным принципам, этот пример можно реализовать более эффективно с помощью метода `ToFrequency` (и статического метода `FromFrequency`) вместо неявной и явной операции.



Операции as и is игнорируют специальные преобразования:

```

Console.WriteLine (554.37 is Note);      // False
Note n = 554.37 as Note;                // Ошибка

```

Перегрузка операций `true` и `false`

Операции `true` и `false` перегружаются в крайне редких случаях для типов, которые являются булевскими “по духу”, но не имеют преобразования в `bool`. Примером может служить тип, реализующий логику с тремя состояниями: за счет перегрузки `true` и `false` этот тип может гладко работать с условными операторами и операциями, а именно — `if`, `do`, `while`, `for`, `&&`, `||` и `?:`. Такую функциональность предоставляет структура `System.Data.SqlTypes.SqlBoolean`:

```

SqlBoolean a = SqlBoolean.Null;
if (a)
    Console.WriteLine ("True");
else if (!a)
    Console.WriteLine ("False");
else
    Console.WriteLine ("Null");

```

Вот вывод:

Null

Приведенный ниже код представляет собой повторную реализацию частей структуры `SqlBoolean`, необходимой для демонстрации работы с операциями `true` и `false`:

```

public struct SqlBoolean
{
    public static bool operator true (SqlBoolean x)
        => x.m_value == True.m_value;
    public static bool operator false (SqlBoolean x)
        => x.m_value == False.m_value;
    public static SqlBoolean operator ! (SqlBoolean x)
    {
        if (x.m_value == Null.m_value)  return Null;
        if (x.m_value == False.m_value) return True;
        return False;
    }
}

```

```

public static readonly SqlBoolean Null = new SqlBoolean(0);
public static readonly SqlBoolean False = new SqlBoolean(1);
public static readonly SqlBoolean True = new SqlBoolean(2);

private SqlBoolean (byte value) { m_value = value; }
private byte m_value;
}

```

Статический полиморфизм

В разделе “Вызов статических виртуальных/абстрактных членов интерфейсов” главы 18 будет представлено расширенное средство, благодаря которому интерфейс может определять члены `static virtual` или `static abstract`, впоследствии реализуемые как статические члены классами и структурами. В разделе “Ограничения обобщений” главы 3 было показано, что применение ограничения интерфейса к параметру типа обеспечивает методу доступ к членам данного интерфейса. Здесь мы объясним, как это обеспечивает *статический полиморфизм*, делая возможными такие средства, как обобщенная математика.

В целях иллюстрации рассмотрим следующий интерфейс, в котором определен статический метод для создания случайного экземпляра типа `T`:

```

interface ICreateRandom<T>
{
    static abstract T CreateRandom(); // Создает случайный экземпляр типа T
}

```

Предположим, что этот интерфейс необходимо реализовать в следующей записи:

```
record Point (int X, int Y);
```

Вот как можно реализовать статический метод `CreateRandom` с помощью класса `System.Random` (метод `Next` которого генерирует случайное целое число):

```

record Point (int X, int Y) : ICreateRandom<Point>
{
    static Random rnd = new();
    public static Point CreateRandom() => new Point (rnd.Next(), rnd.Next());
}

```

Для вызова этого метода через интерфейс используется *ограниченный параметр типа*. В приведенном ниже методе создается массив тестовых данных с применением такого приема:

```

T[] CreateTestData<T> (int count) where T : ICreateRandom<T>
{
    T[] result = new T[count];
    for (int i = 0; i < count; i++)
        result [i] = T.CreateRandom();
    return result;
}

```

Следующая строка кода демонстрирует его использование:

```
Point[] testData = CreateTestData<Point>(50); // Создать 50 случайных
                                                // экземпляров Point.
```

Вызов статического метода `CreateRandom` в `CreateTestData` является полиморфным, т.к. он работает не только с `Point`, но и с любым типом, реализующим `ICreateRandom<T>`. Подход отличается от полиморфизма *экземпляров*, потому что для вызова `CreateRandom` экземпляр реализации `ICreateRandom<T>` не нужен; метод `CreateRandom` вызывается на самом типе.

Полиморфные операции

Поскольку операции по существу являются статическими функциями (см. раздел “Перегрузка операций” ранее в главе), они также могут быть объявлены в виде статических виртуальных членов интерфейса:

```
interface IAddable<T> where T : IAddable<T>
{
    abstract static T operator + (T left, T right);
}
```



Самоссылающееся ограничение типа в приведенном определении интерфейса необходимо для удовлетворения правил компилятора по перегрузке операций. Вспомните, что при определении функции операции хотя бы один из операндов должен быть того типа, с которым объявлена сама функция операции. В рассмотренном примере операнды имеют тип `T`, тогда как содержащих их типом является `IAddable<T>`, поэтому требуется самоссылающееся ограничение типа, чтобы `T` можно было трактовать как `IAddable<T>`.

Вот как можно реализовать данный интерфейс:

```
record Point (int X, int Y) : IAddable<Point>
{
    public static Point operator + (Point left, Point right) =>
        new Point (left.X + right.X, left.Y + right.Y);
}
```

Затем с использованием ограниченного параметра типа можно написать метод, который полиморфно вызывает операцию сложения (для краткости обработка краевых случаев опущена):

```
T Sum<T> (params T[] values) where T : IAddable<T>
{
    T total = values[0];
    for (int i = 1; i < values.Length; i++)
        total += values[i]; return total;
}
```

Обращение к операции `+` (через операцию `+=`) является полиморфным, т.к. оно привязывается к `IAddable<T>`, а не к `Point`. Следовательно, метод `Sum` работает со всеми типами, реализующими `IAddable<T>`.

Конечно, интерфейс вроде `IAddable<T>` был бы гораздо полезнее, если бы он определялся в исполняющей среде .NET и его реализовывали все числовые типы .NET. К счастью, это действительно так в .NET 7: пространство имен `System.Numerics` содержит (более сложную версию) интерфейса `IAddable`, а также множество других арифметических интерфейсов, большинство из которых включено в `INumber<TSelf>`.

Обобщенная математика

До выхода .NET 7 код, выполняющий арифметические операции, должен был быть жестко запрограммирован для определенного числового типа:

```
int Sum (params int[] numbers)      // Работает только с int.  
{                                     // Нельзя использовать с double, decimal и т.д.  
    int total = 0;  
    foreach (int n in numbers)  
        total += n;  
    return total;  
}
```

В версии .NET 7 появился интерфейс `INumber<TSelf>`, предназначенный для унификации арифметических операций среди числовых типов. Это означает, что теперь можно написать обобщенную версию предыдущего метода:

```
T Sum<T> (params T[] numbers) where T : INumber<T>  
{  
    T total = T.Zero;  
    foreach (T n in numbers)  
        total += n; // Вызывает операцию сложения для любого числового типа  
    return total;  
}  
int intSum = Sum (3, 5, 7);  
double doubleSum = Sum (3.2, 5.3, 7.1);  
decimal decimalSum = Sum (3.2m, 5.3m, 7.1m);
```

Интерфейс `INumber<TSelf>` реализуется всеми вещественными и целочисленными числовыми типами в .NET (а также типом `char`) и может рассматриваться как обобщающий интерфейс, который включает в себя другие, более детальные интерфейсы для каждого вида арифметических операций (сложение, вычитание, умножение, деление, деление по модулю, сравнение и т.д.), а также интерфейсы для разбора и форматирования. Вот один из таких интерфейсов:

```
public interface IAdditionOperators<TSelf, TOther, TResult>  
    where TSelf : IAdditionOperators<TSelf, TOther, TResult>?  
{  
    static abstract TResult operator + (TSelf left, TOther right);  
    public static virtual TResult operator checked +  
        (TSelf left, TOther right) => left + right; //Вызывает предыдущую операцию  
}
```

Операция `+`, объявленная как `static abstract`, позволяет операции `+=` работать внутри нашего метода `Sum`. Также обратите внимание на использование `static virtual` в проверяемой операции: это обеспечивает стандартное резервное поведение для разработчиков, которые не предоставляют проверяемую версию операции сложения.

Пространство имен `System.Numerics` содержит также интерфейсы, не являющиеся частью `INumber`, которые поддерживают операции, специфичные для определенных типов чисел (например, с плавающей точкой). Скажем, чтобы вычислить среднеквадратичное значение, можно добавить интерфейс `IRootFunctions<T>` в список ограничений, чтобы предоставить его статический метод `RootN` для `T`:

```

T RMS<T> (params T[] values) where T : INumber<T>, IRootFunctions<T>
{
    T total = T.Zero;
    for (int i = 0; i < values.Length; i++)
        total += values [i] * values [i];
    // Use T.CreateChecked to convert values.Length (type int) to T
    T count = T.CreateChecked (values.Length);
    return T.RootN (total / count, 2); // Вычислить квадратный корень
}

```

Небезопасный код и указатели

Язык C# поддерживает прямые манипуляции с памятью через указатели внутри блоков кода, которые помечены как `unsafe` (небезопасные). Типы указателей полезны при взаимодействии с собственными API-интерфейсами, для доступа в память за пределами управляемой кучи и для реализации микрооптимизаций в “горячих” точках, критичных к производительности.

Основы указателей

Для каждого типа значения или ссылочного типа `V` имеется соответствующий тип указателя `V*`. Экземпляр указателя хранит адрес переменной. Тип указателя может быть (небезопасно) приведен к любому другому типу указателя. Ниже описаны основные операции над указателями.

Операция	Описание
<code>&</code>	Операция взятия адреса возвращает указатель на адрес переменной
<code>*</code>	Операция разыменования возвращает значение переменной, которая находится по адресу, заданному указателем
<code>-></code>	Операция указателя на член является синтаксическим сокращением, т.е. <code>x->y</code> эквивалентно <code>(*x).y</code>

В файлах проектов, содержащих небезопасный код, должен быть указан элемент `<AllowUnsafeBlocks>true</AllowUnsafeBlocks>`.

Небезопасный код

Помечая тип, член типа или блок операторов ключевым словом `unsafe`, вы разрешаете внутри этой области видимости использовать типы указателей и выполнять операции над указателями в стиле С. Ниже показан пример применения указателей для быстрой обработки битовой карты:

```

unsafe void BlueFilter (int[,] bitmap)
{
    int length = bitmap.Length;
    fixed (int* b = bitmap)
    {
        int* p = b;
        for (int i = 0; i < length; i++)
            *p++ &= 0xFF;
    }
}

```

Небезопасный код может выполняться быстрее, чем соответствующая ему безопасная реализация. В последнем случае код потребует вложенного цикла с индексацией в массиве и проверкой границ. Небезопасный метод C# может также оказаться быстрее, чем вызов внешней функции С, поскольку не будет никаких накладных расходов, связанных с покиданием управляемой среды выполнения.

Оператор `fixed`

Оператор `fixed` необходим для закрепления управляемого объекта, такого как битовая карта в предыдущем примере. Во время выполнения программы многие объекты распределяются в куче и впоследствии освобождаются. Во избежание нежелательных затрат или фрагментации памяти сборщик мусора перемещает объекты внутри кучи. Указатель на объект бесполезен, если адрес объекта может измениться, пока на него производится ссылка, и потому оператор `fixed` сообщает сборщику мусора о необходимости “закрепления” объекта, чтобы он никуда не перемещался. Это может оказать влияние на эффективность программы во время выполнения, так что блоки `fixed` должны использоваться только кратковременно, а внутри блока `fixed` следует избегать распределения памяти в куче.

В рамках оператора `fixed` можно получать указатель на любой тип значения, массив типов значений или строку. В случае массивов и строк указатель будет в действительности указывать на первый элемент, который относится к типу значения. Типы значений, объявленные внутри ссылочных типов, требуют закрепления ссылочных типов, как показано ниже:

```
Test test = new Test();
unsafe
{
    fixed (int* p = &test.X) // Закрепляет test
    {
        *p = 9;
    }
    Console.WriteLine (test.X);
}
class Test { public int X; }
```

Более подробно оператор `fixed` рассматривается в разделе “Отображение структуры на неуправляемую память” главы 24.

Операция указателя на член

В дополнение к операциям `&` и `*` язык C# также предлагает операцию `->` в стиле C++, которая может применяться при работе со структурами:

```
Test test = new Test();
unsafe
{
    Test* p = &test;
    p->X = 9;
    System.Console.WriteLine (test.X);
}
struct Test { public int X; }
```

Ключевое слово `stackalloc`

Память может быть выделена в блоке внутри стека явно с использованием ключевого слова `stackalloc`. Из-за распределения в стеке время жизни блока памяти ограничивается выполнением метода, в точности как для любой другой локальной переменной. К данному блоку можно применять операцию `[]` для проведения индексации в рамках памяти:

```
int* a = stackalloc int [10];
for (int i = 0; i < 10; ++i)
    Console.WriteLine (a[i]);
```

В главе 23 будет описано, как можно использовать `Span<T>` для управления памятью, выделенной в стеке, без применения ключевого слова `unsafe`:

```
Span<int> a = stackalloc int [10];
for (int i = 0; i < 10; ++i)
    Console.WriteLine (a[i]);
```

Буферы фиксированных размеров

С ключевым словом `fixed` связан еще один сценарий использования — создание буферов фиксированных размеров внутри структур (что может быть полезно при вызове неуправляемой функции; см. главу 24):

```
new UnsafeClass ("Christian Troy");
unsafe struct UnsafeUnicodeString
{
    public short Length;
    public fixed byte Buffer[30]; // Выделить блок из 30 байтов
}
unsafe class UnsafeClass
{
    UnsafeUnicodeString uus;
    public UnsafeClass (string s)
    {
        uus.Length = (short)s.Length;
        fixed (byte* p = uus.Buffer)
            for (int i = 0; i < s.Length; i++)
                p[i] = (byte) s[i];
    }
}
```

Буферы фиксированных размеров не являются массивами: если бы `Buffer` был массивом, то он состоял бы из ссылки на объект, хранящийся в (управляемой) куче, а не из 30 байтов внутри самой структуры.

В приведенном выше примере ключевое слово `fixed` применяется еще и для закрепления в куче объекта, содержащего буфер (который будет экземпляром `UnsafeClass`). Таким образом, ключевое слово `fixed` имеет два разных смысла: фиксация *размера* и фиксация *места*. Оба случая использования часто встречаются вместе, поскольку для работы с буфером фиксированного размера он должен быть зафиксирован на месте.

void*

Указатель `void` (`void*`) не делает никаких предположений о типе лежащих в основе данных и удобен для функций, которые имеют дело с низкоуровневой памятью. Существует неявное преобразование из любого типа указателя в `void*`. Указатель `void*` не допускает разыменования и выполнения над ним арифметических операций. Вот пример:

```
short[] a = { 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55 };
unsafe
{
    fixed (short* p = a)
    {
        // Операция sizeof возвращает размер типа значения в байтах
        Zap (p, a.Length * sizeof (short));
    }
}
foreach (short x in a)
    Console.WriteLine (x); // Выводит все нули
unsafe void Zap (void* memory, int byteCount)
{
    byte* b = (byte*)memory;
    for (int i = 0; i < byteCount; i++)
        *b++ = 0;
}
```

Целочисленные типы с собственным размером

Целочисленные типы с собственным размером `nint` и `nuint` (появившиеся в версии C# 9) имеют размер, соответствующий адресному пространству процесса во время выполнения (на практике 32 или 64 бита). Целые числа с собственным размером ведут себя подобно стандартным целым числам, полностью поддерживаая арифметические операции и проверку на предмет переполнения:

```
nint x = 123, y = 234;
checked
{
    nint sum = x + y, product = x * y;
    Console.WriteLine (product);
}
```

Целые числа с собственным размером могут быть 32-битными целочисленными константами (но не 64-битными целочисленными константами, потому что во время выполнения может возникнуть переполнение). Для преобразования целочисленных типов с собственным размером в другие целочисленные типы либо наоборот можно применять явное приведение.

Целые числа с собственным размером можно использовать для представления адресов или смещений в памяти, не прибегая к помощи указателей. Тип `nuint` также является естественным типом для представления длины блока памяти.

При работе с указателями целые числа с собственным размером могут повысить эффективность, поскольку результатом вычитания двух указателей в C# всегда является 64-битное целое число (типа long), что неэффективно на 32-разрядных платформах. Если сначала привести указатели к nint, тогда результатом вычитания тоже окажется nint (который будет занимать 32 бита на 32-разрядной платформе):

```
unsafe nint AddressDif (char* x, char* y) => (nint)x - (nint)y;
```



Хорошим примером реального использования типов nint и nuint в сочетании с указателями является реализация Buffer.Memory.Copy. Ее можно увидеть в файле Buffer.cs исходного кода .NET на GitHub или декомпилировать метод в IL Spy. Упрощенная версия также включена в примеры LINQPad для этой книги.

Обработка исполняющей средой при нацеливании на .NET 7+

Для проектов, ориентированных на .NET 7 или более позднюю версию, типы nint и nuint действуют как синонимы базовых типов System.IntPtr и System.UIntPtr из .NET (точно так же, как тип int выступает синонимом System.Int32). Это работает, поскольку типы IntPtr и UIntPtr (существовавшие начиная с .NET Framework 1.0, но обладающие ограниченной функциональностью) в .NET 7 были расширены, чтобы обеспечить полные возможности в плане арифметических операций и проверку на предмет переполнения с помощью компилятора C#.



Добавление к IntPtr/UIntPtr возможности проверяемой арифметики формально является критическим изменением. Тем не менее, эффекты ограничены, поскольку работа унаследованного кода, полагающегося на то, что IntPtr не учитывает блоки checked, не нарушается при простом запуске под управлением .NET 7+; чтобы работа была нарушена, проект должен быть *перекомпилирован* с нацеливанием на .NET 7+. Таким образом, авторам библиотек не нужно беспокоиться о критических изменениях, пока они не выпустят новую версию, специально предназначенную для .NET 7 или более поздней версии.

Обработка исполняющей средой при нацеливании на .NET 6 или предыдущую версию

Для проектов, ориентированных на .NET 6 или более раннюю версию (либо .NET Standard), типы nint и nuint по-прежнему используют IntPtr и UIntPtr в качестве базовых типов исполняющей среды. Однако поскольку унаследованные типы IntPtr и UIntPtr не поддерживают большинство арифметических операций, компилятор заполняет бреши, заставляя типы nint/nuint вести себя так, как они ведут себя в .NET 7+ (включая разрешение операций checked). Можно считать, что переменная типа nint/nuint относится к типу IntPtr/UIntPtr со специальным верхним слоем. Компилятор воспринимает ее

как имеющую современный тип IntPtr/UIntPtr. Естественно, специальный верхний слой утрачивается, если позже привести переменную к типу IntPtr/ UIntPtr:

```
nint x = 123;
Console.WriteLine (x * x);      // Нормально: умножение поддерживается

IntPtr y = x;
Console.WriteLine (y * y);      // Ошибка на этапе компиляции: операция *
                                // не поддерживается
```

Указатели на функции

Указатель на функцию (появившийся в версии C# 9) похож на делегат, но без косвенного обращения к экземпляру делегата; взамен он указывает непосредственно на метод. Указатель на функцию может указывать только на статические методы, не обладает возможностью группового вызова и требует контекста unsafe (поскольку обходит систему безопасности типов во время выполнения). Основная его цель — упрощение и оптимизация взаимодействия с неуправляемыми API-интерфейсами (см. раздел “Обратные вызовы из неуправляемого кода” в главе 24).

Тип указателя на функцию объявляется следующим образом (последним задается возвращаемый тип):

```
delegate*<int, char, string, void> // (void - возвращаемый тип)
```

Такой указатель на функцию соответствует функции с сигнатурой вида:

```
void SomeFunction (int x, char y, string z)
```

Операция & создает указатель на функцию из группы методов. Вот полный пример:

```
unsafe
{
    delegate*<string, int> functionPointer = &GetLength;
    int length = functionPointer ("Hello, world");
    static int GetLength (string s) => s.Length;
}
```

В этом примере functionPointer не является *объектом*, на котором можно вызывать метод, такой как Invoke (или с помощью ссылки на объект Target). Напротив, functionPointer представляет собой переменную, которая указывает непосредственно на адрес целевого метода в памяти:

```
Console.WriteLine ((IntPtr)functionPointer);
```

Подобно любому другому указателю он не подвергается проверке типов во время выполнения. В показанном ниже коде возвращаемое значение нашей функции трактуется как значение decimal (которое длиннее значения int, поэтому в выводе будет присутствовать и случайное содержимое дополнительных ячеек памяти):

```
var pointer2 = (delegate*<string, decimal>) (IntPtr) functionPointer;
Console.WriteLine (pointer2 ("Hello, unsafe world"));
```

Атрибут `SkipLocalsInit`

Когда компилятор C# компилирует метод, он выпускает флаг, который инструктирует исполняющую среду о необходимости инициализации локальных переменных метода их стандартными значениями (путем обнуления памяти). Начиная с версии C# 9, компилятору можно сообщить о том, чтобы он не выпускал такой флаг, применяя к методу атрибут `[SkipLocalsInit]` (из пространства имен `System.Runtime.CompilerServices`):

```
[SkipLocalsInit]  
void Foo() ...
```

Данный атрибут можно также применять к типу, что эквивалентно его применению ко всем методам типа, или даже к целому модулю (контейнеру для сборки):

```
[module: System.Runtime.CompilerServices.SkipLocalsInit]
```

В обычных безопасных сценариях атрибут `[SkipLocalsInit]` мало влияет на функциональность или производительность, поскольку политика определенного присваивания C# требует явного присваивания значений локальным переменным, прежде чем их можно будет использовать. Это означает, что оптимизатор JIT, вероятно, будет выпускать одинаковый машинный код независимо от того, применялся атрибут `[SkipLocalsInit]` или нет.

Тем не менее, в небезопасном контексте использование `[SkipLocalsInit]` может успешно избавить среду CLR от накладных расходов по инициализации локальных переменных типа значения, обеспечивая небольшой выигрыш в производительности для методов, которые широко задействуют стек (посредством крупной операции `stackalloc`). В показанном ниже примере в случае применения атрибута `[SkipLocalsInit]` выводится содержимое неинициализированной памяти (вместо всех нулей):

```
[SkipLocalsInit]  
unsafe void Foo()  
{  
    int local;  
    int* ptr = &local;  
    Console.WriteLine (*ptr);  
    int* a = stackalloc int [100];  
    for (int i = 0; i < 100; ++i) Console.WriteLine (a [i]);  
}
```

Интересно отметить, что того же самого результата в “безопасном” контексте можно достичь за счет использования `Span<T>`:

```
[SkipLocalsInit]  
void Foo()  
{  
    Span<int> a = stackalloc int [100];  
    for (int i = 0; i < 100; ++i) Console.WriteLine (a [i]);  
}
```

Следовательно, применение атрибута `[SkipLocalsInit]` требует компиляции проекта с элементом `<AllowUnsafeBlocks>true</AllowUnsafeBlocks>` внутри файла проекта, даже если ни один из методов не помечен как `unsafe`.

Директивы препроцессора

Директивы препроцессора снабжают компилятор дополнительной информацией о разделах кода. Наиболее распространенными директивами препроцессора считаются директивы условной компиляции, которые предоставляют способ включения либо исключения разделов кода из процесса компиляции:

```
#define DEBUG
class MyClass
{
    int x;
    void Foo()
    {
        #if DEBUG
        Console.WriteLine ("Testing: x = {0}", x);
        #endif
    }
    ...
}
```

В классе `MyClass` оператор внутри метода `Foo` компилируется условным образом в зависимости от существования символа `DEBUG`. Если удалить определение символа `DEBUG`, тогда этот оператор в `Foo` компилироваться не будет. Символы препроцессора могут определяться внутри файла исходного кода (что и было сделано в примере) или на уровне проекта в файле `.csproj`:

```
<PropertyGroup>
    <DefineConstants>DEBUG;ANOTHERSYMBOL</DefineConstants>
</PropertyGroup>
```

В директивах `#if` и `#elif` можно применять операции `&&`, `||` и `!` для выполнения логических действий *И*, *ИЛИ* и *НЕ* над несколькими символами. Представленная ниже директива указывает компилятору на необходимость включения следующего за ней кода, если определен символ `TESTMODE` и не определен символ `DEBUG`:

```
#if TESTMODE && !DEBUG
    ...

```

Тем не менее, имейте в виду, что вы не строите обычное выражение C#, а символы, которыми вы оперируете, не имеют абсолютно никакого отношения к *переменным* — статическим или каким-то другим.

Директивы `#error` и `#warning` предотвращают случайное неправильное использование директив условной компиляции, заставляя компилятор генерировать предупреждение или сообщение об ошибке, которое вызвано неподходящим набором символов компиляции. Директивы препроцессора перечислены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Директивы препроцессора

Директива препроцессора	Действие
#define <i>символ</i>	Определяет символ
#undef <i>символ</i>	Отменяет определение символа
#if <i>символ</i> [<i>операция</i> <i>символ2</i>] ...	Проверяет, определен ли символ, и компилирует, если это так; операциями являются ==, !=, && и , за которыми следуют директивы #else, #elif и #endif
#else	Компилирует код до следующей директивы #endif
#elif <i>символ</i> [<i>операция</i> <i>символ2</i>]	Комбинирует ветвь #else и проверку #if
#endif	Заканчивает директивы условной компиляции
#warning <i>текст</i>	Заставляет компилятор вывести предупреждение с указанным текстом
#error <i>текст</i>	Заставляет компилятор вывести сообщение об ошибке с указанным текстом
#error <i>version</i>	Заставляет компилятор вывести номер своей версии и закончить работу
#pragma warning [disable restore]	Отключает или восстанавливает выдачу компилятором предупреждения (предупреждений)
#line [<i>номер</i> [" <i>файл</i> "] hidden]	Номер задает строку в исходном коде (начиная с версии C# 10, можно также задавать колонку); в " <i>файл</i> " указывается имя файла для помещения в вывод компилятора; hidden инструктирует инструменты отладки о необходимости пропуска кода от этой точки до следующей директивы #line
#region <i>имя</i>	Обозначает начало раздела
#endregion	Обозначает конец раздела
#nullable <i>выбор</i>	См. раздел “Ссылочные типы, допускающие null” ранее в главе

Условные атрибуты

Атрибут, декорированный атрибутом Conditional, будет компилироваться, только если определен заданный символ препроцессора:

```
// file1.cs
#define DEBUG
using System;
using System.Diagnostics;
[Conditional("DEBUG")]
public class TestAttribute : Attribute {}

// file2.cs
#define DEBUG
[Test]
```

```
class Foo
{
    [Test]
    string s;
}
```

Компилятор включит атрибуты `[Test]`, только если символ `DEBUG` определен в области видимости для файла `file2.cs`.

Директива `#pragma warning`

Компилятор генерирует предупреждение, когда обнаруживает в коде что-то, выглядящее непреднамеренным. В отличие от ошибок предупреждения обычно не препятствуют компиляции приложения.

Предупреждения компилятора могут быть исключительно полезными при выявлении ошибок. Тем не менее, их полезность снижается в случае выдачи ложных предупреждений. Чтобы заметить *настоящие* предупреждения в крупном приложении, важно поддерживать подходящее соотношение “сигнал-шум”.

С этой целью компилятор позволяет избирательно подавлять выдачу предупреждений посредством директивы `#pragma warning`. В следующем примере мы указываем компилятору, чтобы он не выдавал предупреждения о том, что поле `Message` не применяется:

```
public class Foo
{
    static void Main() { }
    #pragma warning disable 414
    static string Message = "Hello";
    #pragma warning restore 414
}
```

Отсутствие числа в директиве `#pragma warning` означает, что будет отключена или восстановлена выдача предупреждений со всеми кодами.

Если вас интересует всестороннее использование данной директивы, тогда можете скомпилировать код с переключателем `/warnaserror`, который сообщит компилятору о необходимости трактовать любые оставшиеся предупреждения как ошибки.

XML-документация

Документирующий комментарий — это порция встроенного XML-кода, которая документирует тип или член типа. Документирующий комментарий располагается непосредственно перед объявлением типа или члена и начинается с трех символов косой черты:

```
/// <summary>Прекращает выполняющийся запрос.</summary>
public void Cancel() { ... }
```

Многострочные комментарии записываются следующим образом:

```
/// <summary>
/// Прекращает выполняющийся запрос.
/// </summary>
public void Cancel() { ... }
```

или так (обратите внимание на дополнительный символ звездочки в начале):

```
/**  
 * <summary>Прекращает выполняющийся запрос.</summary>  
 */  
public void Cancel() { ... }
```

В случае добавления показанных ниже строк к файлу .csproj:

```
<PropertyGroup>  
  <DocumentationFile>SomeFile.xml</DocumentationFile>  
</PropertyGroup>
```

компилятор извлекает и накапливает документирующие комментарии в указанном XML-файле, с которым связаны два основных сценария использования.

Если он размещён в той же папке, что и скомпилированная сборка, то инструменты вроде Visual Studio и LINQPad автоматически читают такой XML-файл и применяют информацию из него для предоставления списка членов через средство IntelliSense потребителям сборки с таким же именем, как у XML-файла. Сторонние инструменты (такие как Sandcastle и NDoc) могут трансформировать XML-файл в справочный HTML-файл.

Стандартные XML-дескрипторы документации

Ниже перечислены стандартные XML-дескрипторы, которые распознаются Visual Studio и генераторами документации.

<summary>
<summary>...</summary>

Указывает всплывающую подсказку, которую средство IntelliSense должно отображать для типа или члена; обычно это одиночное выражение или предложение.

<remarks>
<remarks>...</remarks>

Дополнительный текст, который описывает тип или член. Генераторы документации объединяют его с полным описанием типа или члена.

<param>
<param name="имя">...</param>

Объясняет параметр метода.

<returns>
<returns>...</returns>

Объясняет возвращаемое значение метода.

<exception>
<exception [cref="тип"]>...</exception>

Указывает исключение, которое метод может генерировать (в cref задается тип исключения).

<permission>

```
<permission [cref="тип"]>...</permission>
```

Указывает тип IPermission, требуемый документируемым типом или членом.

<example>

```
<example>...</example>
```

Обозначает пример (используемый генераторами документации). Как правило, содержит описательный текст и исходный код (исходный код обычно заключен в дескриптор <c> или <code>).

<c>

```
<c>...</c>
```

Указывает внутристрочный фрагмент кода. Этот дескриптор обычно применяется внутри блока <example>.

<code>

```
<code>...</code>
```

Указывает многострочный пример кода. Этот дескриптор обычно используется внутри блока <example>.

<see>

```
<see cref="член">...</see>
```

Вставляет внутристрочную перекрестную ссылку на другой тип или член. Генераторы HTML-документации обычно преобразуют ее в гиперссылку. Компилятор выдает предупреждение, если указано недопустимое имя типа или члена.

<seealso>

```
<seealso cref="член">...</seealso>
```

Вставляет перекрестную ссылку на другой тип или член. Генераторы документации обычно помещают ее внутрь отдельного раздела “See Also” (“См. также”) в нижней части страницы.

<paramref>

```
<paramref name="имя"/>
```

Вставляет ссылку на параметр внутри дескриптора <summary> или <remarks>.

<list>

```
<list type=[ bullet | number | table ]>
  <listheader>
    <term>...</term>
    <description>...</description>
  </listheader>
  <item>
    <term>...</term>
    <description>...</description>
  </item>
</list>
```

Инструктирует генератор документации о необходимости выдачи маркированного (bullet), нумерованного (number) или табличного (table) списка.

<para>

```
<para>...</para>
```

Инструктирует генератор документации о необходимости форматирования содержимого в виде отдельного абзаца.

<include>

```
<include file='имя-файла' path='путь-к-дескриптору[@name="идентификатор"]'>
  ...
</include>
```

Выполняет объединение с внешним XML-файлом, содержащим документацию. В атрибуте `path` задается XPath-запрос к конкретному элементу из этого файла.

Дескрипторы, определяемые пользователем

С предопределенными XML-дескрипторами, распознаваемыми компилятором C#, не связано ничего особенного, и вы можете также определять собственные дескрипторы. Компилятор организует специальную обработку только для дескриптора `<param>` (проверяет имя параметра, а также выясняет, документированы ли все параметры метода) и атрибута `cref` (проверяет, что атрибут ссылается на реальный тип или член, и расширяет его в полностью заданный идентификатор типа или члена). Атрибут `cref` можно также применять в собственных дескрипторах; он проверяется и расширяется в точности как для предопределенных дескрипторов `<exception>`, `<permission>`, `<see>` и `<seealso>`.

Перекрестные ссылки на типы или члены

Имена типов и перекрестные ссылки на типы или члены транслируются в идентификаторы, уникальным образом определяющие тип или член. Такие имена образованы из префикса, который определяет, что конкретно представляется идентификатор, и сигнатуры типа или члена. Префиксы членов перечислены ниже.

XML-префикс типа	К какому идентификатору применяется
N	Пространство имен
T	Тип (класс, структура, перечисление, интерфейс, делегат)
F	Поле
P	Свойство (включая индексаторы)
M	Метод (включая специальные методы)
E	Событие
!	Ошибка

Правила генерации сигнатур хорошо документированы, хотя и довольно сложны.

Вот пример типа и сгенерированных идентификаторов:

```
// Пространства имен не имеют независимых сигнатур
namespace NS
{
    /// T:NS.MyClass
    class MyClass
    {
        /// F:NS.MyClass.aField
        string aField;

        /// P:NS.MyClass.aProperty
        short aProperty {get {...} set {...}}

        /// T:NS.MyClass.NestedType
        class NestedType {...};

        /// M:NS.MyClass.X()
        void X() {...}

        /// M:NS.MyClass.Y(System.Int32,System.Double@,System.Decimal@)
        void Y(int p1, ref double p2, out decimal p3) {...}

        /// M:NS.MyClass.Z(System.Char[],System.Single[0:,0:])
        void Z(char[] p1, float[,] p2) {...}

        /// M:NS.MyClass.op_Addition(NS.MyClass,NS.MyClass)
        public static MyClass operator+(MyClass c1, MyClass c2) {...}

        /// M:NS.MyClass.op_Implicit(NS.MyClass)~System.Int32
        public static implicit operator int(MyClass c) {...}

        /// M:NS.MyClass.#ctor
        MyClass() {...}

        /// M:NS.MyClass.Finalize
        ~MyClass() {...}

        /// M:NS.MyClass.#cctor
        static MyClass() {...}
    }
}
```



Обзор .NET

Почти все возможности исполняющей среды .NET 8 доступны через обширное множество управляемых типов. Типы организованы в иерархические пространства имен и упакованы в набор сборок.

Некоторые типы .NET используются напрямую CLR и являются критически важными для среды управляемого размещения. Такие типы находятся в сборке по имени `System.Private.CoreLib.dll` (`mscorlib.dll` в .NET Framework) и включают встроенные типы C#, а также базовые классы коллекций, типы для обработки потоков данных, сериализации, рефлексии, многопоточности и собственной возможности взаимодействия.

Уровнем выше находятся дополнительные типы, которые расширяют функциональность уровня CLR, предоставляя такие средства, как XML, JSON, взаимодействие с сетью и LINQ. Они образуют библиотеку базовых классов (Base Class Library — BCL). Выше находятся *прикладные слои*, которые предоставляют API-интерфейсы для разработки определенных видов приложений наподобие веб-приложения или обогащенного клиентского приложения.

Вот что предлагается в настоящей главе:

- краткий обзор библиотеки BCL (которая будет более подробно рассматриваться в оставшихся главах книги);
- высокоуровневый обзор прикладных слоев.

Библиотеки базовых классов в .NET 7 и .NET 8 включают множество новых функциональных средств и улучшений производительности.

- Формат архивов Tar, популярный в системах Unix, теперь поддерживается через типы в новом пространстве имен System.Formats.Tar (см. раздел “Работа с файлами Tar” в главе 15). Класс ZipFile тоже был усовершенствован, чтобы позволить архивировать папки с файлами непосредственно в поток либо из него.
- Класс Stream теперь предоставляет методы ReadExactly и ReadAtLeast для упрощения чтения из потоков (см. раздел “Чтение и запись” в главе 15).
- Появилась поддержка работы с разрешениями файлов Unix (см. раздел “Безопасность файлов в Unix” в главе 15).
- Расширена поддержка Span<T> и ReadOnlySpan<T>. В частности, числовые и другие простые типы теперь поддерживают форматирование и разбор UTF-8 непосредственно в Span<byte> через новые интерфейсы IUtf8SpanFormattable и IUtf8SpanParseable<TSelf>, а класс MemoryExtensions содержит дополнительные расширяющие методы, которые помогают искать значения внутри промежутков (см. раздел “Поиск в промежутках” в главе 23).
- Класс Random теперь содержит метод GetItems для выбора случайных элементов из коллекции и метод Shuffle для случайного перемешивания элементов (см. раздел “Класс Random” в главе 6).
- Типы даты и времени .NET теперь предоставляют свойства Microsecond и Nanosecond.
- Класс JsonNode имеет ряд новых методов, включая GetValueKind, DeepEquals, DeepClone и ReplaceWith (см. раздел “Класс JsonNode” в главе 11).
- Появились два новых типа коллекций, доступных только для чтения: FrozenDictionary<K, V> и FrozenSet<T>. Они похожи на существующие типы ImmutableDictionary<K, V> и ImmutableHashSet<T>, но оптимизированы исключительно для чтения, без методов неразрушающего изменения (см. раздел “Замороженные коллекции” в главе 7).
- Класс RegEx теперь поддерживает флаг RegexOptions.NonBacktracking, который помогает избежать атак типа отказа в обслуживании с использованием выражений, предоставленных пользователем (см. раздел “Перечисление флагов RegexOptions” в главе 25). Кроме того, механизм регулярных выражений стал работать быстрее.
- Теперь доступны типы для хеширования SHA-3 при условии его поддержки операционной системой (см. раздел “Алгоритмы хеширования в .NET” в главе 20).

Механизм сериализации JSON тоже был усовершенствован: в нем появились новые функциональные средства и повышена его производительность.

Целевые платформы и TFM

Элемент `<TargetFramework>` в файле проекта определяет, для какой исполняющей среды создается проект (его *целевая платформа* или *целевая исполняющая среда*) и обозначается с помощью моникера *целевой платформы* (Target Framework Moniker — TFM). Допустимыми значениями являются `net8.0`, `net7.0`, `net6.0`, `net5.0` (для версий .NET 8, 7, 6 и 5), `netcoreapp3.1` (для .NET Core 3.1), `net48` (для .NET Framework 4.8) и `netstandard2.0` (стандарт, который будет обсуждаться в следующем разделе). Например, вот как нацелиться на .NET 8:

```
<PropertyGroup>
  <TargetFramework>net8.0</TargetFramework>
<PropertyGroup>
```

Можно нацелиться на несколько исполняющих сред, указав взамен `<TargetFramework>` элемент `<TargetFrameworks>`. Моникеры TFM отделяются друг от друга точкой с запятой:

```
<TargetFrameworks>net8.0;net48</TargetFrameworks>
```

При нацеливании на множество исполняющих сред компилятор создает для каждой цели отдельную выходную сборку.

Целевая платформа кодируется в выходной сборке с помощью атрибута `TargetFramework`. Сборка может выполняться под управлением более новой (но не более старой) исполняющей среды, нежели указанная для нее цель.

.NET Standard

Изобилие публичных библиотек, которые доступны через NuGet, не было бы настолько ценным, если бы они поддерживали только .NET 8. При написании библиотеки вы часто хотите поддерживать различные платформы и версии исполняющей среды. Чтобы достичь такой цели, не создавая отдельные сборки для каждой исполняющей среды (при множественном нацеливании), вы должны ориентироваться на наименьший общий знаменатель. Это относительно легко при желании поддерживать только непосредственных предшественников .NET 8: скажем, если проект нацелен на .NET 6 (`net6.0`), то ваша библиотека будет работать под управлением .NET 6, .NET 7 и .NET 8.

Ситуация становится более запутанной, когда желательно поддерживать также и .NET Framework (или унаследованные исполняющие среды вроде Xamarin). Дело в том, что каждая такая исполняющая среда имеет CLR и BCL с перекрывающимися функциональными средствами — ни одна исполняющая среда не является чистым подмножеством остальных.

.NET Standard решает проблему путем определения искусственных подмножеств, которые обеспечивают работу под управлением целого набора исполняющих сред. Нацеливаясь на .NET Standard, вы можете легко создавать библиотеки с широким охватом.



.NET Standard — не исполняющая среда, а просто спецификация, описывающая минимальный базовый уровень функциональности (типы и члены), который гарантирует совместимость с определенным набором исполняющих сред. Концепция похожа на интерфейсы C#: стандарт .NET Standard подобен интерфейсу, который конкретные типы (исполняющие среды) могут реализовывать.

.NET Standard 2.0

Наиболее полезной версией является *.NET Standard 2.0*. Библиотека, которая ориентирована на .NET Standard 2.0, а не на специфическую исполняющую среду, будет работать без каких-либо изменений под управлением современных версий .NET (.NET 8/7/6/5 вплоть до .NET Core 2) и .NET Framework (4.6.1+). Она также будет поддерживать унаследованные платформы UWP (начиная с версии 10.0.16299+) и Mono 5.4+ (CLR/BCL, используемые более старыми версиями Xamarin).

Для нацеливания на .NET Standard 2.0 добавьте в свой файл `.csproj` следующие строки:

```
<PropertyGroup>
  <TargetFramework>netstandard2.0</TargetFramework>
<PropertyGroup>
```

Большинство описанных в книге API-интерфейсов поддерживаются стандартом .NET Standard 2.0 (а большинство остальных доступны в виде пакетов NuGet).

Другие стандарты .NET Standard

.NET Standard 2.1 является надмножеством стандарта .NET Standard 2.0, которое поддерживает (только) следующие платформы:

- .NET Core 3+
- Mono 6.4+

Стандарт .NET Standard 2.1 не поддерживается ни одной из версий .NET Framework, что делает его менее полезным, чем .NET Standard 2.0.

Существуют также более старые стандарты .NET Standard, такие как 1.1, 1.2, 1.3 и 1.6, совместимость которых распространяется на устаревшие среды выполнения, подобные .NET Core 1.0 или .NET Framework 4.5. В стандартах 1.x отсутствуют тысячи API-интерфейсов, которые имеются в версии 2.0 (включая большую часть того, что описано в настоящей книге), так что стандарты 1.x фактически прекратили свое существование.

Совместимость .NET Framework и .NET 8

Инфраструктура .NET Framework существует настолько долго, что нередко можно встретить библиотеки, которые доступны только для .NET Framework (без каких-либо эквивалентов для .NET Standard, .NET Core или .NET 8). Для

смягчения последствий в такой ситуации проектам .NET 5+ и .NET Core разрешено ссылаться на сборки .NET Framework при соблюдении следующих условий.

- При обращении в сборке .NET Framework к API-интерфейсу, который не поддерживается в .NET Core, должно генерироваться исключение.
- Распознавание нетривиальных зависимостей может оказаться безуспешным (и часто таковым оказывается).

Скорее всего, на практике это будет работать в простых случаях, таких как сборка, которая представляет собой оболочку для неуправляемой DLL-библиотеки.

Ссылочные сборки

Когда ваш проект нацелен на .NET Standard, он неявно ссылается на сборку по имени `netstandard.dll`, которая содержит все разрешенные типы и члены для выбранной версии .NET Standard. Она называется *ссылочной сборкой*, потому что существует только в интересах компилятора и не содержит скомпилированный код. Во время выполнения “настоящие” сборки идентифицируются через атрибуты перенаправления сборок (выбор сборок зависит от того, под управлением какой исполняющей среды и платформы в итоге будет произведется запуск).

Интересно отметить, что похожие вещи происходят при нацеливании на .NET 8. Ваш проект неявно ссылается на набор ссылочных сборок, типы которых отражают содержимое сборок времени выполнения для выбранной версии .NET. Это помогает управлять версиями и межплатформенной совместимостью и также позволяет нацеливаться на версию .NET, которая отличается от версии, установленной на вашей машине.

Версии исполняющих сред и языка C#

По умолчанию используемую версию языка C# определяет целевая исполняющая среда проекта:

Целевая исполняющая среда	Версия C#
.NET 8	C# 12
.NET 7	C# 11
.NET 6	C# 10
.NET 5	C# 9
.NET Core 3.x и 2.x	C# 8
.NET Framework	C# 7.3
.NET Standard 2.0	C# 7.3

Причина в том, что более поздние версии C# включают функциональные средства, которые основаны на типах, представленных в более поздних исполняющих средах.

Переопределить версию языка можно с помощью элемента `<LangVersion>` в файле проекта. Использование более старой исполняющей среды (скажем, .NET Framework) с более поздней версией языка (например, C# 12) означает, что языковые средства, основанные на новых типах .NET, работать не будут (хотя в некоторых случаях вы можете определить такие типы самостоятельно либо импортировать их из пакета NuGet).

Среда CLR и библиотека BCL

Системные типы

Наиболее фундаментальные типы находятся непосредственно в пространстве имен `System`. В их состав входят встроенные типы C#, базовый класс `Exception`, базовые классы `Enum`, `Array` и `Delegate`, а также типы `Nullable`, `Type`, `DateTime`, `TimeSpan` и `Guid`. Кроме того, пространство имен `System` включает типы для выполнения математических функций (`Math`), генерации случайных чисел (`Random`) и преобразования между различными типами (`Convert` и `BitConverter`).

Фундаментальные типы описаны в главе 6 вместе с интерфейсами, которые определяют стандартные протоколы, используемые повсеместно в .NET для решения таких задач, как форматирование (`IFormattable`) и сравнение порядка (`IComparable`).

В пространстве имен `System` также определен интерфейс `IDisposable` и класс `GC` для взаимодействия со сборщиком мусора; мы рассмотрим их в главе 12.

Обработка текста

Пространство имен `System.Text` содержит класс `StringBuilder` (редактируемый или изменяемый родственник `string`) и типы для работы с кодировками текста, такими как UTF-8 (`Encoding` и его подтипы). Мы раскроем их в главе 6.

Пространство имен `System.Text.RegularExpressions` содержит типы, которые выполняют расширенные операции поиска и замены на основе образца; такие типы будут описаны в главе 25.

Коллекции

В .NET предлагаются разнообразные классы для управления коллекциями элементов. Они включают структуры, основанные на списках и словарях, и работают в сочетании с набором стандартных интерфейсов, которые унифицируют их общие характеристики. Все типы коллекций определены в следующих пространствах имен, описанных в главе 7:

```
System.Collections           // Необобщенные коллекции
System.Collections.Generic // Обобщенные коллекции
System.Collections.Frozen   // Высокопроизводительные коллекции,
                           // допускающие только чтение
System.Collections.Immutable // Универсальные коллекции,
                           // допускающие только чтение
System.Collections.Specialized // Строго типизированные коллекции
System.Collections.ObjectModel // Базовые типы для создания
                           // собственных коллекций
System.Collections.Concurrent // Коллекции, безопасные в отношении
                           // потоков (глава 22)
```

Запросы

Язык LINQ позволяет выполнять безопасные в отношении типов запросы к локальным и удаленным коллекциям (например, к таблицам SQL Server) и описан в главах 8, 9 и 10. Крупное преимущество языка LINQ заключается в том, что он предоставляет согласованный API-интерфейс запросов для разнообразных предметных областей. Основные типы находятся в перечисленных ниже пространствах имен:

```
System.Linq                  // LINQ to Objects и PLINQ
System.Linq.Expressions       // Для ручного построения выражений
System.Xml.Linq              // LINQ to XML
```

XML и JSON

XML и JSON поддерживаются в .NET повсеместно. Внимание в главе 10 сосредоточено целиком на LINQ to XML — легковесной модели документных объектов (Document Object Model — DOM) для XML, которую можно конструировать и опрашивать с помощью LINQ. В главе 11 описаны высокопроизводительные низкоуровневые классы для чтения/записи разметки XML, схем и таблиц стилей XML, а также типы для работы с данными JSON:

```
System.Xml                    // XmlReader, XmlWriter и старая модель W3C DOM
System.Xml.Linq               // DOM-модель LINQ to XML
System.Xml.Schema              // Поддержка для XSD
System.Xml.Serialization      // Декларативная сериализация XML для типов .NET
System.Xml.XPath                // Язык запросов XPath
System.Xml.Xsl                  // Поддержка таблиц стилей
System.Text.Json                // Средство чтения/записи JSON и DOM
System.Text.Json.Nodes          // API-интерфейс JsonNode (DOM)
```

Сериализатор JSON описан в дополнительных материалах, доступных для загрузки на веб-сайте издательства.

Диагностика

В главе 13 мы рассмотрим регистрацию в журнале и утверждения, а также покажем, как взаимодействовать с другими процессами, выполнять запись в журнал событий Windows и проводить мониторинг производительности.

Соответствующие типы определены в пространстве имен System.Diagnostics и его подпространствах.

Параллелизм и асинхронность

Многим современным приложениям в каждый момент времени приходится иметь дело с несколькими действиями. Начиная с версии C# 5.0, решение стало проще за счет асинхронных функций и таких высокоуровневых конструкций, как задачи и комбинаторы задач. Все это подробно объясняется в главе 14, которая начинается с рассмотрения основ многопоточности. Типы для работы с потоками и асинхронными операциями находятся в пространствах имен System.Threading и System.Threading.Tasks.

Потоки данных и ввод-вывод

В .NET предоставляется потоковая модель для низкоуровневого ввода-вывода. Потоки данных обычно применяются для чтения и записи напрямую в файлы и сетевые подключения и могут соединяться в цепочки либо помещаться внутрь декорированных потоков с целью добавления функциональности сжатия или шифрования. В главе 15 описана потоковая архитектура, а также специфическая поддержка для работы с файлами и каталогами, сжатием, изолированным хранилищем, каналами и файлами, отображенными в память. Тип Stream и типы ввода-вывода определены в пространстве имен System.IO и его подпространствах.

Работа с сетями

С помощью типов из пространства имен System.Net можно напрямую работать с большинством стандартных сетевых протоколов вроде HTTP, TCP/IP и SMTP. В главе 16 будет показано, как взаимодействовать с применением каждого из упомянутых протоколов, начиная с простых задач вроде загрузки веб-страницы и заканчивая применением TCP/IP для извлечения сообщений электронной почты POP3. Ниже перечислены пространства имен, которые будут рассмотрены:

```
System.Net
System.Net.Http          // HttpClient
System.Net.Mail           // Для отправки электронной почты через SMTP
System.Net.Sockets        // TCP, UDP и IP
```

Сборки, рефлексия и атрибуты

Сборки, в которые компилируются программы на C#, состоят из исполняемых инструкций (представленных на языке IL) и метаданных, которые описывают типы, члены и атрибуты программы. С помощью рефлексии можно просматривать метаданные во время выполнения и предпринимать действия вроде динамического вызова методов. Посредством пространства имен Reflection.Emit можно конструировать новый код на лету.

В главе 17 мы опишем строение сборок и объясним, как их динамически загружать и изолировать. В главе 18 мы раскроем рефлексию и атрибуты — покажем, как инспектировать метаданные, динамически вызывать функции, записывать специальные атрибуты, выпускать новые типы и производить разбор низкоуровневого кода IL. Типы для применения рефлексии и работы со сборками находятся в следующих пространствах имен:

```
System  
System.Reflection  
System.Reflection.Emit
```

Динамическое программирование

В главе 19 мы рассмотрим несколько паттернов для динамического программирования и работы со средой DLR. Мы покажем, как реализовать паттерн “Посетитель” (Visitor), создавать специальные динамические объекты и взаимодействовать с IronPython. Типы, предназначенные для динамического программирования, находятся в пространстве имен `System.Dynamic`.

Криптография

.NET обеспечивает всестороннюю поддержку для популярных протоколов хеширования и шифрования. В главе 20 мы раскроем хеширование, симметричное шифрование и шифрование с открытым ключом, а также API-интерфейс Windows Data Protection. Типы для этого определены в следующих пространствах имен:

```
System.Security  
System.Security.Cryptography
```

Расширенная многопоточность

Асинхронные функции в C# значительно облегчают параллельное программирование, поскольку снижают потребность во взаимодействии с низкоуровневыми технологиями. Тем не менее, все еще возникают ситуации, когда нужны сигнальные конструкции, локальное хранилище потока, блокировки чтения/записи и т.д. Данные вопросы подробно обсуждаются в главе 21. Типы, связанные с многопоточностью, находятся в пространстве имен `System.Threading`.

Параллельное программирование

В главе 22 мы рассмотрим библиотеки и типы для работы с многоядерными процессорами, включая API-интерфейсы для реализации параллелизма задач, императивного параллелизма данных и функционального параллелизма (PLINQ).

Span<T> и Memory<T>

Для содействия микрооптимизации в “горячих” точках в плане производительности среда CLR предлагает несколько типов, которые помогают програм-

мировать так, чтобы снизить нагрузку на диспетчер памяти. Двумя ключевыми типами подобного рода являются `Span<T>` и `Memory<T>`, которые будут описаны в главе 23.

Возможность взаимодействия с собственным кодом и COM

Вы можете взаимодействовать с собственным кодом и с кодом COM. Возможность взаимодействия с собственным кодом позволяет вызывать функции из неуправляемых DLL-библиотек, регистрировать обратные вызовы, отображать структуры данных и работать с собственными типами данных. Возможность взаимодействия с COM позволяет обращаться к типам COM (на машинах Windows) и открывать для COM доступ к типам .NET. Типы, поддерживающие такую функциональность, определены в пространстве имен `System.Runtime.InteropServices` и рассматриваются в главе 24.

Регулярные выражения

В главе 25 мы покажем, как можно использовать регулярные выражения для сопоставления с символьными шаблонами в строках.

Сериализация

.NET предлагает несколько систем для сохранения и восстановления объектов в двоичном или текстовом представлении. Такие системы могут применяться для передачи данных, а также для сохранения и восстановления объектов из файлов. В дополнительных материалах, доступных для загрузки на веб-сайте издательства, раскрываются все четыре механизма сериализации: двоичный сериализатор, (обновленный) сериализатор JSON, сериализатор XML и сериализатор на основе контрактов данных.

Компилятор Roslyn

Сам компилятор C# написан на языке C# — проект называется Roslyn, а библиотеки доступны в виде пакетов NuGet. С помощью этих библиотек вы можете эксплуатировать функциональность компилятора многими способами помимо компиляции исходного кода в сборку, скажем, писать инструменты для анализа и рефакторинга кода. Компилятор Roslyn рассматривается в дополнительных материалах, доступных для загрузки на веб-сайте издательства.

Прикладные слои

Приложения, основанные на пользовательском интерфейсе, можно разделить на две категории: *тонкий клиент*, равнозначный веб-сайту, и *обогащенный клиент*, представляющий собой программу, которую конечный пользователь должен загрузить и установить на компьютере или на мобильном устройстве.

Для разработки приложений тонких клиентов на языке C# предусмотрена инфраструктура ASP.NET Core, которая запускается в среде Windows, Linux и

macOS. Кроме того, инфраструктура ASP.NET Core позволяет реализовывать API-интерфейсы для веб-сети.

Для разработки приложений обогащенных клиентов на выбор доступно несколько API-интерфейсов:

- слой Windows Desktop, который включает популярные API-интерфейсы WPF и Windows Forms и функционирует на настольных компьютерах с Windows 7/8/10/11;
- WinUI 3 (Windows App SDK) — преемник UWP, который работает (только) на настольных компьютерах с Windows 10+;
- UWP позволяет писать приложения для Магазина Windows, которые функционируют на настольных компьютерах с Windows 10+ и таких устройствах, как Xbox или HoloLens;
- MAUI (ранее Xamarin) работает на мобильных устройствах iOS и Android. MAUI также позволяет создавать межплатформенные настольные приложения, предназначенные для выполнения в средах macOS (через Catalyst) и Windows (через Windows App SDK).

В добавок существуют сторонние межплатформенные библиотеки для построения пользовательского интерфейса, подобные Avalonia. В отличие от MAUI библиотека Avalonia также поддерживает Linux и не использует слой косвенного управления Catalyst/WinUI для платформ настольных систем, что упрощает разработку и отладку.

ASP.NET Core

ASP.NET Core — это легковесный модульный преемник ASP.NET, который подходит для создания веб-сайтов, API-интерфейсов на основе REST и микрослужб. Кроме того, ASP.NET Core может работать в сочетании с двумя популярными фреймворками для односторонних приложений: React и Angular.

ASP.NET поддерживает популярный паттерн MVC (Model-View-Controller — модель-представление-контроллер), а также более новую технологию под названием Blazor, где клиентский код реализован на C#, а не JavaScript.

ASP.NET Core функционирует под управлением Windows, Linux и macOS и может самостоятельно размещаться в специальном процессе. В отличие от своего предшественника из .NET Framework (ASP.NET) архитектура ASP.NET Core не зависит от System.Web и от исторического багажа веб-форм.

Как и любая архитектура тонкого клиента, ASP.NET Core обладает следующими общими преимуществами по сравнению с обогащенными клиентами:

- отсутствует развертывание на клиентской стороне;
- клиент может запускаться на любой платформе, которая поддерживает веб-браузер;
- легко развертывать обновления.

Windows Desktop

Прикладной слой Windows Desktop предлагает на выбор два API-интерфейса для реализации пользовательских интерфейсов в приложениях обогащенных клиентов: WPF и Windows Forms. Оба API-интерфейса работают в среде Windows Desktop/Server 7–11.

WPF

Инфраструктура WPF появилась в 2006 году и с тех пор неоднократно расширялась. В отличие от своей предшественницы, Windows Forms, она явно визуализирует элементы управления с использованием DirectX, обеспечивая перечисленные ниже преимущества.

- Инфраструктура WPF поддерживает развитую графику, включая произвольные трансформации, трехмерную визуализацию, мультимедиа-возможности и подлинную прозрачность. Оформление поддерживается через стили и шаблоны.
- Основная единица измерения не базируется на пикселях, поэтому приложения корректно отображаются при любой настройке DPI (Dots Per Inch — точек на дюйм).
- Она располагает обширной и гибкой поддержкой динамической компоновки, означающей возможность локализации приложения без опасности того, что элементы будут перекрывать друг друга.
- Применение DirectX делает визуализацию быстрой и способной извлекать преимущества от аппаратного ускорения графики.
- Она предлагает надежную привязку к данным.
- Пользовательские интерфейсы могут быть описаны декларативно в XAML-файлах, которые допускают сопровождение независимо от файлов отдельного кода, что помогает разнести внешний вид и функциональность.

Инфраструктура WPF требует некоторого времени на изучение из-за своего размера и сложности. Типы, предназначенные для написания WPF-приложений, находятся в пространстве имён `System.Windows` и во всех его подпространствах за исключением `System.Windows.Forms`.

Windows Forms

Windows Forms — это API-интерфейс обогащенного клиента, который поставлялся с первой версией .NET Framework в 2000 году. По сравнению с WPF она является относительно простой технологией, которая предлагает большинство возможностей, необходимых во время разработки типового Windows-приложения. Она также играла важную роль в сопровождении унаследованных приложений. Тем не менее, в сравнении с WPF инфраструктура Windows Forms обладает рядом недостатков, большинство из которых объясняется тем, что она является оболочкой для GDI+ и библиотеки элементов управления Win32.

- Хотя Windows Forms предоставляет механизмы для осведомленности о настройках DPI, все же слишком легко получать приложения, которые не-

корректно отображаются на клиентах с настройками DPI, отличающимися от таких настроек у разработчика.

- Для рисования нестандартных элементов управления используется API-интерфейс GDI+, который вопреки достаточно высокой гибкости медленно визуализирует крупные области (и без двойной буферизации может вызывать мерцание).
- Элементы управления лишены подлинной прозрачности.
- Большинство элементов управления не поддерживают компоновку. Например, поместить элемент управления изображением внутрь заголовка элемента управления вкладкой не удастся. Настройка списковых представлений, полей с раскрывающимися списками и элементов управления с вкладками, которая была бы тривиальной в WPF, требует много времени и сил.
- Трудно корректно и надежно реализовать динамическую компоновку.

Последний пункт является веской причиной отдавать предпочтение WPF перед Windows Forms, даже если разрабатывается бизнес-приложение, которому необходим только пользовательский интерфейс, а не учет “поведенческих особенностей пользователей”. Элементы компоновки в WPF, подобные Grid, упрощают организацию меток и текстовых полей таким образом, что они будут всегда выровненными — даже при смене языка локализации — без запутанной логики и какого-либо мерцания. Кроме того, не придется приводить все к наименьшему общему знаменателю в смысле экранного разрешения — элементы компоновки WPF изначально проектировались с поддержкой изменения размеров.

В качестве положительного момента следует отметить, что инфраструктура Windows Forms относительно проста в изучении и все еще поддерживается в немалом количестве сторонних элементов управления.

Типы Windows Forms находятся в пространствах имен System.Windows.Forms (сборка System.Windows.Forms.dll) и System.Drawing (сборка System.Drawing.dll). Последнее пространство имен также содержит типы GDI+ для рисования специальных элементов управления.

UWP и WinUI 3

Универсальная платформа Windows (Universal Windows Platform — UWP) представляет собой API-интерфейс обогащенного клиента, который предназначен для разработки сенсорных приложений, ориентированных на настольные компьютеры и устройства Windows 10+. Слово “универсальная” относится к способности UWP функционировать на различных устройствах Windows 10, в том числе Xbox, Surface Hub, HoloLens и (на то время) Windows Phone.

API-интерфейс UWP использует XAML и кое в чем похож на WPF. Ниже перечислены его ключевые отличия.

- Приложения UWP поставляются главным образом через Магазин Microsoft.
- Приложения UWP работают в песочнице, чтобы уменьшить угрозу со стороны вредоносного программного обеспечения, а это означает, что они не могут выполнять такие задачи, как чтение или запись произвольных файлов, и их нельзя запускать с повышенными административными правами.

- Платформа UWP опирается на типы WinRT, которые являются частью операционной системы (Windows), а не управляемой исполняющей среды. В результате при написании приложений вы обязаны объявлять диапазон версий Windows (скажем, от Windows 10 сборки 17763 до Windows 10 сборки 18362). Таким образом, вам необходимо либо ориентировать приложения на старый API-интерфейс, либо требовать от пользователей установки самого последнего обновления Windows.

Из-за ограничений, вызванных этими различиями, UWP никогда не удавалось сравняться по популярности с WPF и Windows Forms. Для решения проблемы в Microsoft решили превратить UWP в новую технологию под названием Windows App SDK (со слоем пользовательского интерфейса под названием WinUI 3).

Windows App SDK переносит API-интерфейсы WinRT из операционной системы в среду выполнения, предоставляя тем самым полностью управляемый интерфейс и устранивая необходимость ориентироваться на определенный диапазон версий операционной системы. Ниже перечислены его особенности.

- Он лучше интегрируется с API-интерфейсами Windows Desktop (Windows Forms и WPF).
- Он позволяет создавать приложения, которые работают за пределами пе-сочницы Магазина Windows.
- Он функционирует на базе последней версии .NET (вместо привязки к .NET Core 2.2, как в случае с UWP).

Несмотря на такие усовершенствования, WinUI 3 не завоевал такой же популярности, как классические API-интерфейсы Windows Desktop. Кроме того, на момент написания книги Windows App SDK не поддерживал Xbox или HoloLens и требовал отдельной загрузки конечным пользователем.

MAUI

MAUI (ранее Xamarin) позволяет разрабатывать мобильные приложения на C#, предназначенные для сред iOS и Android (а также межплатформенные настольные приложения, ориентированные на macOS и Windows, с помощью Catalyst и Windows App SDK).

Среда CLR и библиотека BCL, работающие под управлением iOS и Android, вместе называются Mono (исполняющая среда, происходящая от Mono с открытым кодом). Исторически сложилось так, что Mono не была полностью совместимой с .NET, а библиотеки, функционирующие как в Mono, так и в .NET, ориентировались на .NET Standard. Тем не менее, начиная с версии .NET 6, открытый интерфейс Mono был объединен с .NET, в результате чего среда Mono по существу стала реализацией .NET.

MAUI включает унифицированный интерфейс проекта, горячую перезагрузку, а также поддержку Blazor Desktop и гибридных приложений. Дополнительную информацию можно получить по ссылке <https://github.com/dotnet/maui>.



6

Основы .NET

Многие ключевые возможности, необходимые во время программирования, предоставляются не языком C#, а типами в библиотеке .NET BCL. В настоящей главе мы рассмотрим типы, которые помогают решать фундаментальные программные задачи, такие как виртуальное сравнение эквивалентности, сравнение порядка и преобразование типов. Мы также обсудим базовые типы .NET, подобные `String`, `DateTime` и `Enum`.

Описываемые здесь типы находятся в пространстве имен `System` со следующими исключениями:

- тип `StringBuilder` определен в пространстве имен `System.Text`, т.к. относится к типам для *кодировок текста*;
- тип `CultureInfo` и связанные с ним типы определены в пространстве имен `System.Globalization`;
- тип `XmlConvert` определен в пространстве имен `System.Xml`.

Обработка строк и текста

Тип `char`

Тип `char` в C# представляет одиночный символ Unicode и является псевдонимом структуры `System.Char`. В главе 2 было показано, как выражать литералы `char`:

```
char c = 'A';
char newLine = '\n';
```

В структуре `System.Char` определен набор статических методов для работы с символами, в том числе `ToUpper`, `ToLower` и `IsWhiteSpace`. Их можно вызывать либо через тип `System.Char`, либо через его псевдоним `char`:

```
Console.WriteLine (System.Char.ToUpper ('c'));           // C
Console.WriteLine (char.IsWhiteSpace ('\t'));             // True
```

Методы `ToUpper` и `ToLower` учитывают локаль конечного пользователя, что может приводить к неуловимым ошибкам. Следующее выражение дает `false` для турецкой локали:

```
char.ToUpper ('i') == 'I'
```

Причина в том, что в данном случае `char.ToUpper ('i')` равно '`í`' (обратите внимание на точку в верхней части буквы). Чтобы избежать проблем подобного рода, тип `System.Char` (и `System.String`) также предлагает независимые от культуры версии методов `ToUpper` и `ToLower`, имена которых завершаются словом `Invariant`. В них всегда применяются правила культуры английского языка:

```
Console.WriteLine (char.ToUpperInvariant ('i')); // I
```

Это является сокращением для такого кода:

```
Console.WriteLine (char.ToUpper ('i', CultureInfo.InvariantCulture));
```

Дополнительные сведения о локалях и культурах можно найти в разделе “Форматирование и разбор” далее в главе.

Большинство оставшихся статических методов типа `char` имеет отношение к категоризации символов; они перечислены в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Статические методы для категоризации символов

Статический метод	Включает символы	Включает категории Unicode
<code>IsLetter</code>	A–Z, a–z и все буквы из других алфавитов	<code>UpperCaseLetter</code> <code>LowerCaseLetter</code> <code>TitleCaseLetter</code> <code>ModifierLetter</code> <code>OtherLetter</code>
<code>IsUpper</code>	Буквы в верхнем регистре	<code>UpperCaseLetter</code>
<code>IsLower</code>	Буквы в нижнем регистре	<code>LowerCaseLetter</code>
<code>IsDigit</code>	0–9 и цифры из других алфавитов	<code>DecimalDigitNumber</code>
<code>IsLetterOrDigit</code>	Буквы и цифры	<code>IsLetter</code> , <code>IsDigit</code>
<code>IsNumber</code>	Все цифры, а также дроби Unicode и числовые символы латинского набора	<code>DecimalDigitNumber</code> <code>LetterNumber</code> <code>OtherNumber</code>
<code>IsSeparator</code>	Пробел и все символы разделителей Unicode	<code>LineSeparator</code> <code>ParagraphSeparator</code>
<code>IsWhiteSpace</code>	Все разделители, а также <code>\n</code> , <code>\r</code> , <code>\t</code> , <code>\f</code> и <code>\v</code>	<code>LineSeparator</code> <code>ParagraphSeparator</code>
<code>IsPunctuation</code>	Символы, используемые для пунктуации в латинском и других алфавитах	<code>DashPunctuation</code> <code>ConnectorPunctuation</code> <code>InitialQuotePunctuation</code> <code>FinalQuotePunctuation</code>
<code>IsSymbol</code>	Большинство других печатаемых символов	<code>MathSymbol</code> <code>ModifierSymbol</code> <code>OtherSymbol</code>
<code>IsControl</code>	Непечатаемые “управляющие” символы с кодами меньше 0x20, такие как <code>\r</code> , <code>\n</code> , <code>\t</code> , <code>\0</code> и символы с кодами между 0x7F и 0x9A	–

Для более детальной категоризации тип `char` предоставляет статический метод по имени `GetUnicodeCategory`; он возвращает перечисление `UnicodeCategory`, члены которого были показаны в правой колонке табл. 6.1.



При явном приведении целочисленного значения вполне возможно получить значение `char`, выходящее за пределы выделенного набора Unicode. Для проверки допустимости символа необходимо вызвать метод `char.GetUnicodeCategory`: если результатом оказывается `UnicodeCategory.OtherNotAssigned`, то символ является недопустимым.

Значение `char` имеет ширину 16 бит, которой достаточно для представления любого символа Unicode в *базовой многоязыковой плоскости*. Чтобы выйти за ее пределы, потребуется применять суррогатные пары: мы опишем необходимые методы в разделе “Кодировка текста и Unicode” далее в главе.

Тип `string`

Тип `string` (псевдоним класса `System.String`) в C# является неизменяемой последовательностью символов. В главе 2 мы объяснили, как выражать строковые литералы, выполнять сравнения эквивалентности и осуществлять конкатенацию двух строк. В текущем разделе мы рассмотрим остальные функции для работы со строками, которые доступны через статические члены и члены экземпляра класса `System.String`.

Конструирование строк

Простейший способ конструирования строки предусматривает присваивание литерала, как было показано в главе 2:

```
string s1 = "Hello";
string s2 = "First Line\r\nSecond Line";
string s3 = @"\server\fileshare\helloworld.cs";
```

Чтобы создать повторяющуюся последовательность символов, можно использовать конструктор `string`:

```
Console.Write (new string ('*', 10)); // *****
```

Строку можно также конструировать из массива `char`. Метод `ToCharArray` выполняет обратное действие:

```
char[] ca = "Hello".ToCharArray();
string s = new string (ca); // s = "Hello"
```

Конструктор типа `string` имеет перегруженные версии, которые принимают разнообразные (небезопасные) типы указателей и предназначены для создания строк из таких типов, как `char*`.

Строки `null` и пустые строки

Пустая строка имеет нулевую длину. Чтобы создать пустую строку, можно применить либо литерал, либо статическое поле `string.Empty`; для проверки,

пуста ли строка, можно либо выполнить сравнение эквивалентности, либо просмотреть свойство Length строки:

```
string empty = "";
Console.WriteLine (empty == ""); // True
Console.WriteLine (empty == string.Empty); // True
Console.WriteLine (empty.Length == 0); // True
```

Поскольку строки являются ссылочными типами, они также могут быть null:

```
string nullString = null;
Console.WriteLine (nullString == null); // True
Console.WriteLine (nullString == ""); // False
Console.WriteLine (nullString.Length == 0); // Генерируется исключение
                                            // NullReferenceException
```

Статический метод string.IsNullOrEmpty является удобным сокращением для проверки, равна ли заданная строка null или же является пустой.

Доступ к символам внутри строки

Индексатор строки возвращает одиночный символ по указанному индексу. Как и во всех функциях для работы со строками, индекс начинается с нуля:

```
string str = "abcde";
char letter = str[1]; // letter == 'b'
```

Кроме того, тип string реализует интерфейс `IEnumerable<char>`, так что по символам строки можно проходить с помощью цикла foreach:

```
foreach (char c in "123") Console.Write (c + ","); // 1,2,3,
```

Поиск внутри строк

К простейшим методам поиска внутри строк относятся `StartsWith`, `EndsWith` и `Contains`. Все они возвращают true или false:

```
Console.WriteLine ("quick brown fox".EndsWith ("fox")); // True
Console.WriteLine ("quick brown fox".Contains ("brown")); // True
```

Эти методы перегружены, чтобы позволить указывать член перечисления `StringComparison` для управления чувствительностью к регистру символов и культуре (см. раздел “Одинарное сравнение или сравнение, чувствительное к культуре” далее в главе). По умолчанию выполняется сопоставление, чувствительное к культуре, с использованием правил, которые применимы к текущей (локализованной) культуре. В следующем случае производится поиск, нечувствительный к регистру символов, с использованием правил, не зависящих от культуры:

```
"abcdef".StartsWith ("aBc", StringComparison.InvariantCultureIgnoreCase)
```

Метод `IndexOf` возвращает позицию первого вхождения заданного символа или подстроки (или -1, если символ или подстрока не найдена):

```
Console.WriteLine ("abcde".IndexOf ("cd")); // 2
```

Метод `IndexOf` также перегружен для приема значения `startPosition` (индекса, с которого должен начинаться поиск) и перечисления `StringComparison`:

```
Console.WriteLine ("abcde abcde".IndexOf ("CD", 6,  
StringComparison.CurrentCultureIgnoreCase)); // 8
```

Метод `LastIndexOf` похож на `IndexOf`, но перемещается по строке в обратном направлении.

Метод `IndexOfAny` возвращает позицию первого вхождения любого символа из множества символов:

```
Console.Write ("ab,cd ef".IndexOfAny (new char[] { ' ', ',' })); // 2  
Console.Write ("pas5w0rd".IndexOfAny ("0123456789".ToCharArray())); // 3
```

Метод `LastIndexOfAny` делает то же самое, но в обратном направлении.

Манипулирование строками

Поскольку класс `String` неизменяемый, все методы, которые “манипулируют” строкой, возвращают новую строку, оставляя исходную строку незатронутой (то же самое происходит при повторном присваивании строковой переменной). Метод `Substring` извлекает порцию строки:

```
string left3 = "12345".Substring (0, 3); // left3 = "123";  
string mid3 = "12345".Substring (1, 3); // mid3 = "234";
```

Если длина не указана, тогда извлекается порция до самого конца строки:

```
string end3 = "12345".Substring (2); // end3 = "345";
```

Методы `Insert` и `Remove` вставляют либо удаляют символы в указанной позиции:

```
string s1 = "helloworld".Insert (5, " "); // s1 = "hello, world"  
string s2 = s1.Remove (5, 2); // s2 = "helloworld";
```

Методы `PadLeft` и `PadRight` дополняют строку до указанной длины слева или справа заданным символом (или пробелом, если символ не указан):

```
Console.WriteLine ("12345".PadLeft (9, '*')); // *****12345  
Console.WriteLine ("12345".PadLeft (9)); // 12345
```

Если входная строка длиннее, чем длина для дополнения, тогда исходная строка возвращается без изменений.

Методы `TrimStart` и `TrimEnd` удаляют указанные символы из начала или конца строки; метод `Trim` делает то и другое. По умолчанию эти функции удаляют пробельные символы (включая пробелы, табуляции, символы новой строки и их вариации в Unicode):

```
Console.WriteLine (" abc \t\r\n ".Trim().Length); // 3
```

Метод `Replace` заменяет все (неперекрывающиеся) вхождения заданного символа или подстроки:

```
Console.WriteLine ("to be done".Replace (" ", " | ")); // to | be | done  
Console.WriteLine ("to be done".Replace (" ", "")); // tobedone
```

Методы `ToUpper` и `ToLower` возвращают версии входной строки в верхнем и нижнем регистре символов. По умолчанию они учитывают текущие языковые настройки у пользователя; методы `ToUpperInvariant` и `ToLowerInvariant` всегда применяют правила, принятые для английского алфавита.

Разделение и объединение строк

Метод `Split` разделяет строку на порции:

```
string[] words = "The quick brown fox".Split();
foreach (string word in words)
    Console.Write (word + "|");                                // The|quick|brown|fox|
```

По умолчанию в качестве разделителей метод `Split` использует пробельные символы; также имеется его перегруженная версия, принимающая массив `params` разделителей типа `char` или `string`. Кроме того, метод `Split` дополнительно принимает перечисление `StringSplitOptions`, в котором предусмотрен вариант для удаления пустых элементов: он полезен, когда слова в строке разделяются несколькими разделителями.

Статический метод `Join` выполняет действие, противоположное `Split`. Он требует указания разделителя и строкового массива:

```
string[] words = "The quick brown fox".Split();
string together = string.Join (" ", words);      // The quick brown fox
```

Статический метод `Concat` похож на `Join`, но принимает только строковый массив `params` и не задействует разделители. Метод `Concat` в точности эквивалентен операции `+` (на самом деле компилятор транслирует операцию `+` в вызов `Concat`):

```
string sentence      = string.Concat ("The", " quick", " brown", " fox");
string sameSentence = "The" + " quick" + " brown" + " fox";
```

Метод `string.Format` и смешанные форматные строки

Статический метод `Format` предлагает удобный способ для построения строк, которые содержат в себе переменные. Эти встроенные переменные (или значения) могут относиться к любому типу; метод `Format` просто вызывает на них `ToString`.

Главная строка, включающая встроенные переменные, называется *смешанной форматной строкой*. При вызове методу `string.Format` предоставляемая такая смешанная форматная строка, а за ней по очереди все встроенные переменные:

```
string composite = "It's {0} degrees in {1} on this {2} morning";
string s = string.Format (composite, 35, "Perth", DateTime.Now.DayOfWeek);
// s == "It's 35 degrees in Perth on this Friday morning"
```

Для получения тех же результатов можно применять интерполированные строковые литералы (см. раздел “Строковый тип” в главе 2). Достаточно просто предварить строку символом `$` и поместить выражения в фигурные скобки:

```
string s = $"It's hot this {DateTime.Now.DayOfWeek} morning";
```

Каждое число в фигурных скобках называется *форматным элементом*. Число соответствует позиции аргумента и за ним может дополнительно следовать:

- запятая и *минимальная ширина*;
- двоеточие и *форматная строка*.

Минимальная ширина удобна для выравнивания колонок. Если значение отрицательное, тогда данные выравниваются влево, а иначе — вправо. Например:

```
string composite = "Name={0,-20} Credit Limit={1,15:C}";
Console.WriteLine (string.Format (composite, "Mary", 500));
Console.WriteLine (string.Format (composite, "Elizabeth", 20000));
```

Вот как выглядит результат:

Name=Mary	Credit Limit=	\$500.00
Name=Elizabeth	Credit Limit=	\$20,000.00

Ниже приведен эквивалентный код, в котором метод `string.Format` не применяется:

```
string s = "Name=" + "Mary".PadRight (20) +
           " Credit Limit=" + 500.ToString ("C").PadLeft (15);
```

Значение кредитного лимита (`Credit Limit`) форматируется как денежное посредством форматной строки "`C`". Форматные строки более подробно рассматриваются в разделе “Форматирование и разбор” далее в главе.

Сравнение строк

При сравнении двух значений в .NET проводится различие между концепциями *сравнения эквивалентности* и *сравнения порядка*. Сравнение эквивалентности проверяет, являются ли два экземпляра семантически одинаковыми; сравнение порядка выясняет, какой из двух экземпляров (если есть) будет следовать первым в случае их расположения по возрастанию или убыванию.



Сравнение эквивалентности не является *подмножеством* сравнения порядка; две системы сравнения имеют разное предназначение. Вполне допустимо иметь, скажем, два неравных значения в одной и той же порядковой позиции. Мы продолжим данную тему в разделе “Сравнение эквивалентности” позже в главе.

Для сравнения эквивалентности строк можно использовать операцию `==` или один из методов `Equals` типа `string`. Последние более универсальны, потому что позволяют указывать такие варианты, как нечувствительность к регистру символов.



Другое отличие связано с тем, что операция `==` не работает надежно со строками, если переменные приведены к типу `object`. Мы объясним это в разделе “Сравнение эквивалентности” далее в главе.

Для сравнения порядка строк можно применять либо метод экземпляра `CompareTo`, либо статические методы `Compare` и `CompareOrdinal`: они возвращают положительное или отрицательное число либо ноль — в зависимости от того, находится первое значение до, после или рядом со вторым.

Прежде чем углубляться в детали каждого вида сравнения, необходимо изучить лежащие в основе .NET алгоритмы сравнения строк.

Ординальное сравнение или сравнение, чувствительное к культуре

При сравнении строк используются два базовых алгоритма: алгоритм *ординального сравнения* и алгоритм сравнения, *чувствительного к культуре*. В случае ординального сравнения символы интерпретируются просто как числа (согласно своим числовым кодам Unicode), а в случае сравнения, чувствительного к культуре, символы интерпретируются со ссылкой на конкретный словарь. Существуют две специальных культуры: "текущая культура", которая основана на настройках, получаемых из панели управления компьютера, и "инвариантная культура", которая является одной и той же на всех компьютерах (и полностью соответствует американской культуре).

Для сравнения эквивалентности удобны оба алгоритма. Однако при упорядочивании сравнение, чувствительное к культуре, почти всегда предпочтительнее: для алфавитного упорядочения строк необходим алфавит. Ординальное сравнение полагается на числовые коды Unicode, которые в силу сложившихся обстоятельств выстраивают английские символы в алфавитном порядке — но не в точности так, как можно было бы ожидать. Например, предполагая включенную чувствительность к регистру символов, рассмотрим строки "Atom", "atom" и "Zamia". В случае инвариантной культуры они располагаются в следующем порядке:

"Atom", "atom", "Zamia"

Тем не менее, при ординальном сравнении результат выглядит так:

"Atom", "Zamia", "atom"

Причина в том, что инвариантная культура инкапсулирует алфавит, в котором символы в верхнем регистре находятся рядом со своими двойниками в нижнем регистре (AaBbCcDd...). Но при ординальном сравнении сначала идут все символы в верхнем регистре, а затем — все символы в нижнем регистре (A...Z, a...z). В сущности, производится возврат к набору символов ASCII, появившемуся в 1960-х годах.

Сравнение эквивалентности для строк

Несмотря на ограничения ординального сравнения, операция `==` в типе `string` всегда выполняет *ординальное сравнение, чувствительное к регистру*. То же самое касается версии экземпляра метода `string.Equals` в случае вызова без параметров; это определяет "стандартное" поведение сравнения эквивалентности для типа `string`.



Алгоритм ординального сравнения выбран для функций операции `==` и `Equals` типа `string` из-за того, что он высокоеффективен и *детерминирован*. Сравнение эквивалентности строк считается фундаментальной операцией и выполняется гораздо чаще, чем сравнение порядка.

"Строгое" понятие эквивалентности также согласуется с общим применением операции `==`.

Следующие методы позволяют выполнять сравнение с учетом культуры или сравнение, нечувствительное к регистру:

```
public bool Equals (string value, StringComparison comparisonType);  
public static bool Equals (string a, string b,  
                           StringComparison comparisonType);
```

Статическая версия полезна тем, что она работает в случае, когда одна или обе строки равны null. Перечисление StringComparison определено так, как показано ниже:

```
public enum StringComparison  
{  
    CurrentCulture,                      // Чувствительное к регистру  
    CurrentCultureIgnoreCase,             // Чувствительное к регистру  
    InvariantCulture,                    // Чувствительное к регистру  
    InvariantCultureIgnoreCase,          // Чувствительное к регистру  
    Ordinal,                            // Чувствительное к регистру  
    OrdinalIgnoreCase  
}
```

Вот примеры:

```
Console.WriteLine (string.Equals ("foo", "FOO",  
                                 StringComparison.OrdinalIgnoreCase)); // True  
Console.WriteLine ("ÿ" == "Ӧ");                         // False  
Console.WriteLine (string.Equals ("Ӧ", "Ӧ",  
                                 StringComparison.CurrentCulture)); // ?
```

(Результат в третьем операторе определяется текущими настройками языка на компьютере.)

Сравнение порядка для строк

Метод экземпляра CompareTo типа string выполняет *чувствительное к культуре и регистру* сравнение порядка. В отличие от операции == метод CompareTo не использует ординальное сравнение: для упорядочивания намного более полезен алгоритм сравнения, чувствительного к культуре.

Вот определение метода CompareTo:

```
public int CompareTo (string strB);
```



Метод экземпляра CompareTo реализует обобщенный интерфейс IComparable, который является стандартным протоколом сравнения, повсеместно применяемым в библиотеках .NET. Это значит, что метод CompareTo типа string определяет строки со стандартным поведением упорядочивания в таких реализациях, как сортированные коллекции, например. За дополнительной информацией по IComparable обращайтесь в раздел “Сравнение порядка” далее в главе.

Для других видов сравнения можно вызывать статические методы Compare и CompareOrdinal:

```
public static int Compare (string strA, string strB,
                         StringComparison comparisonType);
public static int Compare (string strA, string strB, bool ignoreCase,
                         CultureInfo culture);
public static int Compare (string strA, string strB, bool ignoreCase);
public static int CompareOrdinal (string strA, string strB);
```

Последние два метода являются просто сокращениями для вызова первых двух методов. Все методы сравнения порядка возвращают положительное число, отрицательное число или ноль в зависимости от того, как расположено первое значение относительно второго — до, после или рядом:

```
Console.WriteLine ("Boston".CompareTo ("Austin"));           // 1
Console.WriteLine ("Boston".CompareTo ("Boston"));           // 0
Console.WriteLine ("Boston".CompareTo ("Chicago"));          // -1
Console.WriteLine ("ü".CompareTo ("Ü"));                     // 0
Console.WriteLine ("foo".CompareTo ("FOO"));                 // -1
```

В следующем операторе выполняется нечувствительное к регистру сравнение с использованием текущей культуры:

```
Console.WriteLine (string.Compare ("foo", "FOO", true));    // 0
```

Предоставляя объект `CultureInfo`, можно подключить любой алфавит:

```
// Класс CultureInfo определен в пространстве имен System.Globalization
CultureInfo german = CultureInfo.GetCultureInfo ("de-DE");
int i = string.Compare ("Müller", "Muller", false, german);
```

Класс `StringBuilder`

Класс `StringBuilder` (из пространства имен `System.Text`) представляет изменяемую (редактируемую) строку. С помощью `StringBuilder` можно добавлять (`Append`), вставлять (`Insert`), удалять (`Remove`) и заменять (`Replace`) подстроки, не заменяя целиком объект `StringBuilder`.

Конструктор `StringBuilder` дополнительно принимает начальное строковое значение, а также стартовый размер для внутренней емкости (по умолчанию 16 символов). Если начальная емкость превышена, тогда `StringBuilder` автоматически изменяет размеры своих внутренних структур (за счет небольшого снижения производительности) вплоть до максимальной емкости (которая по умолчанию составляет `int.MaxValue`).

Популярное применение класса `StringBuilder` связано с построением длинной строки путем повторяющихся вызовов `Append`. Такой подход намного более эффективен, чем выполнение множества конкатенаций обычных строковых типов:

```
StringBuilder sb = new StringBuilder();
for (int i = 0; i < 50; i++) sb.Append (i + ",");
```

Для получения финального результата необходимо вызвать метод `ToString`:

```
Console.WriteLine (sb.ToString());
0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,
27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,
```

Метод AppendLine выполняет добавление последовательности новой строки ("\\r\\n" в Windows). Он принимает смешанную форматную строку в точности как метод String.Format.

Помимо методов Insert, Remove и Replace (метод Replace функционирует подобно методу Replace в типе string) в классе StringBuilder определено свойство Length и записываемый индексатор для получения/установки отдельных символов.

Для очистки содержимого StringBuilder необходимо либо создать новый экземпляр StringBuilder, либо установить его свойство Length в 0.



Установка свойства Length экземпляра StringBuilder в 0 не сокращает его внутреннюю емкость. Таким образом, если экземпляр StringBuilder ранее содержал один миллион символов, то после обнуления его свойства Length он продолжит занимать около 2 Мбайт памяти. Чтобы освободить эту память, потребуется создать новый экземпляр StringBuilder и дать возможность старому покинуть область видимости (и подвергнуться сборке мусора).

Кодировка текста и Unicode

Набор символов — это распределение символов, с каждым из которых связан числовой код или *кодовая точка* (code point). Чаще всего используются два набора символов: Unicode и ASCII. Набор Unicode имеет адресное пространство для примерно миллиона символов, из которых в настоящее время распределено около 100 000. Набор Unicode охватывает самые распространенные в мире языки, а также ряд исторических языков и специальных символов. Набор ASCII — это просто первые 128 символов набора Unicode, которые покрывают большинство из того, что можно видеть на английской клавиатуре. Набор ASCII появился на 30 лет раньше Unicode и продолжает временами применяться из-за своей простоты и эффективности: каждый его символ представлен одним байтом.

Система типов .NET предназначена для работы с набором символов Unicode. Тем не менее, набор ASCII поддерживается неявно в силу того, что является подмножеством Unicode.

Кодировка текста отображает числовые кодовые точки символов на их двоичные представления. В .NET кодировки текста вступают в игру главным образом при работе с текстовыми файлами или потоками. Когда текстовый файл читается с помещением в строку, *кодировщик текста* транслирует данные файла из двоичного представления во внутреннее представление Unicode, которое ожидают типы char и string. Кодировка текста может ограничивать множество представляемых символов, а также влиять на эффективность хранения.

В .NET есть две категории кодировок текста:

- кодировки, которые отображают символы Unicode на другой набор символов;
- кодировки, которые используют стандартные схемы кодирования Unicode.

Первая категория содержит унаследованные кодировки, такие как IBM EBCDIC и 8-битные наборы символов с расширенными символами в области из 128 старших символов, которые были популярны до появления Unicode (они идентифицируются кодовой страницей). Кодировка ASCII тоже относится к данной категории: она кодирует первые 128 символов и отбрасывает остальные. Вдобавок эта категория содержит *традиционную* кодировку GB18030 — обязательный стандарт для приложений, которые написаны в Китае (или предназначены для продажи в Китае), начиная с 2000 года.

Во второй категории находятся кодировки UTF-8, UTF-16 и UTF-32 (и устаревшая UTF-7). Каждая из них отличается требованиями к пространству. Кодировка UTF-8 наиболее эффективна с точки зрения пространства для большинства видов текста: при представлении каждого символа в ней применяется от одного до четырех байтов. Первые 128 символов требуют только одного байта, делая эту кодировку совместимой с ASCII. Кодировка UTF-8 чаще всего используется в текстовых файлах и потоках (особенно в Интернете), к тому же она стандартно применяется для потокового ввода-вывода в .NET (фактически она является стандартом почти для всего, что неявно использует кодировку).

Кодировка UTF-16 для представления каждого символа применяет одно или два 16-битных слова и используется внутри .NET для представления символов и строк. Некоторые программы также записывают файлы в UTF-16.

Кодировка UTF-32 наименее экономична в плане пространства: она отображает каждую кодовую точку на 32 бита, т.е. любой символ потребляет четыре байта. По указанной причине кодировка UTF-32 применяется редко. Однако она существенно упрощает произвольный доступ, поскольку каждый символ занимает одинаковое количество байтов.

Получение объекта Encoding

Класс Encoding в пространстве имен System.Text — это общий базовый класс для классов, инкапсулирующих кодировки текста. Существует несколько подклассов, назначение которых заключается в инкапсуляции семейств кодировок с похожими возможностями. Наиболее распространенные кодировки также могут быть получены через выделенные статические свойства класса Encoding:

Название кодировки	Статическое свойство класса Encoding
UTF-8	Encoding.UTF8
UTF-16	Encoding.Unicode (не UTF16)
UTF-32	Encoding.UTF32
ASCII	Encoding.ASCII

Другие кодировки можно получить с помощью вызова метода Encoding.GetEncoding со стандартным именем набора символов IANA (Internet Assigned Numbers Authority — Комитет по цифровым адресам в Интернете):

```
// В .NET 5+ и .NET Core сначала должен быть вызван метод RegisterProvider:  
Encoding.RegisterProvider (CodePagesEncodingProvider.Instance);  
Encoding chinese = Encoding.GetEncoding ("GB18030");
```

Статический метод `GetEncodings` возвращает список всех поддерживаемых кодировок с их стандартными именами IANA:

```
foreach (EncodingInfo info in Encoding.GetEncodings())
    Console.WriteLine (info.Name);
```

Другой способ получения кодировки предполагает создание экземпляра класса кодировки напрямую. В таком случае появляется возможность устанавливать различные варианты через аргументы конструктора, включая описанные ниже.

- Должно ли генерироваться исключение, если при декодировании встречается недопустимая последовательность байтов. По умолчанию исключение не генерируется.
- Должно ли производиться кодирование/декодирование UTF-16/UTF-32 с наиболее значащими байтами в начале (*обратный порядок байтов*) или с наименее значащими байтами в начале (*прямой порядок байтов*). По умолчанию принимается прямой порядок байтов, который является стандартом в операционной системе Windows.
- Должен ли выдаваться маркер порядка байтов (префикс, указывающий конкретный *порядок следования байтов*).

Кодировка для файлового и потокового ввода-вывода

Самое распространенное использование объекта `Encoding` связано с управлением способом чтения и записи в файл или поток. Например, следующий код записывает строку "Testing..." в файл по имени `data.txt` с кодировкой UTF-16:

```
System.IO.File.WriteAllText ("data.txt", "Testing...", Encoding.Unicode);
```

Если опустить последний аргумент, тогда метод `WriteAllText` применит вездесущую кодировку UTF-8.



UTF-8 является стандартной кодировкой текста для всего файлового и потокового ввода-вывода.

Мы еще вернемся к данной теме в разделе "Адаптеры потоков" главы 15.

Кодировка для байтовых массивов

Объект `Encoding` можно также использовать для работы с байтовым массивом. Метод `GetBytes` преобразует `string` в `byte[]` с применением заданной кодировки, а метод `GetString` преобразует `byte[]` в `string`:

```
byte[] utf8Bytes = System.Text.Encoding.UTF8.GetBytes ("0123456789");
byte[] utf16Bytes = System.Text.Encoding.Unicode.GetBytes ("0123456789");
byte[] utf32Bytes = System.Text.Encoding.UTF32.GetBytes ("0123456789");

Console.WriteLine (utf8Bytes.Length); // 10
Console.WriteLine (utf16Bytes.Length); // 20
Console.WriteLine (utf32Bytes.Length); // 40

string original1 = System.Text.Encoding.UTF8.GetString (utf8Bytes);
string original2 = System.Text.Encoding.Unicode.GetString (utf16Bytes);
string original3 = System.Text.Encoding.UTF32.GetString (utf32Bytes);
```

```
Console.WriteLine (original1);          // 0123456789
Console.WriteLine (original2);          // 0123456789
Console.WriteLine (original3);          // 0123456789
```

UTF-16 и суррогатные пары

Вспомните, что символы и строки в .NET хранятся в кодировке UTF-16. Поскольку UTF-16 требует одного или двух 16-битных слов на символ, а тип `char` имеет длину только 16 бит, то некоторые символы Unicode требуют для своего представления два экземпляра `char`. Отсюда пара следствий:

- свойство `Length` строки может иметь более высокое значение, чем фактическое количество символов;
- одиночного символа `char` не всегда достаточно для полного представления символа Unicode.

Большинство приложений игнорируют указанные следствия, потому что почти все часто используемые символы попадают внутрь раздела Unicode, который называется *базовой многоязыковой плоскостью* (Basic Multilingual Plane — BMP) и требует только одного 16-битного слова в UTF-16. Плоскость BMP охватывает десятки мировых языков и включает свыше 30 000 китайских иероглифов. Исключениями являются символы ряда древних языков, символы для записи музыкальных произведений и некоторые менее распространенные китайские иероглифы.

Если необходимо поддерживать символы из двух слов, то следующие статические методы в `char` преобразуют 32-битную кодовую точку в строку из двух `char` и наоборот:

```
string ConvertFromUtf32 (int utf32)
int    ConvertToUtf32  (char highSurrogate, char lowSurrogate)
```

Символы из двух слов называются *суррогатными*. Их легко обнаружить, поскольку каждое слово находится в диапазоне от 0xD800 до 0xFFFF. Для помощи в этом можно воспользоваться следующими статическими методами в `char`:

```
bool IsSurrogate      (char c)
bool IsHighSurrogate (char c)
bool IsLowSurrogate  (char c)
bool IsSurrogatePair (char highSurrogate, char lowSurrogate)
```

Класс `StringInfo` из пространства имен `System.Globalization` также предлагает ряд методов и свойств для работы с символами из двух слов.

Символы за пределами плоскости BMP обычно требуют специальных шрифтов и имеют ограниченную поддержку в операционных системах.

Дата и время

За работу по представлению даты и времени отвечают следующие неизменяемые структуры из пространства имен `System`:

```
DateTime, DateTimeOffset, TimeSpan, DateOnly, TimeOnly
```

В языке C# отсутствуют специальные ключевые слова, которые отображались бы на указанные типы.

Структура TimeSpan

Структура TimeSpan представляет временной интервал или время суток. В последней роли это просто “часы” (не имеющие даты), которые эквивалентны времени, прошедшему с полуночи, в предположении, что нет перехода на летнее время. Разрешающая способность TimeSpan составляет 100 нс, максимальное значение примерно соответствует 10 млн дней, а значение может быть положительным или отрицательным.

Есть три способа конструирования TimeSpan:

- с помощью одного из конструкторов;
- путем вызова одного из статических методов From...;
- за счет вычитания одного экземпляра DateTime из другого.

Ниже перечислены доступные конструкторы:

```
public TimeSpan (int hours, int minutes, int seconds);
public TimeSpan (int days, int hours, int minutes, int seconds);
public TimeSpan (int days, int hours, int minutes, int seconds,
                 int milliseconds);
public TimeSpan (int days, int hours, int minutes, int seconds,
                 int milliseconds, int microseconds);
public TimeSpan (long ticks); // Каждый тик равен 100 нс
```

Статические методы From... более удобны, когда необходимо указать интервал в каких-то одних единицах, скажем, минутах, часах и т.д.:

```
public static TimeSpan FromDays (double value);
public static TimeSpan FromHours (double value);
public static TimeSpan FromMinutes (double value);
public static TimeSpan FromSeconds (double value);
public static TimeSpan FromMilliseconds (double value);
public static TimeSpan FromMicroseconds (double value);
```

Например:

```
Console.WriteLine (new TimeSpan (2, 30, 0)); // 02:30:00
Console.WriteLine (TimeSpan.FromHours (2.5)); // 02:30:00
Console.WriteLine (TimeSpan.FromHours (-2.5)); // -02:30:00
```

В структуре TimeSpan перегружены операции < и >, а также операции + и -. В результате вычисления приведенного ниже выражения получается значение TimeSpan, соответствующее 2,5 часам:

```
TimeSpan.FromHours (2) + TimeSpan.FromMinutes (30);
```

Следующее выражение дает в результате значение, которое на одну секунду короче 10 дней:

```
TimeSpan.FromDays (10) - TimeSpan.FromSeconds (1); // 9.23:59:59
```

С помощью приведенного ниже выражения можно проиллюстрировать работу целочисленных свойств Days, Hours, Minutes, Seconds и Milliseconds:

```
TimeSpan nearlyTenDays = TimeSpan.FromDays (10) - TimeSpan.FromSeconds (1);
Console.WriteLine (nearlyTenDays.Days); // 9
```

```
Console.WriteLine (nearlyTenDays.Hours); // 23
Console.WriteLine (nearlyTenDays.Minutes); // 59
Console.WriteLine (nearlyTenDays.Seconds); // 59
Console.WriteLine (nearlyTenDays.Milliseconds); // 0
```

Напротив, свойства Total... возвращают значения типа double, описывающие промежуток времени целиком:

```
Console.WriteLine (nearlyTenDays.TotalDays); // 9.99998842592593
Console.WriteLine (nearlyTenDays.TotalHours); // 239.9997222222222
Console.WriteLine (nearlyTenDays.TotalMinutes); // 14399.98333333333
Console.WriteLine (nearlyTenDays.TotalSeconds); // 863999
Console.WriteLine (nearlyTenDays.TotalMilliseconds); // 863999000
```

Статический метод Parse представляет собой противоположность ToString, преобразуя строку в значение TimeSpan. Метод TryParse делает то же самое, но в случае неудачного преобразования возвращает false вместо генерации исключения. Класс XmlConvert также предоставляет методы для преобразования между TimeSpan и string, которые следуют стандартным протоколам форматирования XML.

Стандартным значением для TimeSpan является TimeSpan.Zero.

Структуру TimeSpan также можно применять для представления времени суток (времени, прошедшего с полуночи). Для получения текущего времени суток необходимо обратиться к свойству DateTime.Now.TimeOfDay.

Структуры DateTime и DateTimeOffset

Типы DateTime и DateTimeOffset — это неизменяемые структуры для представления даты и дополнительно времени. Их разрешающая способность составляет 100 нс, а поддерживаемый диапазон лет — от 0001 до 9999.

Структура DateTimeOffset функционально похожа на DateTime. Ее отличительной особенностью является сохранение также смещения UTC (Coordinated Universal Time — универсальное глобальное время), что позволяет получать более осмысленные результаты при сравнении значений из разных часовых поясов.

Выбор между DateTime и DateTimeOffset

Структуры DateTime и DateTimeOffset отличаются способом обработки часовых поясов. Структура DateTime содержит флаг с тремя состояниями, который указывает, относительно чего отсчитывается значение DateTime:

- местное время на текущем компьютере;
- UTC (современный эквивалент среднего времени по Гринвичу (Greenwich Mean Time));
- не определено.

Структура DateTimeOffset более специфична — она хранит смещение UTC в виде TimeSpan:

July 01 2019 03:00:00 -06:00

Это влияет на сравнения эквивалентности, которые являются главным фактором при выборе между `DateTime` и `DateTimeOffset`. В частности:

- во время сравнения `DateTime` игнорирует флаг с тремя состояниями и считает, что два значения равны, если они имеют одинаковый год, месяц, день, часы, минуты и т.д.;
- структура `DateTimeOffset` считает два значения равными, если они *ссылаются на ту же самую точку во времени*.



Переход на летнее время может сделать указанные различия важными, даже если приложение не нуждается в учете множества географических часовых поясов.

Таким образом, `DateTime` считает следующие два значения отличающимися, тогда как `DateTimeOffset` — равными:

`July 01 2019 09:00:00 +00:00 (GMT)`

`July 01 2019 03:00:00 -06:00 (местное время, Центральная Америка)`

В большинстве случаев логика эквивалентности `DateTimeOffset` предпочтительнее. Скажем, при выяснении, какое из двух международных событий произошло позже, структура `DateTimeOffset` даст полностью корректный ответ. Аналогично хакер, планирующий атаку типа распределенного отказа в обслуживании, определенно выберет `DateTimeOffset`! Чтобы сделать то же самое с помощью `DateTime`, в приложении потребуется повсеместное приведение к единому часовому поясу (обычно UTC). Такой подход проблематичен по двум причинам.

- Для обеспечения дружественности к конечному пользователю UTC-значения `DateTime` перед форматированием требуют явного преобразования в местное время.
- Довольно легко забыть и случайно воспользоваться местным значением `DateTime`.

Однако структура `DateTime` лучше при указании значения относительно локального компьютера во время выполнения — например, если нужно запланировать архивацию в каждом международном офисе на следующее воскресенье в 3 утра местного времени (когда наблюдается минимальная активность). В такой ситуации больше подойдет структура `DateTime`, т.к. она будет отражать местное время на каждой площадке.



Внутренне структура `DateTimeOffset` для хранения смещения UTC в минутах применяет короткий целочисленный тип. Она не хранит никакой региональной информации, так что ничего не указывает на то, к какому времени относится смещение +08:00, например, в Сингапуре или в Перте (Западная Австралия).

Мы рассмотрим часовые пояса и сравнение эквивалентности более подробно в разделе “Даты и часовые пояса” далее в главе.



В SQL Server 2008 была введена прямая поддержка `DateTimeOffset` через новый тип данных с таким же именем.

Конструирование `DateTime`

В структуре `DateTime` определены конструкторы, которые принимают целочисленные значения для года, месяца и дня, а также дополнительно для часов, минут, секунд, миллисекунд и микросекунд (начиная с версии .NET 7):

```
public DateTime (int year, int month, int day);
public DateTime (int year, int month, int day,
                 int hour, int minute, int second, int millisecond);
```

Если указывается только дата, то время неявно устанавливается в полночь (0:00). Конструкторы `DateTime` также позволяют задавать `DateTimeKind` — перечисление со следующими значениями:

`Unspecified`, `Local`, `Utc`

Оно соответствует флагу с тремя состояниями, который был описан в предыдущем разделе. `Unspecified` принимается по умолчанию и означает, что `DateTime` не зависит от часового пояса. `Local` означает отношение к местному часовому поясу, установленному на текущем компьютере. Такой экземпляр `DateTime` не содержит информации о *конкретном часовом поясе* и в отличие от `DateTimeOffset` не хранит числовое смещение UTC.

Свойство `Kind` в `DateTime` возвращает значение `DateTimeKind`.

Конструкторы `DateTime` также перегружены с целью приема объекта `Calendar`, что позволяет указывать дату с использованием подклассов `Calendar`, которые определены в пространстве имен `System.Globalization`:

```
DateTime d =
    new DateTime(5767, 1, 1, new System.Globalization.HebrewCalendar());
Console.WriteLine (d); // 12/12/2006 12:00:00 AM
```

(Форматирование даты в этом примере зависит от настроек в панели управления на компьютере.) Структура `DateTime` всегда работает со стандартным григорианским календарем — в приведенном примере во время конструирования происходит однократное преобразование. Для выполнения вычислений с применением другого календаря вы должны применять методы на самом подклассе `Calendar`.

Конструировать экземпляр `DateTime` можно также с единственным значением *тиков* типа `long`, где *тики* представляют собой количество 100 наносекундных интервалов, прошедших с полуночи 01/01/0001.

Для целей взаимодействия `DateTime` предоставляет статические методы `FromFileTime` и `FromFileTimeUtc`, которые обеспечивают преобразование времени файлов Windows (указанного как `long`), и статический метод `FromOADate`, преобразующий дату/время OLE Automation (типа `double`).

Чтобы сконструировать экземпляр `DateTime` из строки, понадобится вызвать статический метод `Parse` или `ParseExact`. Оба метода принимают дополнительные флаги и поставщики форматов; `ParseExact` также принимает форматную строку. Мы обсудим разбор более детально в разделе “Форматирование и разбор” далее в главе.

Конструирование DateTimeOffset

Структура `DateTimeOffset` имеет похожий набор конструкторов. Отличие в том, что также указывается смещение UTC в виде `TimeSpan`:

```
public DateTimeOffset (int year, int month, int day,
                      int hour, int minute, int second,
                      TimeSpan offset);

public DateTimeOffset (int year, int month, int day,
                      int hour, int minute, int second, int millisecond,
                      TimeSpan offset);
```

Значение `TimeSpan` должно составлять целое количество минут, иначе генерируется исключение.

В добавок структура `DateTimeOffset` имеет конструкторы, которые принимают объект `Calendar` и значение `тиков` типа `long`, а также статические методы `Parse` и `ParseExact`, принимающие строку.

Конструировать экземпляр `DateTimeOffset` можно из существующего экземпляра `DateTime` либо с использованием перечисленных ниже конструктоeв:

```
public DateTimeOffset (DateTime dateTime);
public DateTimeOffset (DateTime dateTime, TimeSpan offset);
```

либо с помощью неявного приведения:

```
DateTimeOffset dt = new DateTime (2000, 2, 3);
```



Неявное приведение `DateTime` к `DateTimeOffset` удобно тем, что в большей части библиотеки .NET BCL поддерживается тип `DateTime` — не `DateTimeOffset`.

Если смещение не указано, тогда оно выводится из значения `DateTime` с применением следующих правил:

- если `DateTime` имеет значение `DateTimeKind`, равное `Utc`, то смещение равно нулю;
- если `DateTime` имеет значение `DateTimeKind`, равное `Local` или `Unspecified` (по умолчанию), то смещение берется из текущего часовогo пояса.

Для преобразования в другом направлении структура `DateTimeOffset` предлагает три свойства, которые возвращают значения типа `DateTime`:

- свойство `UtcDateTime` возвращает экземпляр `DateTime`, представленный как время UTC;
- свойство `LocalDateTime` возвращает экземпляр `DateTime` в текущем часовом поясе (при необходимости преобразованный);
- свойство `DateTime` возвращает экземпляр `DateTime` в любом часовом поясе, который был указан, со свойством `Kind`, равным `Unspecified` (т.е. возвращает время UTC плюс смещение).

Текущие значения `DateTime/DateTimeOffset`

Обе структуры `DateTime` и `DateTimeOffset` имеют статическое свойство `Now`, которое возвращает текущую дату и время:

```
Console.WriteLine (DateTime.Now);           // 11/11/2019 1:23:45 PM  
Console.WriteLine (DateTimeOffset.Now);     // 11/11/2019 1:23:45 PM -06:00
```

Структура `DateTime` также предоставляет свойство `Today`, возвращающее порцию даты:

```
Console.WriteLine (DateTime.Today);         // 11/11/2019 12:00:00 AM
```

Статическое свойство `UtcNow` возвращает текущую дату и время в UTC:

```
Console.WriteLine (DateTime.UtcNow);        // 11/11/2019 7:23:45 AM  
Console.WriteLine (DateTimeOffset.UtcNow);    // 11/11/2019 7:23:45 AM +00:00
```

Точность всех этих методов зависит от операционной системы и обычно находится в пределах 10–20 мс.

Работа с датой и временем

Структуры `DateTime` и `DateTimeOffset` предлагают похожий набор свойств экземпляра, которые возвращают элементы даты/времени:

```
DateTime dt = new DateTime (2000, 2, 3,  
                           10, 20, 30);  
  
Console.WriteLine (dt.Year);                // 2000  
Console.WriteLine (dt.Month);               // 2  
Console.WriteLine (dt.Day);                 // 3  
Console.WriteLine (dt.DayOfWeek);          // Thursday  
Console.WriteLine (dt.DayOfYear);           // 34  
  
Console.WriteLine (dt.Hour);                // 10  
Console.WriteLine (dt.Minute);              // 20  
Console.WriteLine (dt.Second);              // 30  
Console.WriteLine (dt.Millisecond);         // 0  
Console.WriteLine (dt.Ticks);               // 630851700300000000  
Console.WriteLine (dt.TimeOfDay);           // 10:20:30 (возвращает TimeSpan)
```

Структура `DateTimeOffset` также имеет свойство `Offset` типа `TimeSpan`.

Оба типа предоставляют указанные ниже методы экземпляра, которые предназначены для выполнения вычислений (большинство из них принимают аргумент типа `double` или `int`):

```
AddYears, AddMonths, AddDays,  
AddHours, AddMinutes, AddSeconds, AddMilliseconds, AddTicks
```

Все они возвращают новый экземпляр `DateTime` или `DateTimeOffset` и учитывают такие аспекты, как високосный год. Для вычитания можно передавать отрицательное значение.

Метод `Add` добавляет `TimeSpan` к `DateTime` или `DateTimeOffset`. Операция `+` перегружена для выполнения той же работы:

```
TimeSpan ts = TimeSpan.FromMinutes (90);  
Console.WriteLine (dt.Add (ts));  
Console.WriteLine (dt + ts);                // то же, что и выше
```

Можно также вычитать `TimeSpan` из `DateTime/DateTimeOffset` и вычитать один экземпляр `DateTime/DateTimeOffset` из другого. Последнее действие дает в результате `TimeSpan`:

```
DateTime thisYear = new DateTime (2015, 1, 1);
DateTime nextYear = thisYear.AddYears (1);
TimeSpan oneYear = nextYear - thisYear;
```

Форматирование и разбор даты и времени

Вызов метода `ToString` на экземпляре `DateTime` обеспечивает форматирование результата в виде *краткой даты* (все числа), за которой следует *полное время* (включающее секунды). Например:

11/11/2019 11:50:30 AM

По умолчанию панель управления операционной системы определяет аспекты вроде того, что должно указываться первым — день, месяц или год, должны ли использоваться ведущие нули и какой формат суток применяется (12- или 24-часовой).

Вызов метода `ToString` на `DateTimeOffset` дает то же самое, но в добавок возвращает и смещение:

11/11/2019 11:50:30 AM -06:00

Методы `ToShortDateString` и `ToLongDateString` возвращают только часть, касающуюся даты. Формат полной даты также определяется в панели управления; примером может служить “Monday, 11 November 2019”. Методы `ToShortTimeString` и `ToLongTimeString` возвращают только часть, касающуюся времени, скажем, 17:10:10 (`ToShortTimeString` не включает секунды).

Четыре только что описанных метода в действительности являются сокращениями для четырех разных *форматных строк*. Метод `ToString` перегружен для приема форматной строки и поставщика, позволяя указывать широкий диапазон вариантов и управлять применением региональных настроек. Мы рассмотрим эти методы более подробно в разделе “Форматирование и разбор” далее в главе.



Значения `DateTime` и `DateTimeOffset` могут быть некорректно разобраны, если текущие настройки культуры отличаются от настроек, использованных при форматировании. Такой проблемы можно избежать, применяя метод `ToString` вместе с форматной строкой, которая игнорирует настройки культуры (скажем, “o”):

```
DateTime dt1 = DateTime.Now;
string cannotBeMisparsed = dt1.ToString ("o");
DateTime dt2 = DateTime.Parse (cannotBeMisparsed);
```

Статические методы `Parse/TryParse` и `ParseExact/TryParseExact` выполняют действие, противоположное методу `ToString` — преобразуют строку в `DateTime` или в `DateTimeOffset`. Данные методы также имеют перегруженные версии, которые принимают поставщик формата. Вместо генерации исключения `FormatException` методы `Try...` возвращают значение `false`.

Значения `DateTime` и `DateTimeOffset`, равные `null`

Поскольку `DateTime` и `DateTimeOffset` являются структурами, они по своей сути не способны принимать значение `null`. Когда требуется возможность иметь значение `null`, существуют два способа добиться цели:

- использовать тип, допускающий `null` (т.е. `DateTime?` или `DateTimeOffset?`);
- применять статическое поле `DateTime.MinValue` или `DateTimeOffset.MinValue` (*стандартные значения для этих типов*).

Использование типов, допускающих `null`, обычно является более предпочтительным подходом, поскольку в таком случае компилятор помогает предотвращать ошибки. Поле `DateTime.MinValue` полезно для обеспечения обратной совместимости с кодом, написанным до выхода версии C# 2.0 (где появились типы, допускающие `null`).



Вызов метода `ToUniversalTime` или `ToLocalTime` на `DateTime.MinValue` может дать в результате значение, не являющееся `DateTime.MinValue` (в зависимости от того, по какую сторону от Гринвича вы находитесь). Если вы находитесь прямо на Гринвиче (Англия в период, когда летнее время не действует), то данная проблема не возникает, потому что местное время и UTC совпадают. Считайте это компенсацией за английскую зиму.

Структуры `DateOnly` и `TimeOnly`

Структуры `DateOnly` и `TimeOnly` (появившиеся в .NET 6) необходимы, когда нужно представлять *только* дату или время.

Структура `DateOnly` похожа на `DateTime`, но без компонента времени. Кроме того, структура `DateOnly` не содержит значение перечисления `DateTimeKind`; по существу оно всегда равно `Unspecified`, а концепции `Local` или `Utc` отсутствуют. Исторически в качестве альтернативы `DateOnly` применялась структура `DateTime` с нулевым временем (полночь). Трудность такого подхода заключается в том, что сравнения на эквивалентность терпят неудачу при появлении ненулевого времени.

Структура `TimeOnly` аналогична `DateTime`, но без компонента даты. Она предназначена для регистрации времени суток и подходит для таких приложений, как фиксация времени будильника или часов работы.

Даты и часовые пояса

В данном разделе мы более детально исследуем влияние часовых поясов на типы `DateTime` и `DateTimeOffset`. Мы также рассмотрим типы `TimeZone` и `TimeZoneInfo`, которые предоставляют информацию по смещениям часовых поясов и переходу на летнее время.

Структура DateTime и часовые пояса

Структура DateTime обрабатывает часовые пояса упрощенным образом. Внутренне DateTime состоит из двух порций информации:

- 62-битное число, которое указывает количество тиков, прошедших с момента 1/1/0001;
- 2-битное значение перечисления DateTimeKind (Unspecified, Local или Utc).

При сравнении двух экземпляров DateTime сравниваются только их значения тиков, а значения DateTimeKind игнорируются:

```
DateTime dt1 = new DateTime (2000, 1, 1, 10, 20, 30, DateTimeKind.Local);
DateTime dt2 = new DateTime (2000, 1, 1, 10, 20, 30, DateTimeKind.Utc);
Console.WriteLine (dt1 == dt2);                                // True
DateTime local = DateTime.Now;
DateTime utc = local.ToUniversalTime();
Console.WriteLine (local == utc);                            // False
```

Методы экземпляра ToUniversalTime/ToLocalTime выполняют преобразование в универсальное/местное время. Они применяют текущие настройки часового пояса компьютера и возвращают новый экземпляр DateTime со значением DateTimeKind, равным Utc или Local. При вызове ToUniversalTime на экземпляре DateTime, уже являющемся Utc, или ToLocalTime на экземпляре DateTime, который уже представляет собой Local, никакие преобразования не выполняются. Тем не менее, в случае вызова ToUniversalTime или ToLocalTime на экземпляре DateTime, являющемся Unspecified, преобразование произойдет.

С помощью статического метода DateTime.SpecifyKind можно конструировать экземпляр DateTime, который будет отличаться от других только значением поля Kind:

```
DateTime d = new DateTime (2020, 12, 12);    // Unspecified
DateTime utc = DateTime.SpecifyKind (d, DateTimeKind.Utc);
Console.WriteLine (utc);                      // 12/12/2020 12:00:00 AM
```

Структура DateTimeOffset и часовые пояса

Структура DateTimeOffset внутри содержит поле DateTime, значение которого всегда представлено как UTC, и 16-битное целочисленное поле Offset для смещения UTC, выраженного в минутах. Операции сравнения имеют дело только с полем DateTime (UTC); поле Offset используется главным образом для формирования.

Методы ToUniversalTime/ToLocalTime возвращают экземпляр DateTimeOffset, представляющий один и тот же момент времени, но в UTC или местном времени. В отличие от DateTime эти методы не воздействуют на лежащее в основе значение даты/времени, а только на смещение:

```
DateTimeOffset local = DateTimeOffset.Now;
DateTimeOffset utc = local.ToUniversalTime();
Console.WriteLine (local.Offset);                  // -06:00:00 (в Центральной Америке)
```

```
Console.WriteLine (utc.Offset);           // 00:00:00
Console.WriteLine (local == utc);          // True
```

Чтобы включить в сравнение поле `Offset`, необходимо применить метод `EqualsExact`:

```
Console.WriteLine (local.EqualsExact (utc)); // False
```

Класс `TimeZoneInfo`

Класс `TimeZoneInfo` предоставляет информацию, касающуюся названий часовых поясов, смещений UTC и правил перехода на летнее время.

Класс `TimeZone`

Статический метод `TimeZone.CurrentCulture` возвращает объект `TimeZone`:

```
TimeZone zone = TimeZone.CurrentCulture;
Console.WriteLine (zone.StandardName); // Pacific Standard Time
                                         // (стандартное тихоокеанское время)
Console.WriteLine (zone.DaylightName); // Pacific Daylight Time (летнее
                                         // тихоокеанское время)
```

Метод `GetDaylightChanges` возвращает специфичную информацию о летнем времени для заданного года:

```
DaylightTime day = zone.GetDaylightChanges (2019);
Console.WriteLine (day.Start.ToString ("M")); // 10 March
Console.WriteLine (day.End.ToString ("M")); // 03 November
Console.WriteLine (day.Delta); // 01:00:00
```

Класс `TimeZoneInfo`

Статический метод `TimeZoneInfo.Local` возвращает объект `TimeZoneInfo`, основанный на текущих местных настройках. Ниже показаны результаты, которые получены для Калифорнии:

```
TimeZoneInfo zone = TimeZoneInfo.Local;
Console.WriteLine (zone.StandardName); // Pacific Standard Time
                                         // (стандартное тихоокеанское время)
Console.WriteLine (zone.DaylightName); // Pacific Daylight Time
                                         // (летнее тихоокеанское время)
```

Методы `IsDaylightSavingTime` и `GetUtcOffset` работают следующим образом:

```
DateTime dt1 = new DateTime (2019, 1, 1); // DateTimeKindOffset тоже работает
DateTime dt2 = new DateTime (2019, 6, 1);
Console.WriteLine (zone.IsDaylightSavingTime (dt1)); // True
Console.WriteLine (zone.IsDaylightSavingTime (dt2)); // False
Console.WriteLine (zone.GetUtcOffset (dt1)); // -08:00:00
Console.WriteLine (zone.GetUtcOffset (dt2)); // -07:00:00
```

Вызвав метод `FindSystemTimeZoneById` с идентификатором пояса, можно получить объект `TimeZoneInfo` для любого часового пояса в мире. Мы переключимся на Западную Австралию по причинам, которые вскоре станут ясны:

```
TimeZoneInfo wa = TimeZoneInfo.FindSystemTimeZoneById
    ("W. Australia Standard Time");
Console.WriteLine (wa.Id);           // W. Australia Standard Time
                                    // (стандартное время Западной Австралии)
Console.WriteLine (wa.DisplayName); // (GMT+08:00) Perth ((GMT+08:00) Перт)
Console.WriteLine (wa.BaseUtcOffset); // 08:00:00
Console.WriteLine (wa.SupportsDaylightSavingTime); // True
```

Свойство `Id` соответствует значению, которое передано методу `FindSystemTimeZoneById`. Статический метод `GetSystemTimeZones` возвращает все часовые пояса мира; следовательно, можно вывести список всех допустимых идентификаторов поясов:

```
foreach (TimeZoneInfo z in TimeZoneInfo.GetSystemTimeZones ())
    Console.WriteLine (z.Id);
```



Можно также создать специальный часовой пояс, вызвав метод `TimeZoneInfo.CreateCustomTimeZone`. Поскольку класс `TimeZoneInfo` неизменяемый, данному методу должны передаваться все существенные данные в качестве аргументов.

С помощью вызова метода `ToSerializedString` можно сериализовать предопределенный или специальный часовой пояс в (почти) читабельную для человека строку, а посредством вызова метода `TimeZoneInfo.FromSerializedString` десериализовать ее.

Статический метод `ConvertTime` преобразует экземпляр `DateTime` или `DateTimeOffset` из одного часового пояса в другой. Можно включить либо только целевой объект `TimeZoneInfo`, либо исходный и целевой объекты `TimeZoneInfo`. С помощью методов `ConvertTimeFromUtc` и `ConvertTimeToUtc` можно также выполнять преобразование прямо из времени UTC или в него.

Для работы с летним временем `TimeZoneInfo` предоставляет перечисленные ниже дополнительные методы.

- `IsInvalidTime` возвращает `true`, если значение `DateTime` находится в пределах часа (или дельты), который будет пропущен, когда часы переводятся вперед.
- `IsAmbiguousTime` возвращает `true`, если `DateTime` или `DateTimeOffset` находятся в пределах часа (или дельты), который будет повторен, когда часы переводятся назад.
- `GetAmbiguousTimeOffsets` возвращает массив из элементов `TimeSpan`, представляющий допустимые варианты смещения для неоднозначного `DateTime` или `DateTimeOffset`.

Вы не можете получить из объекта `TimeZoneInfo` простые даты, отражающие начало и конец летнего времени. Взамен понадобится вызвать метод `GetAdjustmentRules`, который возвращает декларативный список правил перехода на летнее время, применяемых ко всем годам. Каждое правило имеет свойства `DateStart` и `DateEnd`, указывающие диапазон дат, в рамках которого это правило допустимо:

```
foreach (TimeZoneInfo.AdjustmentRule rule in wa.GetAdjustmentRules())
    Console.WriteLine ("Rule: applies from " + rule.DateStart + " to " + rule.DateEnd);
```

В Западной Австралии переход на летнее время впервые был введен в межсезонье 2006 года (и затем в 2009 году отменен). Это требует специального правила для первого года; таким образом, существуют два правила:

Rule: applies from 1/01/2006 12:00:00 AM to 31/12/2006 12:00:00 AM

Rule: applies from 1/01/2007 12:00:00 AM to 31/12/2009 12:00:00 AM

Правило: применяется с 1/01/2006 12:00:00 AM по 31/12/2006 12:00:00 AM

Правило: применяется с 1/01/2007 12:00:00 AM по 31/12/2009 12:00:00 AM

Каждый экземпляр AdjustmentRule имеет свойство DaylightDelta типа TimeSpan (почти в каждом случае оно составляет один час), а также свойства DaylightTransitionStart и DaylightTransitionEnd. Последние два свойства относятся к типу TimeZoneInfo.TransitionTime, в котором определены следующие свойства:

```
public bool IsFixedDateRule { get; }
public DayOfWeek DayOfWeek { get; }
public int Week { get; }
public int Day { get; }
public int Month { get; }
public DateTime TimeOfDay { get; }
```

Время перехода несколько усложняется тем, что оно должно представлять и фиксированные, и плавающие даты. Примером плавающей даты может служить “последнее воскресенье марта месяца”. Ниже описаны правила интерпретации времени перехода.

Если для конечного перехода свойство IsFixedDateRule равно true, свойство Day — 1, свойство Month — 1 и свойство TimeOfDay — DateTime.MinValue, то в таком году летнее время не заканчивается (это может произойти только в южном полушарии после первоначального ввода перехода на летнее время в регионе).

В противном случае, если IsFixedDateRule равно true, тогда свойства Month, Day и TimeOfDay определяют начало или конец правила корректировки.

В противном случае, если IsFixedDateRule равно false, то свойства Month, DayOfWeek, Week и TimeOfDay определяют начало или конец правила корректировки. В последнем случае свойство Week ссылается на неделю месяца, причем 5 означает последнюю неделю. Мы можем проиллюстрировать сказанное путем перечисления правил корректировки для часового пояса wa:

```
foreach (TimeZoneInfo.AdjustmentRule rule in wa.GetAdjustmentRules())
{
    Console.WriteLine ("Rule: applies from " + rule.DateStart +
                      " to " + rule.DateEnd); // применяется с ... по ...
    Console.WriteLine ("    Delta: " + rule.DaylightDelta); // дельта
    Console.WriteLine ("    Start: " + FormatTransitionTime
                      (rule.DaylightTransitionStart, false)); // начало
    Console.WriteLine ("    End:   " + FormatTransitionTime
                      (rule.DaylightTransitionEnd, true)); // конец
    Console.WriteLine();
}
```

В методе FormatTransitionTime мы соблюдаем только что описанные правила:

```
static string FormatTransitionTime (TimeZoneInfo.TransitionTime tt,
                                    bool endTime)
{
    if (endTime && tt.IsFixedDateRule
        && tt.Day == 1 && tt.Month == 1
        && tt.TimeOfDay == DateTime.MinValue)
        return "-";

    string s;
    if (tt.IsFixedDateRule)
        s = tt.Day.ToString();
    else
        s = "The " +
            "first second third fourth last".Split() [tt.Week - 1] +
            " " + tt.DayOfWeek + " in";

    return s + " " + DateTimeFormatInfo.CurrentInfo.MonthNames [tt.Month-1]
           + " at " + tt.TimeOfDay.TimeOfDay;
}
```

Летнее время и структура DateTime

Если вы используете структуру DateTimeOffset или UTC-вариант DateTime, то сравнения эквивалентности свободны от влияния летнего времени. Однако с местными вариантами DateTime переход на летнее время может вызвать проблемы.

Подытожить правила можно следующим образом.

- Переход на летнее время оказывает воздействие на местное время, но не на время UTC.
- Когда часы переводят назад, тогда сравнения, основанные на том, что время движется вперед, дадут сбой, если (и только если) они применяют местные значения DateTime.
- Всегда можно надежно перемещаться между UTC и местным временем (на том же самом компьютере), даже когда часы переводят назад.

Метод IsDaylightSavingTime сообщает о том, относится ли заданное местное значение DateTime к летнему времени. В случае времени UTC всегда возвращается false:

```
Console.WriteLine(DateTime.Now.IsDaylightSavingTime()); // True или False
Console.WriteLine(DateTime.UtcNow.IsDaylightSavingTime()); // Всегда False
```

Предполагая, что dto имеет тип DateTimeOffset, следующее выражение делает то же самое:

```
dto.LocalDateTime.IsDaylightSavingTime
```

Конец летнего времени представляет особую сложность для алгоритмов, использующих местное время, потому что когда часы переводят назад, один и тот же час (точнее Delta) повторяется.



Любые два экземпляра `DateTime` можно надежно сравнивать, предварительно вызывая на каждом метод `ToUniversalTime`. Такая стратегия отказывает, если (и только если) в точности один из них имеет значение `DateTimeKind`, равное `Unspecified`. Возможность отказа является еще одной причиной отдавать предпочтение типу `DateTimeOffset`.

Форматирование и разбор

Форматирование означает преобразование в строку, а разбор — преобразование из строки. Потребность в форматировании и разборе во время программирования возникает часто, причем в самых разнообразных ситуациях. Для этого в .NET предусмотрено несколько механизмов.

- **`ToString` и `Parse`.** Данные методы предоставляют стандартную функциональность для многих типов.
- **Поставщики форматов.** Они проявляются в виде дополнительных методов `ToString` (и `Parse`), которые принимают форматную строку и/или поставщик формата. Поставщики форматов характеризуются высокой гибкостью и чувствительностью к культуре. В состав .NET входят поставщики форматов для числовых типов и типов `DateTime/DateTimeOffset`.
- **`XmlConvert`.** Это статический класс с методами, которые поддерживают форматирование и разбор с соблюдением стандартов XML. Класс `XmlConvert` также удобен при универсальном преобразовании, когда требуется обеспечить независимость от культуры либо избежать некорректного разбора. Класс `XmlConvert` поддерживает числовые типы, а также типы `bool`, `DateTime`, `DateTimeOffset`, `TimeSpan` и `Guid`.
- **Преобразователи типов.** Они предназначены для визуальных конструкторов и средств разбора XAML.

В текущем разделе мы обсудим первые два механизма, уделяя особое внимание поставщикам форматов. В следующем разделе мы опишем `XmlConvert` и преобразователи типов, а также другие механизмы преобразования.

Методы `ToString` и `Parse`

Метод `ToString` является простейшим механизмом форматирования. Он обеспечивает осмысленный вывод для всех простых типов значений (`bool`, `DateTime`, `DateTimeOffset`, `TimeSpan`, `Guid` и всех числовых типов). Для обратной операции в каждом из указанных типов определен статический метод `Parse`:

```
string s = true.ToString();    // s = "True"  
bool b = bool.Parse (s);      // b = true
```

Если разбор терпит неудачу, тогда генерируется исключение `FormatException`. Во многих типах также определен метод `TryParse`, который в случае отказа преобразования вместо генерации исключения возвращает `false`:

```
bool failure = int.TryParse ("qwerty", out int i1);
bool success = int.TryParse ("123", out int i2);
```

Если выходное значение вас не интересует и требуется лишь проверить, будет ли разбор успешным, то можете применить отбрасывание:

```
bool success = int.TryParse ("123", out int _);
```

Если вы предвидите ошибку, тогда вызов TryParse будет более быстрым и элегантным решением, чем вызов Parse в блоке обработки исключения.

Методы Parse и TryParse в DateTime (DateTimeOffset) и числовых типах учитывают местные настройки культуры, что можно изменить, указывая объект CultureInfo. Часто указание инвариантной культуры является удачной идеей. Например, разбор "1.234" в double дает 1234 для Германии:

```
Console.WriteLine (double.Parse ("1.234")); // 1234 (в Германии)
```

Причина в том, что символ точки в Германии используется в качестве разделителя тысяч, а не как десятичная точка. Проблему устраняет указание *инвариантной культуры*:

```
double x = double.Parse ("1.234", CultureInfo.InvariantCulture);
```

То же самое применимо и в отношении вызова ToString:

```
string x = 1.234.ToString (CultureInfo.InvariantCulture);
```



Начиная с версии .NET 8, числовые типы и типы даты/времени .NET (а также другие простые типы) позволяют напрямую форматировать и анализировать UTF-8 с помощью новых методов TryFormat и Parse/TryParse, которые работают с массивом байтов или Span<byte> (см. главу 23). В сценариях с высокой производительностью это может быть более эффективно, чем работа с обычными строками (UTF-16) и выполнение отдельного кодирования/декодирования UTF-8.

Поставщики форматов

Зачастую требуется больший контроль над тем, как происходит форматирование и разбор. Например, существуют десятки способов форматирования DateTime (DateTimeOffset). Поставщики форматов позволяют получить обширный контроль над форматированием и разбором и поддерживаются для числовых типов и типов даты/времени. Поставщики форматов также используются элементами управления пользовательского интерфейса для выполнения форматирования и разбора.

Интерфейсом для применения поставщика формата является IFormattable, который реализуют все числовые типы и тип DateTime (DateTimeOffset):

```
public interface IFormattable
{
    string ToString (string format, IFormatProvider formatProvider);
}
```

Методу `ToString` в первом аргументе передается *форматная строка*, а во втором — *поставщик формата*. Форматная строка предоставляет инструкции; поставщик формата определяет то, как инструкции транслируются. Например:

```
NumberFormatInfo f = new NumberFormatInfo();
f.CurrencySymbol = " $$ ";
Console.WriteLine (3.ToString ("C", f));           // $$ 3.00
```

Здесь "С" представляет собой форматную строку, которая указывает *денежное значение*, а объект `NumberFormatInfo` является поставщиком формата, определяющим то, каким образом должно визуализироваться денежное значение (и другие числовые представления). Такой механизм допускает глобализацию.



Все форматные строки для чисел и дат описаны в разделе “Стандартные форматные строки и флаги разбора” далее в главе.

Если для форматной строки или поставщика указать `null`, то будет применен стандартный вариант. Стандартный поставщик формата, `CultureInfo.CurrentCulture`, отражает настройки панели управления компьютера во время выполнения (если он не был переустановлен). Например:

```
Console.WriteLine (10.3.ToString ("C", null)); // $10.30
```

Ради удобства в большинстве типов метод `ToString` перегружен, так что `null` для поставщика можно не указывать:

```
Console.WriteLine (10.3.ToString ("C"));           // $10.30
Console.WriteLine (10.3.ToString ("F4")); //10.3000 (четыре десятичных позиции)
```

Вызов метода `ToString` без аргументов для типа `DateTime` (`DateTimeOffset`) или числового типа эквивалентен использованию стандартного поставщика формата с пустой форматной строкой.

В .NET определены три поставщика формата (все они реализуют интерфейс `IFormatProvider`):

```
NumberFormatInfo
DateTimeFormatInfo
CultureInfo
```



Все типы перечислений также поддерживают форматирование, хотя специальный класс, реализующий интерфейс `IFormatProvider`, для них не предусмотрен.

Поставщики форматов и `CultureInfo`

В рамках контекста поставщиков форматов тип `CultureInfo` действует как механизм косвенности для двух других поставщиков форматов, возвращая объект `NumberFormatInfo` или `DateTimeFormatInfo`, который может быть применен к региональным настройкам культуры.

В следующем примере мы запрашиваем специфическую культуру (английский (*english*) в Великобритании (*Great Britain*)):

```
CultureInfo uk = CultureInfo.GetCultureInfo ("en-GB");
Console.WriteLine (3.ToString ("C", uk));           // £3.00
```

Показанный код выполняется с использованием стандартного объекта `NumberFormatInfo`, применимого к культуре en-GB.

В приведенном ниже примере производится форматирование значения `DateTime` с использованием инвариантной культуры. Инвариантная культура всегда остается одной и той же независимо от настроек компьютера:

```
DateTime dt = new DateTime (2000, 1, 2);
CultureInfo iv = CultureInfo.InvariantCulture;
Console.WriteLine (dt.ToString (iv));           // 01/02/2000 00:00:00
Console.WriteLine (dt.ToString ("d", iv));       // 01/02/2000
```



Инвариантная культура основана на американской культуре с перечисленными ниже отличиями:

- символом валюты является ₧, а не \$;
- дата и время форматируются с ведущими нулями (хотя месяц по-прежнему идет первым);
- для времени применяется 24-часовой формат, а не 12-часовой с указателем AM/PM.

Использование `NumberFormatInfo` или `DateTimeFormatInfo`

В следующем примере мы создаем экземпляр `NumberFormatInfo` и меняем разделитель групп цифр с запятой на пробел. После этого мы используем его для форматирования числа с тремя десятичными позициями:

```
NumberFormatInfo f = new NumberFormatInfo ();
f.NumberGroupSeparator = " ";
Console.WriteLine (12345.6789.ToString ("N3", f)); // 12 345.679
```

Начальные настройки для `NumberFormatInfo` или `DateTimeFormatInfo` основаны на инвариантной культуре. Тем не менее, иногда более удобно выбирать другую стартовую точку. Для этого с помощью `Clone` можно клонировать существующий поставщик формата:

```
NumberFormatInfo f = (NumberFormatInfo)
    CultureInfo.CurrentCulture.NumberFormat.Clone();
```

Клонированный поставщик формата всегда является записываемым, даже если исходный поставщик допускал только чтение.

Смешанное форматирование

Смешанные форматные строки позволяют комбинировать подстановку переменных с форматными строками. Статический метод `String.Format` принимает смешанную форматную строку (как иллюстрировалось в разделе “Метод `string.Format` и смешанные форматные строки” ранее в главе):

```
string composite = "Credit={0:C}";
Console.WriteLine (string.Format (composite, 500)); // Credit=$500.00
```

Сам класс `Console` перегружает свои методы `Write` и `WriteLine` для приема смешанных форматных строк, позволяя слегка сократить код примера:

```
Console.WriteLine ("Credit={0:C}", 500); // Credit=$500.00
```

Смешанную форматную строку можно также добавлять к `StringBuilder` (через `AppendFormat`) и к `TextWriter` для ввода-вывода (см. главу 15).

Метод `string.Format` принимает необязательный поставщик формата. Простым сценарием его применения является вызов `ToString` на произвольном объекте с передачей в то же время поставщика формата:

```
string s = string.Format (CultureInfo.InvariantCulture, "{0}", someObject);
```

Вот чему эквивалентен такой код:

```
string s;
if (someObject is IFormattable)
    s = ((IFormattable)someObject).ToString (null,
                                              CultureInfo.InvariantCulture);
else if (someObject == null)
    s = "";
else
    s = someObject.ToString();
```

Разбор с использованием поставщиков форматов

Стандартного интерфейса для выполнения разбора посредством поставщика формата не предусмотрено. Взамен каждый участвующий тип имеет перегруженную версию своего статического метода `Parse` (и `TryParse`), которая принимает поставщик формата и дополнительно значение перечисления `NumberStyles` или `DateTimeStyles`.

Перечисления `NumberStyles` и `DateTimeStyles` управляют работой разбора: они позволяют указывать аспекты наподобие того, могут ли встречаться во входной строке круглые скобки или символ валюты. (По умолчанию ни то, ни другое *не разрешено*.) Например:

```
int error = int.Parse ("(2)"); // Генерируется исключение
int minusTwo = int.Parse ("(2)", NumberStyles.Integer |
                           NumberStyles.AllowParentheses); // Нормально
decimal fivePointTwo = decimal.Parse ("£5.20", NumberStyles.Currency,
                                       CultureInfo.GetCultureInfo ("en-GB"));
```

В следующем разделе описаны все члены перечислений `NumberStyles` и `DateTimeStyles`, а также стандартные правила разбора для каждого типа.

IFormatProvider и ICustomeFormatter

Все поставщики форматов реализуют интерфейс `IFormatProvider`:

```
public interface IFormatProvider { object GetFormat (Type formatType); }
```

Цель заключается в обеспечении косвенности — именно это позволяет `CultureInfo` поручить выполнение работы соответствующему объекту `NumberFormatInfo` или `DateTimeFormatInfo`.

За счет реализации интерфейса `IFormatProvider` — наряду с `ICustomFormatter` — можно также построить собственный поставщик формата в сочетании с существующими типами.

В интерфейсе ICustomFormatter определен единственный метод:

```
string Format (string format, object arg, IFormatProvider formatProvider);
```

Следующий специальный поставщик формата записывает числа с помощью слов на английском языке:

```
public class WordyFormatProvider : IFormatProvider, ICustomFormatter
{
    static readonly string[] _numberWords =
        "zero one two three four five six seven eight nine minus point".Split();
    IFormatProvider _parent; // Позволяет потребителям строить
                            // цепочки поставщиков форматов

    public WordyFormatProvider () : this (CultureInfo.CurrentCulture) { }
    public WordyFormatProvider (IFormatProvider parent) => _parent = parent;
    public object GetFormat (Type formatType)
    {
        if (formatType == typeof (ICustomFormatter)) return this;
        return null;
    }

    public string Format (string format, object arg, IFormatProvider prov)
    {
        // Если это не наша форматная строка, тогда передать
        // ее родительскому поставщику:
        if (arg == null || format != "W")
            return string.Format (_parent, "{0:" + format + "}", arg);

        StringBuilder result = new StringBuilder();
        string digitList = string.Format (CultureInfo.InvariantCulture,
                                         "{0}", arg);
        foreach (char digit in digitList)
        {
            int i = "0123456789-.".IndexOf (digit,
                                              StringComparison.InvariantCulture);
            if (i == -1) continue;
            if (result.Length > 0) result.Append (' ');
            result.Append (_numberWords[i]);
        }
        return result.ToString();
    }
}
```

Обратите внимание, что в методе Format для преобразования входного числа в строку мы применяем string.Format с указанием InvariantCulture. Было бы намного проще вызвать ToString на arg, но тогда использовалось бы свойство CurrentCulture. Причина потребности в инвариантной культуре становится очевидной дальше в коде:

```
int i = "0123456789-.".IndexOf (digit, StringComparison.InvariantCulture);
```

Здесь критически важно, чтобы строка с числом содержала только символы 0123456789-. и никаких интернационализированных версий для них.

Ниже приведен пример, в котором задействован WordyFormatProvider:

```
double n = -123.45;
IFormatProvider fp = new WordyFormatProvider();
Console.WriteLine (string.Format (fp, "{0:C} in words is {0:W}", n));
// Выводит -$123.45 in words is minus one two three point four five
```

Специальные поставщики форматов могут применяться только в смешанных форматных строках.

Стандартные форматные строки и флаги разбора

Стандартные форматные строки управляют способом преобразования в строку числового типа или типа DateTime/DateTimeOffset. Существуют два вида форматных строк.

- **Стандартные форматные строки.** С их помощью обеспечивается общее управление. Стандартная форматная строка состоит из одиночной буквы и следующей за ней дополнительной цифры (смысл которой зависит от буквы). Примером может служить "C" или "F2".
- **Специальные форматные строки.** С их помощью контролируется каждый символ посредством шаблона. Примером может служить "0:#.000E+00".

Специальные форматные строки не имеют никакого отношения к специальным поставщикам форматов.

Форматные строки для чисел

В табл. 6.2 приведен список всех стандартных форматных строк для чисел.

Предоставление форматной строки, не предназначено для чисел (либо null или пустой строки), эквивалентно применению стандартной форматной строки "G" без цифры. В таком случае поведение будет следующим.

- Числа меньше 10⁻⁴ или больше, чем точность типа, выражаются с использованием экспоненциальной (научной) записи.
- Две десятичные позиции на пределе точности float или double округляются, чтобы замаскировать неточности, присущие преобразованию в десятичный тип из лежащей в основе двоичной формы.



Только что описанное автоматическое округление обычно полезно и проходит незаметно. Тем не менее, оно может вызвать проблему, если необходимо вернуться обратно к числу; другими словами, преобразование числа в строку и обратно (возможно, многократно повторяемое) может нарушить равенство значений. По этой причине существуют форматные строки "R", "G17" и "G9", подавляющие такое неявное округление.

В табл. 6.3 представлен список специальных форматных строк для чисел.

Таблица 6.2. Стандартные форматные строки для чисел

Буква	Что означает	Пример ввода	Результат	Примечания
G или g	“Общий” формат	1.2345, "G" 0.00001, "G" 0.00001, "g" 1.2345, "G3" 12345, "G3"	1.2345 1E-05 1e-05 1.23 1.23E04	Переключается на экспоненциальную запись для очень малых или больших чисел. G3 ограничивает точность всего тремя цифрами (перед и после точки)
F	Формат с фиксированной точкой	2345.678, "F2" 2345.6, "F2"	2345.68 2345.60	F2 округляет до двух десятичных позиций
N	Формат с фиксированной точкой и разделителем групп (“числовой”)	2345.678, "N2" 2345.6, "N2"	2,345.68 2,345.60	То же, что и выше, но с разделителем групп (тысяч); детали берутся из поставщика формата
D	Заполнение ведущими нулями	123, "D5" 123, "D1"	00123 123	Только для целочисленных типов. D5 дополняет слева до пяти цифр; усечение не производится
E или e	Принудительное применение экспоненциальной записи	56789, "E" 56789, "e" 56789, "E2"	5.678900E+004 5.678900e+004 5.68E+004	По умолчанию точность составляет шесть цифр
C	Денежное значение	1.2, "C" 1.2, "C4"	\$1.20 \$1.2000	С без цифры использует стандартное количество десятичных позиций, заданное поставщиком формата
P	Процент	.503, "P".503, "P0"	50.30 % 50 %	Использует символ и компоновку из поставщика формата.
				Десятичные позиции могут быть отброшены
X или x	Шестнадцатеричный формат	47, "X" 47, "x" 47, "X4"	2F 2f 002F	x — для представления шестнадцатеричных цифр в верхнем регистре; x — для представления шестнадцатеричных цифр в нижнем регистре. Только для целочисленных типов
R или G9/G17	Округление	1f / 3f, "R"	0.333333343	R используется для типа BigInteger, G17 — для double или G9 — для float

Таблица 6.3. Специальные форматные строки для чисел

Специф- икатор	Что означает	Пример ввода	Результат	Примечания
#	Заполнитель для цифры	12.345, ".##" 12.345, ".####"	12.35 12.345	Ограничивает количество цифр после десятичной точки
0	Заполнитель для нуля	12.345, ".00" 12.345, ".0000" 99, "000.00"	12.35 12.3450 099.00	Как и выше, ограничивает количество цифр после десятичной точки, но также дополняет нулями до и после десятичных позиций
.	Десятичная точка			Отображает десятичную точку. Фактический символ берется из NumberFormatInfo
,	Разделитель групп	1234, "#,###,###" 1234, "0,000,000"	1,234 0,001,234	Символ берется из NumberFormatInfo
, (как и выше)	Коэффи- циент	1000000, "#," 1000000, "#,,,"	1000 1	Когда запятая находится до или после десятичной позиции, она действует как коэффициент, разделяя результат на 1000, 1 000 000 и т.д.
%	Процентная запись	0.6, "00%"	60%	Сначала умножает на 100, а затем подставляет символ процента, полученный из NumberFormatInfo
E0, e0, E+0, e+0, E-0, e-0	Экспонен- циальная запись	1234, "0E0" 1234, "0E+0" 1234, "0.00E00" 1234, "0.00e00"	1E3 1E+3 1.23E03 1.23e03	
\	Признак ли- терального символа	50, @"\#0"	#50	Используется в сочета- нии с префиксом @ в строках — или же можно применять \\
'xx'	Признак литеральной строки	50, "0 '...'"	50 ...	
;	Разделитель секций	15, "#; (#); zero" -5, "#; (#); zero" 0, "#; (#); zero"	15 (5) zero	(Если положительное) (Если отрицательное) (Если ноль)
Любой другой символ	Литерал	35.2, "\$0 . 00c"	\$35 . 20c	

Перечисление NumberStyles

В каждом числовом типе определен статический метод Parse, принимающий аргумент типа NumberStyles. Перечисление флагов NumberStyles позволяет определить, каким образом строка читается при преобразовании в числовой тип. Перечисление NumberStyles имеет следующие комбинируемые члены:

AllowLeadingWhite, AllowTrailingWhite, AllowLeadingSign, AllowTrailingSign, AllowParentheses, AllowDecimalPoint, AllowThousands, AllowExponent, AllowCurrencySymbol, AllowHexSpecifier

В NumberStyles также определены составные члены:

None, Integer, Float, Number, HexNumber, Currency, Any

Все составные члены кроме None включают AllowLeadingWhite и AllowTrailingWhite. Остальные члены проиллюстрированы на рис. 6.1; три наиболее полезных выделены полужирным.

	AllowLeadingWhite	AllowTrailingWhite	AllowLeadingSign	AllowTrailingSign	AllowParenthesis	AllowDecimalPoint	AllowThousands	AllowExponent	AllowCurrencySymbol	AllowHexSpecifier
Integer	✓									
Float	✓			✓			✓			
Number	✓	✓	✓	✓	✓					
HexNumber								✓		
Currency	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
Any	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

Рис. 6.1. Составные члены NumberStyles

Когда метод Parse вызывается без указания флагов, применяются правила по умолчанию, как показано на рис. 6.2.

Стандартные флаги разбора		AllowLeadingWhite	AllowTrailingWhite	AllowLeadingSign	AllowTrailingSign	AllowParenthesis	AllowDecimalPoint	AllowThousands	AllowExponent	AllowCurrencySymbol	AllowHexSpecifier
Целочисленные типы	Integer	✓									
double и float	Float AllowThousands	✓			✓	✓	✓				
decimal	Number	✓	✓	✓	✓	✓					

Рис. 6.2. Стандартные флаги разбора для числовых типов

Если правила по умолчанию, представленные на рис. 6.2, не подходят, тогда значения NumberStyles должны указываться явно:

```
int thousand = int.Parse ("3E8", NumberStyles.HexNumber);
int minusTwo = int.Parse ("(2)", NumberStyles.Integer |
                           NumberStyles.AllowParentheses);
double aMillion = double.Parse ("1,000,000", NumberStyles.Any);
decimal threeMillion = decimal.Parse ("3e6", NumberStyles.Any);
decimal fivePointTwo = decimal.Parse ("$5.20", NumberStyles.Currency);
```

Из-за того, что поставщик формата не указан, приведенный выше код работает с местным символом валюты, разделителем групп, десятичной точкой и т.д. В следующем примере для денежных значений жестко закодирован знак евро и разделитель групп в виде пробела:

```
NumberFormatInfo ni = new NumberFormatInfo ();
ni.CurrencySymbol = "€";
ni.CurrencyGroupSeparator = " ";
double million = double.Parse ("€1 000 000", NumberStyles.Currency, ni);
```

Форматные строки для даты/времени

Форматные строки для DateTime/DateTimeOffset могут быть разделены на две группы, основываясь на том, учитывают ли они настройки культуры и поставщика формата. Форматные строки для даты/времени, чувствительные к культуре, описаны в табл. 6.4, а нечувствительные — в табл. 6.5. Пример вывода получен в результате форматирования следующего экземпляра DateTime (с инвариантной культурой в случае табл. 6.4):

```
new DateTime (2000, 1, 2, 17, 18, 19);
```

Таблица 6.4. Форматные строки для даты/времени, чувствительные к культуре

Форматная строка	Что означает	Пример вывода
d	Краткая дата	01/02/2000
D	Полная дата	Sunday, 02 January 2000
t	Краткое время	17:18
T	Полное время	17:18:19
f	Полная дата + краткое время	Sunday, 02 January 2000 17:18
F	Полная дата + полное время	Sunday, 02 January 2000 17:18:19
g	Краткая дата + краткое время	01/02/2000 17:18
G	Краткая дата + полное время	01/02/2000 17:18:19
(по умолчанию)		
m, M	Месяц и день	02 January
y, Y	Год и месяц	January 2000

Таблица 6.5. Форматные строки для даты/времени, нечувствительные к культуре

Форматная строка	Что означает	Пример вывода	Примечания
o	Возможность кругового преобразования	2000-01-02T 17:18:19.0000000	Будет присоединять информацию о часовом поясе, если только DateTimeKind не является Unspecified
r, R	Стандарт RFC 1123	Sun, 02 Jan 2000 17:18:19 GMT	Потребуется явно преобразовать в UTC с помощью DateTime.ToUniversalTime
s	Сортируемое; ISO 8601	2000-01-02T17:18:19	Совместимо с текстовой сортировкой
u	"Универсальное" сортируемое	2000-01-02 17:18:19Z	Подобно предыдущему; потребуется явно преобразовать в UTC
U	UTC	Sunday, 02 January 2000 17:18:19	Краткая дата плюс краткое время, преобразованное в UTC

Форматные строки "r", "R" и "u" выдают суффикс, который подразумевает UTC; пока что они не осуществляют автоматическое преобразование местной версии DateTime в UTC-версию (поэтому преобразование придется делать самостоятельно). По иронии судьбы "U" автоматически преобразует в UTC, но не записывает суффикс часового пояса! На самом деле "o" является единственным спецификатором формата в группе, который обеспечивает запись недвусмысленного экземпляра DateTime безо всякого вмешательства.

Класс DateTimeFormatInfo также поддерживает специальные форматные строки: они аналогичны специальным форматным строкам для чисел. Их полный список можно найти в документации от Microsoft. Ниже приведен пример специальной форматной строки:

yyyy-MM-dd HH:mm:ss

Разбор и некорректный разбор значений DateTime

Строки, в которых месяц или день помещен первым, являются неоднозначными и очень легко могут привести к некорректному разбору, в частности при наличии глобальных пользователей. Это не будет проблемой в элементах управления пользовательского интерфейса, т.к. при разборе и форматировании принудительно применяются одни и те же настройки. Но при записи в файл, например, некорректный разбор дня/месяца может стать реальной проблемой. Существуют два решения:

- при форматировании и разборе всегда придерживаться одной и той же явной культуры (например, инвариантной);
- форматировать DateTime и DateTimeOffset в независимой от культуры манере.

Второй подход более надежен — особенно если выбран формат, в котором первым указывается год из четырех цифр: такие строки намного реже некорректно разбираются другой стороной. Кроме того, строки, сформатированные с использованием *соответствующего стандартам* формата с годом в самом начале (такого как "о"), могут корректно разбираться вместе с локально сформатированными строками. (Даты, сформатированные посредством "s" или "u", обеспечивают дополнительное преимущество, будучи сортируемыми.)

В целях иллюстрации предположим, что сгенерирована следующая нечувствительная к культуре строка DateTime по имени s:

```
string s = DateTime.Now.ToString ("о");
```



Форматная строка "о" включает в вывод миллисекунды. Приведенная ниже специальная форматная строка дает тот же результат, что и "о", но без миллисекунд:

```
уууу-ММ-ддТНН:мм:сс К
```

Повторно разобрать строку s можно двумя способами. Метод ParseExact требует строгого соответствия с указанной форматной строкой:

```
DateTime dt1 = DateTime.ParseExact (s, "о", null);
```

(Достичь похожего результата можно с помощью методов ToString и ToDateTime класса XmlConvert.)

Тем не менее, метод Parse неявно принимает как формат "о", так и формат CurrentCulture:

```
DateTime dt2 = DateTime.Parse (s);
```

Прием работает и для DateTime, и для DateTimeOffset.



Метод ParseExact обычно предпочтительнее, когда вам известен формат разбираемой строки. Это означает, что если строка сформатирована некорректно, тогда сгенерируется исключение — что обычно лучше, нежели риск получения неправильно разобранной даты.

Перечисление DateTimeStyles

Перечисление флагов DateTimeStyles предоставляет дополнительные инструкции при вызове метода Parse на DateTime (DateTimeOffset). Ниже приведены его члены:

```
None,  
AllowLeadingWhite, AllowTrailingWhite, AllowInnerWhite,  
AssumeLocal, AssumeUniversal, AdjustToUniversal,  
NoCurrentDateDefault, RoundTripKind
```

Имеется также составной член AllowWhiteSpaces:

```
AllowWhiteSpaces = AllowLeadingWhite | AllowTrailingWhite | AllowInnerWhite
```

Стандартным значением является `None`. Таким образом, лишние пробельные символы обычно запрещены (что не касается пробельных символов, являющихся частью стандартного шаблона `DateTime`).

Флаги `AssumeLocal` и `AssumeUniversal` применяются, если строка не имеет суффикса часового пояса (вроде `Z` или `+9:00`). Флаг `AdjustToUniversal` учитывает суффиксы часовых поясов, но затем выполняет преобразование в UTC с использованием текущих региональных настроек.

При разборе строки, содержащей время и не включающей дату, по умолчанию берется сегодняшняя дата. Однако если применен флаг `NoCurrentDateDefault`, то будет использоваться 1 января 0001 года.

Форматные строки для перечислений

В разделе “Перечисления” главы 3 было описано форматирование и разбор перечислимых значений. В табл. 6.6 приведен список форматных строк для перечислений и результаты их применения в следующем операторе:

```
Console.WriteLine (System.ConsoleColor.Red.ToString (formatString));
```

Таблица 6.6. Форматные строки для перечислений

Форматная строка	Что означает	Пример вывода	Примечания
G или g	“Общий” формат	Red	Используется по умолчанию
F или f	Трактуется, как если бы присутствовал атрибут <code>Flags</code>	Red	Работает на составных членах, даже если перечисление не имеет атрибута <code>Flags</code>
D или d	Десятичное значение	12	Извлекает лежащее в основе целочисленное значение
X или x	Шестнадцатеричное значение	0000000C	Извлекает лежащее в основе целочисленное значение

Другие механизмы преобразования

В предшествующих двух разделах рассматривались поставщики форматов — основной механизм .NET для форматирования и разбора. Прочие важные механизмы преобразования разбросаны по различным типам и пространствам имен. Есть механизмы, преобразующие в тип `string` и из него, а есть такие, которые осуществляют другие виды преобразований. В настоящем разделе мы обсудим следующие темы.

- Класс `Convert` и его функции:
 - преобразования вещественных чисел в целые, которые производят округление, а не усечение;
 - разбор чисел в системах счисления с основаниями 2, 8 и 16;
 - динамические преобразования;
 - преобразования Base-64.

- Класс XmlConvert и его роль в форматировании и разборе для XML.
- Преобразователи типов и их роль в форматировании и разборе для визуальных конструкторов и XAML.
- Класс BitConverter, предназначенный для двоичных преобразований.

Класс Convert

Перечисленные типы .NET называются *базовыми типами*:

- bool, char, string, System.DateTime и System.DateTimeOffset;
- все числовые типы C#.

В статическом классе Convert определены методы для преобразования каждого базового типа в любой другой базовый тип. К сожалению, большинство таких методов бесполезны: они либо генерируют исключения, либо избыточны из-за доступности неявных приведений. Тем не менее, среди этого беспорядка есть несколько полезных методов, которые рассматриваются в последующих разделах.



Все базовые типы (явно) реализуют интерфейс IConvertible, в котором определены методы для преобразования во все другие базовые типы. В большинстве случаев реализация каждого из таких методов просто вызывает какой-то метод из класса Convert. В редких ситуациях может оказаться удобным создать метод, принимающий аргумент типа IConvertible.

Округляющие преобразования вещественных чисел в целые

В главе 2 было показано, что неявные и явные приведения позволяют выполнить преобразования между числовыми типами. Подведем итоги:

- неявные приведения работают для преобразований без потери (например, int в double);
- явные приведения обязательны для преобразований с потерей (например, double в int).

Приведения оптимизированы для обеспечения эффективности, поэтому они *усекают* данные, которые не умещаются. В результате может возникнуть проблема при преобразовании вещественного числа в целое, т.к. часто требуется не усечение, а *округление*. Упомянутую проблему решают методы числового преобразования Convert; они всегда производят *округление*:

```
double d = 3.9;
int i = Convert.ToInt32 (d); // i == 4
```

Класс Convert использует *округление, принятое в банках*, при котором серединные значения привязываются к четным целым (это позволяет избегать положительного или отрицательного отклонения). Если округление, принятое в банках, становится проблемой, тогда для вещественного числа необходимо вызвать метод Math.Round: он принимает дополнительный аргумент, позволяющий управлять округлением серединного значения.

Разбор чисел в системах счисления с основаниями 2, 8 и 16

Среди методов `ToЦелочисленный`-типа скрываются перегруженные версии, которые разбирают числа в системах счисления с другими основаниями:

```
int thirty = Convert.ToInt32 ("1E", 16); // Разобрать в шестнадцатеричной
                                         // системе счисления
uint five = Convert.ToUInt32 ("101", 2); // Разобрать в двоичной системе
                                         // счисления
```

Во втором аргументе задается основание системы счисления. Допускается указывать 2, 8, 10 или 16.

Динамические преобразования

Иногда требуется преобразовывать из одного типа в другой, но точные типы не известны вплоть до времени выполнения. Для таких целей класс `Convert` предлагает метод `ChangeType`:

```
public static object ChangeType (object value, Type conversionType);
```

Исходный и целевой типы должны относиться к “базовым” типам. Метод `ChangeType` также принимает необязательный аргумент `IFormatProvider`. Ниже представлен пример:

```
Type targetType = typeof (int);
object source = "42";

object result = Convert.ChangeType (source, targetType);

Console.WriteLine (result);           // 42
Console.WriteLine (result.GetType()); // System.Int32
```

Примером, когда это может оказаться полезным, является написание десериализатора, который способен работать с множеством типов. Он также может преобразовывать любое перечисление в его целочисленный тип (как было показано в разделе “Перечисления” главы 3).

Ограничение метода `ChangeType` заключается в том, что для него нельзя указывать форматную строку или флаг разбора.

Преобразования Base-64

Временами возникает необходимость включать двоичные данные вроде растрового изображения в текстовый документ, такой как XML-файл или сообщение электронной почты. Base-64 — повсеместно применяемое средство кодирования двоичных данных в виде читабельных символов, которое использует 64 символа из набора ASCII.

Метод `ToBase64String` класса `Convert` осуществляет преобразование байтового массива в код Base-64, а метод `FromBase64String` выполняет обратное преобразование.

Класс `XmlConvert`

Класс `XmlConvert` (из пространства имен `System.Xml`) предлагает наиболее подходящие методы для форматирования и разбора данных, которые поступают из XML-файла или направляются в него. Методы в `XmlConvert` учитыва-

ют нюансы XML-форматирования, не требуя указания специальных форматных строк. Например, значение `true` в XML выглядит как `true`, но не `True`. Класс `XmlConvert` широко применяется внутри библиотеки .NET BCL. Он также хорошо подходит для универсальной и не зависящей от культуры сериализации. Все методы форматирования в `XmlConvert` доступны в виде перегруженных версий методов `ToString`; методы разбора называются `ToBoolean`, `ToDateTime` и т.д.:

```
string s = XmlConvert.ToString(true);           // s = "true"
bool isTrue = XmlConvert.ToBoolean(s);
```

Методы, выполняющие преобразование в и из `DateTime`, принимают аргумент типа `XmlDateTimeSerializationMode` — перечисление со следующими значениями:

`Unspecified`, `Local`, `Utc`, `RoundtripKind`

Значения `Local` и `Utc` вызывают преобразование во время форматирования (если `DateTime` еще не находится в нужном часовом поясе). Часовой пояс затем добавляется к строке:

```
2010-02-22T14:08:30.9375          // Unspecified
2010-02-22T14:07:30.9375+09:00    // Local
2010-02-22T05:08:30.9375Z         // Utc
```

Значение `Unspecified` приводит к отбрасыванию перед форматированием любой информации о часовом поясе, встроенной в `DateTime` (т.е. `DateTimeKind`). Значение `RoundtripKind` учитывает `DateTimeKind` из `DateTime`, так что при восстановлении результирующая структура `DateTime` будет в точности такой же, какой была изначально.

Преобразователи типов

Преобразователи типов предназначены для форматирования и разбора в средах, используемых во время проектирования. Преобразователи типов вдобавок поддерживают разбор значений в документах XAML (Extensible Application Markup Language — расширяемый язык разметки приложений), которые применяются в инфраструктуре Windows Presentation Foundation (WPF).

В .NET существует свыше 100 преобразователей типов, охватывающих такие аспекты, как цвета, изображения и URI. В отличие от них поставщики форматов реализованы только для небольшого количества простых типов значений.

Преобразователи типов обычно разбирают строки разнообразными путями, не требуя подсказок. Например, если при создании в Visual Studio приложения WPF присвоить элементу управления цвет фона, введя "Beige" в поле соответствующего свойства, то преобразователь типа `Color` определит, что производится ссылка на имя цвета, а не на строку RGB или системный цвет. Подобная гибкость иногда может делать преобразователи типов удобными в контекстах, выходящих за рамки визуальных конструкторов и XAML-документов.

Все преобразователи типов являются подклассами класса `TypeConverter` из пространства имен `System.ComponentModel`. Для получения экземпляра `TypeConverter` необходимо вызвать метод `TypeDescriptor.GetConverter`.

Следующий код получает экземпляр TypeConverter для типа Color (из пространства имен System.Drawing):

```
TypeConverter cc = TypeDescriptor.GetConverter (typeof (Color));
```

Среди многих других методов в классе TypeConverter определены методы ConvertToString и ConvertFromString. Их можно вызывать так, как показано ниже:

```
Color beige = (Color) cc.ConvertFromString ("Beige");
Color purple = (Color) cc.ConvertFromString ("#800080");
Color window = (Color) cc.ConvertFromString ("Window");
```

По соглашению преобразователи типов имеют имена, заканчивающиеся на Converter, и обычно находятся в том же самом пространстве имен, что и тип, для которого они предназначены. Тип ссылается на свой преобразователь через атрибут TypeConverterAttribute, позволяя визуальным конструкторам автоматически выбирать преобразователи.

Преобразователи типов могут также предоставлять службы стадии проектирования, такие как генерация списков стандартных значений для заполнения раскрывающихся списков в визуальном конструкторе или для помощи в написании кода сериализации.

Класс BitConverter

Большинство базовых типов может быть преобразовано в байтовый массив путем вызова метода BitConverter.GetBytes:

```
foreach (byte b in BitConverter.GetBytes (3.5))
    Console.Write (b + " ");
                                // 0 0 0 0 0 12 64
```

Класс BitConverter также предоставляет методы для преобразования в другом направлении, например, ToDouble.

Типы decimal и DateTime (DateTimeOffset) не поддерживаются классом BitConverter. Однако значение decimal можно преобразовать в массив int, вызвав метод decimal.GetBits. Для обратного направления тип decimal предлагает конструктор, принимающий массив int.

В случае типа DateTime можно вызывать метод ToBinary на экземпляре — в результате возвращается значение long (в отношении которого затем можно использовать BitConverter). Статический метод DateTime.FromBinary выполняет обратное действие.

Глобализация

С интернационализацией приложения связаны два аспекта: глобализация и локализация.

Глобализация занимается следующими тремя задачами (указанными в порядке убывания важности).

1. Обеспечение работоспособности программы при запуске на машине с другой культурой.

2. Соблюдение правил форматирования локальной культуры — например, при отображении дат.
3. Проектирование программы таким образом, чтобы она выбирала специфичные к культуре данные и строки из подчиненных сборок, которые можно написать и развернуть позже.

Локализация означает решение последней задачи за счет написания подчиненных сборок для специфических культур. Вы можете заняться этим *после* написания своей программы — мы раскроем соответствующие детали в разделе “Ресурсы и подчиненные сборки” главы 17.

.NET содействует решению второй задачи, применяя специфичные для культуры правила по умолчанию. Мы уже показывали, что вызов метода `ToString` на `DateTime` или числе учитывает локальные правила форматирования. К сожалению, в таком случае очень легко допустить ошибку при решении первой задачи и нарушить работу программы, поскольку ожидается, что даты или числа должны быть сформатированы в соответствии с предполагаемой культурой. Как уже было продемонстрировано, решение предусматривает либо указание культуры (такой как инвариантная культура) при форматировании и разборе, либо использование независимых от культуры методов вроде тех, которые определены в классе `XmlConvert`.

Контрольный перечень глобализации

Мы уже рассмотрели в текущей главе важные моменты, связанные с глобализацией. Ниже приведен сводный перечень основных требований.

- Освойте Unicode и текстовые кодировки (см. раздел “Кодировка текста и Unicode” ранее в главе).
- Помните о том, что такие методы, как `ToUpper` и `ToLower` в типах `char` и `string`, чувствительны к культуре: если чувствительность к культуре не нужна, тогда применяйте методы `ToUpperInvariant`/`ToLowerInvariant`.
- Отдавайте предпочтение независимым от культуры механизмам форматирования и разбора для `DateTime` и `DateTimeOffset`, таким как `ToString("o")` и `XmlConvert`.
- В других обстоятельствах указывайте культуру при форматировании/разборе чисел или даты/времени (если только вас не интересует поведение локальной культуры).

Тестирование

Проводить тестирование для различных культур можно путем переустановки свойства `CurrentCulture` класса `Thread` (из пространства имен `System.Threading`). В представленном далее коде текущая культура изменяется на турецкую:

```
Thread.CurrentCulture = CultureInfo.GetCultureInfo ("tr-TR");
```

Турецкая культура является очень хорошим тестовым сценарием по следующим причинам.

- "i".ToUpper() != "I" и "I".ToLower() != "i".
- Даты форматируются как день.месяц.год (обратите внимание на разделитель в виде точки).
- Символом десятичной точки является запятая, а не сама точка.

Можно также поэкспериментировать, изменяя настройки форматирования чисел и дат в панели управления Windows: они отражены в стандартной культуре (CultureInfo.CurrentCulture).

Метод CultureInfo.GetCultures возвращает массив всех доступных культур.



Классы Thread и CultureInfo также поддерживают свойство CurrentUICulture. Оно больше связано с локализацией, которую мы рассмотрим в главе 17.

Работа с числами

Преобразования

Числовые преобразования были описаны в предшествующих главах и разделах; все доступные варианты подытожены в табл. 6.7.

Таблица 6.7. Обзор числовых преобразований

Задача	Функции	Примеры
Разбор десятичных чисел	Parse TryParse	double d = double.Parse ("3.5"); int i; bool ok = int.TryParse ("3", out i);
Разбор чисел в системах счисления с основаниями 2, 8 или 16	Convert. ToЦелочисленный-тип	int i = Convert.ToInt32 ("1E", 16);
Форматирование в шестнадцатеричную запись	ToString ("X")	string hex = 45.ToString ("X");
Числовое преобразование без потерь	Неявное приведение	int i = 23; double d = i;
Числовое преобразование с усечением	Явное приведение	double d = 23.5; int i = (int) d;
Числовое преобразование с округлением (вещественных чисел в целые)	Convert. ToЦелочисленный-тип	double d = 23.5; int i = Convert.ToInt32 (d);

Класс Math

В табл. 6.8 представлен список основных членов статического класса Math. Тригонометрические функции принимают аргументы типа double; другие методы наподобие Max перегружены для работы со всеми числовыми типами.

В классе `Math` также определены математические константы `E` (ϵ) и `PI` (π).

Таблица 6.8. Методы статического класса Math

Категория	Методы
Округление	Round, Truncate, Floor, Ceiling
Максимум и минимум	Max, Min
Абсолютное значение и знак	Abs, Sign
Квадратный корень	Sqrt
Возведение в степень	Pow, Exp
Логарифм	Log, Log10
Тригонометрические функции	Sin, Cos, Tan, Sinh, Cosh, Tanh, Asin, Acos, Atan

Метод `Round` позволяет указывать количество десятичных позиций для округления, а также способ обработки серединных значений (от нуля или посредством округления, принятого в банках). Методы `Floor` и `Ceiling` округляют до ближайшего целого: `Floor` всегда округляет в меньшую сторону, а `Ceiling` — в большую, даже отрицательные числа.

Методы Max и Min принимают только два аргумента. Для массива или последовательности чисел следует применять расширяющие методы Max и Min из класса System.Linq.Enumerable.

Структура BigInteger

Структура `BigInteger` — это специализированный числовой тип, который находится в новом пространстве имен `System.Numerics` и позволяет представлять произвольно большие целые числа без потери точности.

В языке C# отсутствует собственная поддержка BigInteger, так что нет никакого способа записи литералов типа BigInteger. Тем не менее, можно выполнять неявное преобразование в BigInteger из любого другого целочисленного типа:

```
BigInteger twentyFive = 25; //Неявное преобразование из целочисленного типа
```

Чтобы представить крупное число вроде одного гугола (10100), можно воспользоваться одним из статических методов BigInteger, например, Pow (возведение в степень):

```
BigInteger googol = BigInteger.Pow (10, 100);
```

Или же можно применить метод Parse для разбора строки:

```
BigInteger googol = BigInteger.Parse ("1".PadRight (101, '0'));
```

Вызов метода `ToString` в данном случае приводит к выводу на экран всех цифр:

Между BigInteger и стандартными числовыми типами можно выполнять преобразования с потенциальной потерей точности, используя явную операцию приведения:

```
double g2 = (double) googol; // Явное приведение
BigInteger g3 = (BigInteger) g2; // Явное приведение
Console.WriteLine (g3);
```

Вывод демонстрирует потерю точности:

```
999999999999999673361688041166912...
```

В структуре BigInteger перегружены все арифметические операции, включая получение остатка от деления (%), а также операции сравнения и эквивалентности.

Структуру BigInteger можно также конструировать из байтового массива. Следующий код генерирует 32-байтовое случайное число, подходящее для криптографии, и затем присваивает его переменной BigInteger:

```
// Здесь используется пространство имен System.Security.Cryptography:
RandomNumberGenerator rand = RandomNumberGenerator.Create();
byte[] bytes = new byte [32];
rand.GetBytes (bytes);
var bigRandomNumber = new BigInteger (bytes); // Преобразовать в BigInteger
```

Преимущество хранения таких чисел в структуре BigInteger по сравнению с байтовым массивом связано с тем, что вы получаете семантику типа значения. Вызов ToByteArray осуществляет преобразование BigInteger обратно в байтовый массив.

Структура Half

Структура Half представляет собой 16-битный тип с плавающей точкой; она появилась в версии .NET 5. Данная структура предназначена главным образом для взаимодействия с процессорами графических плат и не имеет собственной поддержки в большинстве центральных процессоров.

Выполнять преобразования между Half и float или double можно через явное приведение:

```
Half h = (Half) 123.456;
Console.WriteLine (h); // 123.44 (обратите внимание на потерю точности)
```

Для данного типа не определены арифметические операции, поэтому выполнение вычислений требует его преобразования в другой тип, такой как float или double.

Структура Half имеет диапазон от -65 500 до 65 500:

```
Console.WriteLine (Half.MinValue); // -65500
Console.WriteLine (Half.MaxValue); // 65500
```

Обратите внимание на потерю точности при значениях, близких к максимальному значению диапазона:

```
Console.WriteLine ((Half) 65500); // 65500
Console.WriteLine ((Half) 65490); // 65500
Console.WriteLine ((Half) 65480); // 65470
```

Структура Complex

Структура Complex является еще одним специализированным числовым типом, который предназначен для представления комплексных чисел с помощью вещественных и мнимых компонентов типа double. Структура Complex находится в том же пространстве имен, что и BigInteger.

Для применения Complex необходимо создать экземпляр структуры, указав вещественное и мнимое значения:

```
var c1 = new Complex (2, 3.5);
var c2 = new Complex (3, 0);
```

Существуют также неявные преобразования в Complex из стандартных числовых типов.

Структура Complex предлагает свойства для вещественного и мнимого значений, а также для фазы и амплитуды:

```
Console.WriteLine (c1.Real);           // 2
Console.WriteLine (c1.Imaginary);       // 3.5
Console.WriteLine (c1.Phase);          // 1.05165021254837
Console.WriteLine (c1.Magnitude);      // 4.03112887414927
```

Конструировать число Complex можно путем указания амплитуды и фазы:

```
Complex c3 = Complex.FromPolarCoordinates (1.3, 5);
```

Стандартные арифметические операции перегружены для работы с числами Complex:

```
Console.WriteLine (c1 + c2);           // (5, 3.5)
Console.WriteLine (c1 * c2);           // (6, 10.5)
```

Структура Complex предоставляет статические методы для выполнения более сложных функций, включая:

- тригонометрические (Sin, Asin, Sinh, Tan и т.д.);
- логарифмы и возведения в степень;
- сопряженное число (Conjugate).

Класс Random

Класс Random генерирует псевдослучайную последовательность значений byte, int или double.

Чтобы использовать класс Random, сначала понадобится создать его экземпляр, дополнительно предоставив начальное значение для инициирования последовательности случайных чисел. Применение одного и того же начального значения гарантирует получение той же самой последовательности чисел (при запуске под управлением одной и той же версии CLR), что иногда полезно, когда нужна воспроизводимость:

```
Random r1 = new Random (1);
Random r2 = new Random (1);
Console.WriteLine (r1.Next (100) + ", " + r1.Next (100)); // 24, 11
Console.WriteLine (r2.Next (100) + ", " + r2.Next (100)); // 24, 11
```

Если воспроизводимость не требуется, тогда можно конструировать Random без начального значения — в качестве такого значения будет использоваться текущее системное время.



Поскольку системные часы имеют ограниченный квант времени, два экземпляра Random, созданные в близкие друг к другу моменты времени (обычно в пределах 10 мс), будут выдавать одинаковые последовательности значений. Указанную проблему в общем случае решают путем создания нового объекта Random каждый раз, когда требуется случайное число, вместо повторного использования *того же самого* объекта.

Удачный прием предусматривает объявление единственного статического экземпляра Random. Однако в многопоточных сценариях это может привести к проблемам, т.к. объекты Random не являются безопасными в отношении потоков. В разделе “Локальное хранилище потока” главы 21 будет описан обходной способ.

Вызов метода Next (n) генерирует случайное целочисленное значение между 0 и n-1. Вызов метода NextDouble генерирует случайное значение типа double между 0 и 1. Вызов метода NextBytes заполняет случайными значениями байтовый массив.

Начиная с версии .NET 8, класс Random имеет метод GetItems, который выбирает n случайных элементов из коллекции. С помощью следующего кода из коллекции, содержащей пять чисел, выбираются два случайных числа:

```
int[] numbers = { 10, 20, 30, 40, 50 };
int[] randomTwo = new Random().GetItems (numbers, 2);
```

В .NET 8 также появился метод Shuffle, позволяющий рандомизировать порядок следования элементов внутри массива или диапазона.

Класс Random не считается в достаточной степени случайным для приложений, предъявляющих высокие требования к безопасности, таким как криптографические программы. Для них в .NET предлагается *криптографически строгий* генератор случайных чисел, находящийся в пространстве имен System.Security.Cryptography. Вот как его применять:

```
var rand = System.Security.Cryptography.RandomNumberGenerator.Create();
byte[] bytes = new byte [32];
rand.GetBytes (bytes); // Заполнить байтовый массив случайными числами
```

Недостаток класса RandomNumberGenerator в том, что он менее гибкий: заполнение байтового массива является единственным средством получения случайных чисел. Чтобы получить целое число, потребуется использовать BitConverter:

```
byte[] bytes = new byte [4];
rand.GetBytes (bytes);
int i = BitConverter.ToInt32 (bytes, 0);
```

Класс BitOperations

Класс System.Numerics.BitOperations (появившийся в .NET 6) предоставляет следующие методы, которые помогают выполнять операции в двоичной системе счисления.

IsPow2

Возвращает true, если число является степенью 2.

LeadingZeroCount/TrailingZeroCount

Возвращает количество ведущих нулей в целом числе, представленном в 32- или 64-битном двоичном формате без знака.

Log2

Возвращает двоичный логарифм целого числа без знака.

PopCount

Возвращает количество бит, установленных в 1, в целом числе без знака.

RotateLeft/RotateRight

Выполняет побитовое вращение влево/вправо.

RoundUpToPowerOf2

Округляет целое число без знака до ближайшей степени 2.

Перечисления

В главе 3 был описан тип enum, а также показано, каким образом комбинировать его члены, проверять эквивалентность, применять логические операции и выполнять преобразования. Инфраструктура .NET расширяет поддержку перечислений в C# через тип System.Enum, исполняющий две роли:

- обеспечение унификации для всех типов enum;
- определение статических служебных методов.

Унификация типов означает возможность неявного приведения любого члена перечисления к экземпляру System.Enum:

```
Display (Nut.Macadamia);           // Nut.Macadamia
Display (Size.Large);              // Size.Large

void Display (Enum value)
{
    Console.WriteLine (value.GetType().Name + " ." + value.ToString());
}

enum Nut { Walnut, Hazelnut, Macadamia }
enum Size { Small, Medium, Large }
```

Статические служебные методы System.Enum относятся главным образом к выполнению преобразований и получению списков членов.

Преобразования для перечислений

Представить значение перечисления можно тремя способами:

- как член перечисления;
- как лежащее в основе целочисленное значение;
- как строку.

В этом разделе будет показано, каким образом осуществлять преобразования между всеми представлениями.

Преобразования члена перечисления в целое значение

Вспомните, что явное приведение выполняет преобразование между членом перечисления и его целочисленным значением. Явное приведение будет корректным подходом, если тип enum известен на этапе компиляции:

```
[Flags] public enum BorderSides { Left=1, Right=2, Top=4, Bottom=8 }
...
int i = (int) BorderSides.Top; // i == 4
BorderSides side = (BorderSides) i; // side == BorderSides.Top
```

Таким же способом можно приводить экземпляр System.Enum к его целочисленному типу. Трюк заключается в приведении сначала к object, а затем к целочисленному типу:

```
static int GetIntegralValue (Enum anyEnum)
{
    return (int) (object) anyEnum;
}
```

Код полагается на то, что вам известен целочисленный тип: приведенный выше метод потерпит неудачу, если ему передать член перечисления, целочисленным типом которого является long. Чтобы написать метод, работающий с перечислением любого целочисленного типа, можно воспользоваться одним из трех подходов. Первый из них предусматривает вызов метода Convert.ToDecimal:

```
static decimal GetAnyIntegralValue (Enum anyEnum)
{
    return Convert.ToDecimal (anyEnum);
}
```

Данный подход работает, потому что каждый целочисленный тип (включая ulong) может быть преобразован в десятичный тип без потери информации. Второй подход предполагает вызов метода Enum.GetUnderlyingType для получения целочисленного типа перечисления и затем вызов метода Convert.ChangeType:

```
static object GetBoxedIntegralValue (Enum anyEnum)
{
    Type integralType = Enum.GetUnderlyingType (anyEnum.GetType ());
    return Convert.ChangeType (anyEnum, integralType);
}
```

Как показано в следующем примере, в результате предохраняется исходный целочисленный тип:

```
object result = GetBoxedIntegralValue (BorderSides.Top);
Console.WriteLine (result); // 4
Console.WriteLine (result.GetType()); // System.Int32
```



Наш метод `GetBoxedIntegralType` фактически не выполняет никаких преобразований значения; взамен он *переупаковывает* то же самое значение в другой тип. Он транслирует целочисленное значение внутри оболочки *типа перечисления* в целое значение внутри оболочки *целочисленного типа*. Мы рассмотрим это более подробно в разделе “Как работают перечисления” далее в главе.

Третий подход заключается в вызове метода `Format` или `ToString` с указанием форматной строки "d" или "D". В итоге получается целочисленное значение перечисления в виде строки, что удобно при написании специальных форматеров сериализации:

```
static string GetIntegralValueAsString (Enum anyEnum)
{
    return anyEnum.ToString ("D"); // Возвращает что-то наподобие "4"
```

Преобразования целочисленного значения в член перечисления

Метод `Enum.ToObject` преобразует целочисленное значение в член перечисления заданного типа:

```
object bs = Enum.ToObject (typeof (BorderSides), 3);
Console.WriteLine (bs); // Left, Right
```

Это динамический эквивалент следующего кода:

```
BorderSides bs = (BorderSides) 3;
```

Метод `ToObject` перегружен для приема всех целочисленных типов, а также типа `object`. (Последняя перегруженная версия работает с любым упакованым целочисленным типом.)

Строковые преобразования

Для преобразования перечисления в строку можно вызвать либо статический метод `Enum.Format`, либо метод `ToString` на экземпляре. Оба метода принимают форматную строку, которой может быть "G" для стандартного поведения форматирования, "D" для выдачи лежащего в основе целочисленного значения в виде строки, "X" для выдачи лежащего в основе целочисленного значения в виде шестнадцатеричной записи или "F" для форматирования комбинированных членов перечисления без атрибута `Flags`. Примеры приводились в разделе “Стандартные форматные строки и флаги разбора” ранее в главе.

Метод `Enum.Parse` преобразует строку в перечисление. Он принимает тип `enum` и строку, которая может содержать множество членов:

```
BorderSides leftRight = (BorderSides) Enum.Parse (typeof (BorderSides),
    "Left, Right");
```

Необязательный третий аргумент позволяет выполнять разбор, нечувствительный к регистру. Если член не найден, тогда генерируется исключение `ArgumentException`.

Перечисление значений перечисления

Метод `Enum.GetValues` возвращает массив, содержащий все члены указанного типа перечисления:

```
foreach (Enum value in Enum.GetValues (typeof (BorderSides)))
    Console.WriteLine (value);
```

В массив включаются и составные члены, такие как `LeftRight=Left | Right`.

Метод `Enum.GetNames` выполняет то же самое действие, но возвращает массив строк.



Внутренне среда CLR реализует методы `GetValues` и `GetNames`, выполняя рефлексию полей в типе перечисления. В целях эффективности результаты кешируются.

Как работают перечисления

Семантика типов перечислений в значительной степени поддерживается компилятором. В среде CLR во время выполнения не делается никаких отличий между экземпляром перечисления (когда он не упакован) и лежащим в его основе целочисленным значением. Более того, определение `enum` в CLR является просто подтиповом `System.Enum` со статическими полями целочисленного типа для каждого члена. В итоге обычное применение `enum` становится высокоэффективным, приводя к затратам во время выполнения, которые соответствуют затратам, связанным с целочисленными константами.

Недостаток данной стратегии состоит в том, что типы перечислений могут обеспечивать *статическую*, но не *строгую* безопасность типов. Мы приводили пример в главе 3:

```
public enum BorderSides { Left=1, Right=2, Top=4, Bottom=8 }
...
BorderSides b = BorderSides.Left;
b += 1234; // Ошибка не возникает!
```

Когда компилятор не имеет возможности выполнить проверку достоверности (как в показанном примере), то нет никакой подстраховки со стороны исполняющей среды в форме генерации исключения.

Может показаться, что утверждение об отсутствии разницы между экземпляром перечисления и его целочисленным значением во время выполнения вступает в противоречие со следующим кодом:

```
[Flags] public enum BorderSides { Left=1, Right=2, Top=4, Bottom=8 }
...
Console.WriteLine (BorderSides.Right.ToString());           // Right
Console.WriteLine (BorderSides.Right.GetType().Name);      // BorderSides
```

Учитывая природу экземпляра перечисления во время выполнения, можно было бы ожидать вывода на экран 2 и `Int32`! Причина такого поведения кроется в определенных уловках, предпринимаемых компилятором. Компилятор C# явно упаковывает экземпляр перечисления перед вызовом его виртуальных ме-

тодов, таких как `ToString` и `GetType`. И когда экземпляр перечисления упакован, он получает оболочку времени выполнения, которая ссылается на его тип перечисления.

Структура Guid

Структура `Guid` представляет глобально уникальный идентификатор: 16-байтовое значение, которое после генерации является почти наверняка уникальным в мире. Идентификаторы `Guid` часто используются для ключей различных видов — в приложениях и базах данных. Количество уникальных идентификаторов `Guid` составляет 2128, или $3,4 \times 10^{38}$. Статический метод `Guid.NewGuid` генерирует уникальный идентификатор `Guid`:

```
Guid g = Guid.NewGuid();  
Console.WriteLine(g.ToString()); // 0d57629c-7d6e-4847-97cb-9e2fc25083fe
```

Для создания идентификатора `Guid` с применением существующего значения предназначено несколько конструкторов. Вот два наиболее полезных из них:

```
public Guid (byte[] b); // Принимает 16-байтовый массив  
public Guid (string g); // Принимает форматированную строку
```

В случае представления в виде строки идентификатор `Guid` форматируется как шестнадцатеричное число из 32 цифр с необязательными символами — после 8-й, 12-й, 16-й и 20-й цифры. Вся строка также может быть дополнительно помещена в квадратные или фигурные скобки:

```
Guid g1 = new Guid ("{0d57629c-7d6e-4847-97cb-9e2fc25083fe}");  
Guid g2 = new Guid ("0d57629c7d6e484797cb9e2fc25083fe");  
Console.WriteLine (g1 == g2); // True
```

Будучи структурой, `Guid` поддерживает семантику типа значения; следовательно, в показанном выше примере операция эквивалентности работает нормально.

Метод `ToByteArray` преобразует `Guid` в байтовый массив.

Статическое свойство `Guid.Empty` возвращает пустой идентификатор `Guid` (со всеми нулями), который часто используется вместо `null`.

Сравнение эквивалентности

До сих пор мы предполагали, что все применяемые операции `==` и `!=` выполняли сравнение эквивалентности. Однако проблема эквивалентности является более сложной и тонкой, временами требуя использования дополнительных методов и интерфейсов. В настоящем разделе мы исследуем стандартные протоколы C# и .NET для определения эквивалентности, уделяя особое внимание следующим двум вопросам.

- Когда операции `==` и `!=` адекватны (либо неадекватны) для сравнения эквивалентности и какие существуют альтернативы?
- Как и когда должна настраиваться логика эквивалентности типа?

Но перед тем как погрузиться в исследование протоколов эквивалентности и способов их настройки мы должны взглянуть на вводные концепции эквивалентности значений и ссылочной эквивалентности.

Эквивалентность значений и ссылочная эквивалентность

Различают два вида эквивалентности.

- **Эквивалентность значений.** Два значения эквивалентны в некотором смысле.
- **Ссылочная эквивалентность.** Две ссылки ссылаются в точности на один и тот же объект.

Если только не было переопределено, то:

- типы значений применяют эквивалентность значений;
- ссылочные типы используют ссылочную эквивалентность (это переопределяется в анонимных типах и записях).

На самом деле типы значений могут применять только эквивалентность значений (если они не упакованы). Сравнение двух чисел служит простой демонстрацией эквивалентности значений:

```
int x = 5, y = 5;
Console.WriteLine (x == y);           // True (в силу эквивалентности значений)
```

Более сложная демонстрация предусматривает сравнение двух структур `DateTimeOffset`. Приведенный ниже код выводит на экран `True`, т.к. две структуры `DateTimeOffset` относятся к одной и той же точке во времени, а потому считаются эквивалентными:

```
var dt1 = new DateTimeOffset (2010, 1, 1, 1, 1, 1, TimeSpan.FromHours(8));
var dt2 = new DateTimeOffset (2010, 1, 1, 2, 1, 1, TimeSpan.FromHours(9));
Console.WriteLine (dt1 == dt2);      // True
```



Тип `DateTimeOffset` — это структура, семантика эквивалентности которой была настроена. По умолчанию структуры поддерживают специальный вид эквивалентности значений, называемый *структурной эквивалентностью*, при которой два значения считаются эквивалентными, если эквивалентны все их члены. (Вы можете удостовериться в сказанном, создав структуру и вызывав ее метод `Equals`; позже будут приведены более подробные обсуждения.)

Ссылочные типы по умолчанию поддерживают ссылочную эквивалентность. В следующем примере ссылки `f1` и `f2` не являются эквивалентными — несмотря на то, что их объекты имеют идентичное содержимое:

```
class Foo { public int X; }
...
Foo f1 = new Foo { X = 5 };
Foo f2 = new Foo { X = 5 };
Console.WriteLine (f1 == f2);      // False
```

Напротив, f3 и f1 эквивалентны, поскольку они ссылаются на тот же самый объект:

```
Foo f3 = f1;
Console.WriteLine (f1 == f3); // True
```

Позже в этом разделе мы объясним, каким образом можно настраивать ссылочные типы для обеспечения эквивалентности значений. Примером будет служить класс Uri из пространства имен System:

```
Uri uri1 = new Uri ("http://www.linqpad.net");
Uri uri2 = new Uri ("http://www.linqpad.net");
Console.WriteLine (uri1 == uri2); // True
```

Класс string обладает похожим поведением:

```
var s1 = "http://www.linqpad.net";
var s2 = "http://" + "www.linqpad.net";
Console.WriteLine (s1 == s2); // True
```

Стандартные протоколы эквивалентности

Существуют три стандартных протокола, которые типы могут соблюдать при сравнении эквивалентности:

- операции == и !=;
- виртуальный метод Equals в классе object;
- интерфейс IEquatable<T>.

В добавок есть *подключаемые* протоколы и интерфейс IStructuralEquatable, который мы рассмотрим в главе 7.

Операции == и !=

Вы уже видели в многочисленных примерах, каким образом стандартные операции == и != производят сравнения равенства/неравенства. Тонкости с == и != возникают из-за того, что они являются *операциями*, а потому распознаются статически (на самом деле они реализованы в виде статических функций). Следовательно, когда вы используете операцию == или !=, то решение о том, какой тип будет выполнять сравнение, принимается *на этапе компиляции*, и виртуальное поведение в игру не вступает. Обычно подобное и желательно. В показанном далее примере компилятор жестко привязывает операцию == к типу int, т.к. переменные x и y имеют тип int:

```
int x = 5;
int y = 5;
Console.WriteLine (x == y); // True
```

Но в представленном ниже примере компилятор привязывает операцию == к типу object:

```
object x = 5;
object y = 5;
Console.WriteLine (x == y); // False
```

Поскольку `object` — класс (т.е. ссылочный тип), операция `==` типа `object` применяет для сравнения `x` и `y` *ссылочную эквивалентность*. Результатом будет `false`, потому что `x` и `y` ссылаются на разные упакованные объекты в куче.

Виртуальный метод `Object.Equals`

Для корректного сравнения `x` и `y` в предыдущем примере мы можем использовать виртуальный метод `Equals`. Метод `Equals` определен в классе `System.Object`, поэтому он доступен всем типам:

```
object x = 5;
object y = 5;
Console.WriteLine (x.Equals (y));      // True
```

Метод `Equals` распознается во время выполнения — согласно действительному типу объекта. В данном случае вызывается метод `Equals` типа `Int32`, который применяет к операндам *эквивалентность значений*, возвращая `true`. Со ссылочными типами метод `Equals` по умолчанию выполняет сравнение ссылочной эквивалентности; для структур метод `Equals` производит сравнение структурной эквивалентности, вызывая `Equals` на каждом их поле.

Чем объясняется подобная сложность?

У вас может возникнуть вопрос, почему разработчики C# не попытались избежать проблемы, сделав операцию `==` виртуальной и таким образом функционально идентичной `Equals`? На то было несколько причин.

- Если первый operand равен `null`, то метод `Equals` терпит неудачу с генерацией исключения `NullReferenceException`, а статическая операция — нет.
- Поскольку операция `==` распознается статически, она выполняется очень быстро. Это означает, что вы можете записывать код с интенсивными вычислениями без нанесения ущерба производительности — и без необходимости в изучении другого языка, такого как C++.
- Иногда полезно обеспечить для операции `==` и метода `Equals` разные определения эквивалентности. Мы опишем такой сценарий позже в разделе.

По существу сложность реализованного проектного решения отражает сложность самой ситуации: концепция эквивалентности охватывает большое число сценариев.

Следовательно, метод `Equals` подходит для сравнения двух объектов в независимой от типа манере. Показанный ниже метод сравнивает два объекта любого типа:

```
public static bool AreEqual (object obj1, object obj2)
    => obj1.Equals (obj2);
```

Тем не менее, есть один сценарий, при котором такой подход не работает. Если первый аргумент равен null, тогда генерируется исключение NullReferenceException. Ниже приведена исправленная версия метода:

```
public static bool AreEqual (object obj1, object obj2)
{
    if (obj1 == null) return obj2 == null;
    return obj1.Equals (obj2);
}
```

Или более лаконично:

```
public static bool AreEqual (object obj1, object obj2)
=> obj1 == null ? obj2 == null : obj1.Equals (obj2);
```

Статический метод Object.Equals

В классе System.Object определен статический вспомогательный метод, который выполняет работу метода AreEqual из предыдущего примера. Он имеет имя Equals (точно как у виртуального метода), но никаких конфликтов не возникает, потому что данный метод принимает два аргумента:

```
public static bool Equals (object objA, object objB)
```

Статический метод Object.Equals предоставляет алгоритм сравнения эквивалентности, безопасный к null, который предназначен для ситуаций, когда типы не известны на этапе компиляции:

```
object x = 3, y = 3;
Console.WriteLine (object.Equals (x, y)); // True
x = null;
Console.WriteLine (object.Equals (x, y)); // False
y = null;
Console.WriteLine (object.Equals (x, y)); // True
```

Метод полезен при написании обобщенных типов. Приведенный ниже код не скомпилируется, если вызов Object.Equals заменить операцией == или !=:

```
class Test <T>
{
    T _value;
    public void SetValue (T newValue)
    {
        if (!object.Equals (newValue, _value))
        {
            _value = newValue;
            OnValueChanged();
        }
    }
    protected virtual void OnValueChanged() { ... }
}
```

Операции здесь запрещены, потому что компилятор не может выполнить связывание со статическим методом неизвестного типа.



Более аккуратный способ реализации такого сравнения предусматривает использование класса EqualityComparer<T>. Преимущество заключается в том, что тогда удается избежать упаковки:

```
if (!EqualityComparer<T>.Default.Equals (newValue, _value))
```

Мы обсудим класс EqualityComparer<T> более подробно в разделе “Подключение протоколов эквивалентности и порядка” главы 7.

Статический метод Object.ReferenceEquals

Иногда требуется принудительно применять сравнение ссылочной эквивалентности. Статический метод Object.ReferenceEquals делает именно это:

```
Widget w1 = new Widget();
Widget w2 = new Widget();
Console.WriteLine (object.ReferenceEquals (w1, w2)); // False
class Widget { ... }
```

Поступать так может быть необходимо из-за того, что в классе Widget допускается переопределение виртуального метода Equals, в результате чего w1.Equals(w2) будет возвращать true. Более того, в Widget возможна перегрузка операции == и сравнение w1==w2 также будет давать true. В подобных случаях вызов Object.ReferenceEquals гарантирует использование нормальной семантики ссылочной эквивалентности.



Еще один способ обеспечения сравнения ссылочной эквивалентности предусматривает приведение значений к object с последующим применением операции ==.

Интерфейс IEquatable<T>

Последствием вызова метода Object.Equals является упаковка типов значений. В сценариях с высокой критичностью к производительности это не желательно, т.к. по сравнению с действительным сравнением упаковка будет относительно затратной в плане ресурсов. Решение данной проблемы появилось в C# 2.0 — интерфейс IEquatable<T>:

```
public interface IEquatable<T>
{
    bool Equals (T other);
}
```

Идея заключается в том, что реализация интерфейса IEquatable<T> обеспечивает такой же результат, как и вызов виртуального метода Equals из object, но только быстрее. Интерфейс IEquatable<T> реализован большинством базовых типов .NET. Интерфейс IEquatable<T> можно использовать как ограничение в обобщенном типе:

```
class Test<T> where T : IEquatable<T>
{
```

```
public bool IsEqual (T a, T b)
{
    return a.Equals (b); // Упаковка с обобщенным типом T не происходит
}
```

Если убрать ограничение обобщенного типа, то класс по-прежнему скомпилируется, но `a.Equals(b)` будет связываться с более медленным методом `object.Equals` (более медленным, исходя из предположения, что `T` — тип значения).

Когда метод Equals и операция == не эквивалентны

Ранее мы упоминали, что временами для операции `==` и метода `Equals` полезно применять разные определения эквивалентности. Например:

```
double x = double.NaN;
Console.WriteLine (x == x);           // False
Console.WriteLine (x.Equals (x));     // True
```

Операция `==` в типе `double` гарантирует, что значение `NaN` никогда не может быть равным чему-либо еще — даже другому значению `NaN`. Это наиболее естественно с математической точки зрения и отражает внутреннее поведение центрального процессора. Однако метод `Equals` обязан использовать *рефлексивную* эквивалентность; другими словами, вызов `x.Equals(x)` должен всегда возвращать `true`.

На такое поведение `Equals` полагаются коллекции и словари; в противном случае они не смогут найти ранее сохраненный в них элемент.

Обеспечение отличающегося поведения эквивалентности в `Equals` и `==` для типов значений предпринимается довольно редко. Более распространенный сценарий относится к ссылочным типам и возникает, когда разработчик настраивает метод `Equals` так, что тот реализует эквивалентность значений, оставляя операцию `==` выполняющей (стандартную) ссылочную эквивалентность. Именно это делает класс `StringBuilder`:

```
var sb1 = new StringBuilder ("foo");
var sb2 = new StringBuilder ("foo");
Console.WriteLine (sb1 == sb2);           // False (ссылочная эквивалентность)
Console.WriteLine (sb1.Equals (sb2));     // True (эквивалентность значений)
```

Теперь давайте посмотрим, как настраивать эквивалентность.

Эквивалентность и специальные типы

Вспомним стандартное поведение сравнения эквивалентности:

- типы значений применяют *эквивалентность значений*;
- ссылочные типы используют *ссылочную эквивалентность*, если это не переопределено (как в случае анонимных типов и записей).

Кроме того:

- по умолчанию метод `Equals` структуры применяет *структурную эквивалентность значений* (т.е. сравниваются все поля в структурах).

При написании типа такое поведение иногда имеет смысл переопределять. Существуют две ситуации, когда требуется переопределение:

- для изменения смысла эквивалентности;
- для ускорения сравнений эквивалентности в структурах.

Изменение смысла эквивалентности

Изменять смысл эквивалентности необходимо тогда, когда стандартное поведение операции `==` и метода `Equals` неестественно для типа и *не является тем поведением, которое будет ожидать потребитель*. Примером может служить `DateTimeOffset` — структура с двумя закрытыми полями: UTC-значение `DateTime` и целочисленное смещение. При написании подобного типа может понадобиться сделать так, чтобы сравнение эквивалентности принимало во внимание только поле с UTC-значением `DateTime` и не учитывало поле смещения. Другим примером являются числовые типы, поддерживающие значения `NaN`, вроде `float` и `double`. Если вы реализуете типы такого рода самостоятельно, то наверняка захотите обеспечить поддержку логики сравнения с `NaN` в сравнениях эквивалентности.

В случае классов иногда более естественно по умолчанию предлагать поведение эквивалентности значений, а не ссылочной эквивалентности. Это часто встречается в небольших классах, которые хранят простую порцию данных — например, `System.Uri` (или `System.String`).

С записями компилятор автоматически реализует структурную эквивалентность (сравнивая каждое поле). Тем не менее, иногда в процесс могут быть вовлечены поля, которые сравнивать нежелательно, или объекты, которые требуют специальной логики сравнения, такие как коллекции. Процесс переопределения эквивалентности с записями слегка отличается, поскольку записи следуют особому шаблону, который разработан, чтобы хорошо сочетаться с их правилами для наследования.

Ускорение сравнений эквивалентности для структур

Стандартный алгоритм сравнения *структурной эквивалентности* для структур является относительно медленным. Взяв на себя контроль над таким процессом за счет переопределения метода `Equals`, можно улучшить производительность в пять раз. Перегрузка операции `==` и реализация интерфейса `IEquatable<T>` делают возможными неупаковывающие сравнения эквивалентности, что также может ускорить производительность в пять раз.



Переопределение семантики эквивалентности для ссылочных типов не дает преимуществ в плане производительности. Стандартный алгоритм сравнения ссылочной эквивалентности уже характеризуется высокой скоростью, т.к. он просто сравнивает две 32- или 64-битные ссылки.

На самом деле существует другой, довольно специфический случай для настройки эквивалентности, который касается совершенствования алгоритма хеширования структуры в целях достижения лучшей производительности в

хеш-таблице. Это проистекает из того факта, что сравнение эквивалентности и хеширование объединены в общий механизм. Хеширование рассматривается чуть позже в главе.

Как переопределить семантику эквивалентности

Чтобы переопределить эквивалентность для классов и структур, понадобится выполнить следующие шаги.

1. Переопределить методы `GetHashCode` и `Equals`.
2. (Дополнительно) перегрузить операции `!=` и `==`.
3. (Дополнительно) реализовать интерфейс `IEquatable<T>`.

Для записей процесс отличается (и он проще), потому что компилятор уже переопределяет методы и операции сравнения эквивалентности в соответствии с собственным специальным шаблоном. Если вы хотите вмешаться, то должны следовать этому шаблону, т.е. записывать метод `Equals` с сигнатурой следующего вида:

```
record Test (int X, int Y)
{
    public virtual bool Equals (Test t) => t != null && t.X == X && t.Y == Y;
}
```

Обратите внимание, что метод `Equals` определен как `virtual` (не `override`) и принимает фактический тип записи (в данном случае `Test`, а не `object`). Компилятор обнаружит, что ваш метод имеет “корректную” сигнатуру и вставит его.

Как и в случае классов или структур, вам также потребуется переопределить метод `GetHashCode`. Перегружать операции `!=` и `==` или реализовывать интерфейс `IEquatable<T>` не нужно (и не следует), т.к. это уже сделано за вас.

Переопределение метода `GetHashCode`

Может показаться странным, что в классе `System.Object` — с его небольшим набором членов — определен метод специализированного и узкого назначения. Такому описанию соответствует виртуальный метод `GetHashCode` в `Object`, который существует главным образом для извлечения выгоды следующими двумя типами:

```
System.Collections.Hashtable
System.Collections.Generic.Dictionary< TKey, TValue >
```

Они представляют собой *хеш-таблицы* — коллекции, в которых каждый элемент имеет ключ, используемый для сохранения и извлечения. В хеш-таблице применяется очень специфичная стратегия для эффективного выделения памяти под элементы на основе их ключей. Она требует, чтобы каждый ключ имел число типа `Int32`, или *хеш-код*. Хеш-код не обязан быть уникальным для каждого ключа, но должен быть насколько возможно разнообразным, чтобы обеспечить хорошую производительность хеш-таблицы. Хеш-таблицы считаются настолько важными, что метод `GetHashCode` определен в классе `System.Object`, а потому любой тип может выдавать хеш-код.



Хеш-таблицы детально описаны в главе 7.

Ссылочные типы и типы значений имеют стандартные реализации метода `GetHashCode`, т.е. переопределять данный метод не придется, если *только не переопределяется* метод `Equals`. (И если вы переопределяете метод `GetHashCode`, то почти наверняка захотите также переопределить метод `Equals`.)

Существуют и другие правила, касающиеся переопределения метода `Object.GetHashCode`.

- Он обязан возвращать одно и то же значение на двух объектах, для которых метод `Equals` возвращает `true` (поэтому `GetHashCode` и `Equals` переопределяются вместе).
- Он не должен генерировать исключения.
- Он должен возвращать одно и то же значение при многократных вызовах на том же самом объекте (если только объект не изменился).

Для достижения максимальной производительности в хеш-таблицах метод `GetHashCode` должен быть написан так, чтобы минимизировать вероятность того, что два разных значения получат один и тот же хеш-код. Такое требование порождает третью причину переопределения методов `Equals` и `GetHashCode` в структурах — предоставление алгоритма хеширования, который эффективнее стандартного. Стандартная реализация для структур возлагается на исполняющую среду и может основываться на каждом поле в структуре.

Напротив, стандартная реализация метода `GetHashCode` для классов основана на внутреннем маркере объекта, который уникален для каждого экземпляра в текущей реализации, предлагаемой CLR.



Если хеш-код объекта изменяется после того, как он был добавлен как ключ в словарь, то объект больше не будет доступен в словаре. Ситуацию подобного рода можно предотвратить за счет базирования вычислений хеш-кодов на неизменяемых полях.

Вскоре мы рассмотрим завершенный пример, иллюстрирующий переопределение метода `GetHashCode`.

Переопределение метода `Equals`

Ниже перечислены постулаты, касающиеся метода `Object.Equals`.

- Объект не может быть эквивалентен `null` (если только он не относится к типу, допускающему значение `null`).
- Эквивалентность *рефлексивна* (объект эквивалентен самому себе).
- Эквивалентность *симметрична* (если `a.Equals(b)`, то `b.Equals(a)`).
- Эквивалентность *транзитивна* (если `a.Equals(b)` и `b.Equals(c)`, то `a.Equals(c)`).
- Операции эквивалентности повторяемы и надежны (они не генерируют исключений).

Перегрузка операций == и !=

В дополнение к переопределению метода `Equals` можно необязательно перегрузить операции `==` и `!=`. Так почти всегда поступают для структур, потому что в противном случае операции `==` и `!=` просто не будут работать для типа.

В случае классов возможны два пути:

- оставить операции `==` и `!=` незатронутыми — тогда они будут использовать ссылочную эквивалентность;
- перегрузить `==` и `!=` вместе с `Equals`.

Первый подход чаще всего применяется в специальных типах — особенно в изменяемых типах. Он гарантирует ожидаемое поведение, заключающееся в том, что операции `==` и `!=` должны обеспечивать ссылочную эквивалентность со ссылочными типами, и позволяет избежать путаницы у потребителей специальных типов. Пример уже приводился ранее:

```
var sb1 = new StringBuilder ("foo");
var sb2 = new StringBuilder ("foo");
Console.WriteLine (sb1 == sb2);           // False (ссылочная эквивалентность)
Console.WriteLine (sb1.Equals (sb2));    // True (эквивалентность значений)
```

Второй подход имеет смысл использовать с типами, для которых потребителю никогда не понадобится ссылочная эквивалентность. Такие типы обычно неизменяемы — как классы `string` и `System.Uri` — и временами являются хорошими кандидатами на реализацию в виде структур.



Хотя возможна перегрузка операции `!=` с приданием ей смысла, отличающегося от `! (==)`, на практике так поступают редко. Примером могут служить типы, определенные в пространстве имен `System.Data.SqlTypes`, которые представляют собственные типы столбцов в SQL Server. Они соответствуют логике сравнения значений `null` в базах данных, при которой операции `=` и `<>` (`==` и `!=` в C#) возвращают значение `null`, если любой из operandов имеет значение `null`.

Реализация интерфейса `IEquatable<T>`

Для полноты при переопределении метода `Equals` также неплохо реализовать интерфейс `IEquatable<T>`. Его результаты должны всегда соответствовать результатам переопределенного метода `Equals` класса `Object`. Реализация `IEquatable<T>` не требует никаких усилий по программированию, если реализация метода `Equals` структурирована, как демонстрируется в показанном далее примере.

Пример: структура `Area`

Предположим, что необходима структура для представления области, ширина и высота которой взаимозаменяемы. Другими словами, 5×10 эквивалентно 10×5 . (Такой тип был бы подходящим в алгоритме упорядочения прямоугольных форм.)

Ниже приведен полный код:

```
public struct Area : IEquatable<Area>
{
    public readonly int Measure1;
    public readonly int Measure2;

    public Area (int m1, int m2)
    {
        Measure1 = Math.Min (m1, m2);
        Measure2 = Math.Max (m1, m2);
    }

    public override bool Equals (object other)
        => other is Area a && Equals (a); // Вызывает метод, определенный ниже

    public bool Equals (Area other) // Реализует IEquatable<Area>
        => Measure1 == other.Measure1 && Measure2 == other.Measure2;

    public override int GetHashCode()
        => GetHashCode.Combine (Measure1, Measure2);

    // Обратите внимание, что мы вызываем статический метод Equals в классе
    // object: это выполняет проверку на null перед вызовом нашего метода
    // (экземпляра) Equals.

    public static bool operator == (Area a1, Area a2) => Equals (a1, a2);
    public static bool operator != (Area a1, Area a2) => !(a1 == a2);
}
```



Начиная с версии C# 10, процесс можно сократить с помощью записей. Объявляя это как структуру типа записи, можно избавиться от всего кода, следующего за конструктором.

В реализации метода GetHashCode мы применяли функцию GetHashCode.Combine из .NET для получения составного хеш-кода. (До появления указанной функции популярный подход предусматривал умножение каждого значения на некоторое простое число и затем их сложение.)

Вот как можно использовать структуру Area:

```
Area a1 = new Area (5, 10);
Area a2 = new Area (10, 5);
Console.WriteLine (a1.Equals (a2));      // True
Console.WriteLine (a1 == a2);            // True
```

Подключаемые компараторы эквивалентности

Если необходимо, чтобы тип задействовал другую семантику эквивалентности только в конкретном сценарии, то можно воспользоваться подключаемым компаратором эквивалентности IEqualityComparer. Он особенно удобен в сочетании со стандартными классами коллекций, и мы рассмотрим такие вопросы в разделе “Подключение протоколов эквивалентности и порядка” главы 7.

Сравнение порядка

Помимо определения стандартных протоколов для эквивалентности в C# и .NET также имеются стандартные протоколы для определения порядка, в котором один объект соотносится с другим. Базовые протоколы таковы:

- интерфейсы `IComparable` (`IComparable` и `IComparable<T>`);
- операции `>` и `<`.

Интерфейсы `IComparable` применяются универсальными алгоритмами сортировки. В следующем примере статический метод `Array.Sort` работает из-за того, что класс `System.String` реализует интерфейсы `IComparable`:

```
string[] colors = { "Green", "Red", "Blue" };
Array.Sort (colors);
foreach (string c in colors) Console.Write (c + " ");      // Blue Green Red
```

Операции `<` и `>` более специализированы и предназначены в основном для числовых типов. Поскольку эти операции распознаются статически, они могут транслироваться в высокоэффективный байт-код, подходящий для алгоритмов с интенсивными вычислениями.

В .NET также предлагаются подключаемые протоколы упорядочения через интерфейсы `IComparer`. Мы опишем их в финальном разделе главы 7.

Интерфейсы `IComparable`

Интерфейсы `IComparable` определены следующим образом:

```
public interface IComparable      { int CompareTo (object other); }
public interface IComparable<in T> { int CompareTo (T other); }
```

Указанные два интерфейса представляют ту же самую функциональность. Для типов значений обобщенный интерфейс, безопасный к типам, оказывается быстрее, чем необобщенный интерфейс. В обоих случаях метод `CompareTo` работает так, как описано ниже:

- если `a` находится после `b`, то `a.CompareTo(b)` возвращает положительное число;
- если `a` такое же, как и `b`, то `a.CompareTo(b)` возвращает 0;
- если `a` находится перед `b`, то `a.CompareTo(b)` возвращает отрицательное число.

Например:

```
Console.WriteLine ("Beck".CompareTo ("Anne"));           // 1
Console.WriteLine ("Beck".CompareTo ("Beck"));           // 0
Console.WriteLine ("Beck".CompareTo ("Chris"));          // -1
```

Большинство базовых типов реализуют оба интерфейса `IComparable`. Эти интерфейсы также иногда реализуются при написании специальных типов. Вскоре мы рассмотрим пример.

IComparable или Equals

Предположим, что в некотором типе переопределен метод Equals и тип также реализует интерфейсы IComparable. Вы ожидаете, что когда метод Equals возвращает true, то метод CompareTo должен возвращать 0. И будете правы. Но вот в чем загвоздка:

- когда Equals возвращает false, метод CompareTo может возвращать то, что ему заблагорассудится (до тех пор, пока это внутренне непротиворечиво)!

Другими словами, эквивалентность может быть “придирчивее”, чем сравнение, но не наоборот (стоит нарушить правило и алгоритмы сортировки перестанут работать). Таким образом, метод CompareTo может сообщать: “Все объекты равны”, тогда как метод Equals сообщает: “Но некоторые из них ‘более равны’, чем другие”.

Великолепным примером может служить класс System.String. Метод Equals и операция == в String используют *ординальное* сравнение, при котором сравниваются значения кодовых точек Unicode каждого символа. Однако метод CompareTo применяет сравнение, зависящее от культуры, что иногда приводит к помещению более одного символа в одну и ту же позицию сортировки.

В главе 7 мы обсудим подключаемый протокол упорядочения IComparer, который позволяет указывать альтернативный алгоритм упорядочения при сортировке или при создании экземпляра сортированной коллекции. Специальная реализация IComparer может и дальше расширять разрыв между CompareTo и Equals — например, нечувствительный к регистру компаратор строк будет возвращать 0 в качестве результата сравнения "A" и "a". Тем не менее, обратное правило по-прежнему применимо: метод CompareTo никогда не может быть придирчивее, чем Equals.



При реализации интерфейсов IComparable в специальном типе нарушения данного правила можно избежать, поместив в первую строку метода CompareTo следующий оператор:

```
if (Equals (other)) return 0;
```

После этого можно возвращать то, что нравится, при условии соблюдения согласованности!

Операции > и <

В некоторых типах определены операции > и <, например:

```
bool after2010 = DateTime.Now > new DateTime (2010, 1, 1);
```

Можно ожидать, что операции > и <, когда они реализованы, должны быть функционально согласованными с интерфейсами IComparable. Такая стандартная практика повсеместно соблюдается в .NET.

Также стандартной практикой является реализация интерфейсов IComparable всякий раз, когда операции > и < перегружаются, хотя обратное утверждение неверно. В действительности большинство типов .NET, реализующих

`IComparable`, не перегружают операции `>` и `<`. Это отличается от ситуации с эквивалентностью, при которой в случае переопределения метода `Equals` обычно перегружается операция `==`.

Как правило, операции `>` и `<` перегружаются только в перечисленных ниже случаях.

- Тип обладает строгой внутренне присущей концепцией “больше чем” и “меньше чем” (в противоположность более широким концепциям “находится перед” и “находится после”, принятым в интерфейсе `IComparable`).
- Существует только один способ или контекст, в котором производится сравнение.
- Результат инвариантен для различных культур.

Класс `System.String` не удовлетворяет последнему пункту: результаты сравнения строк в разных языках могут варьироваться. Следовательно, тип `string` не поддерживает операции `>` и `<`:

```
bool error = "Beck" > "Anne"; // Ошибка на этапе компиляции
```

Реализация интерфейсов `IComparable`

В следующей структуре, представляющей музыкальную ноту, мы реализуем интерфейсы `IComparable`, а также перегружаем операции `<` и `>`. Для полноты мы также переопределяем методы `Equals/GetHashCode` и перегружаем операции `==` и `!=`:

```
public struct Note : IComparable<Note>, IEquatable<Note>, IComparable
{
    int _semitonesFromA;
    public int SemitonesFromA { get { return _semitonesFromA; } }

    public Note (int semitonesFromA)
    {
        _semitonesFromA = semitonesFromA;
    }

    public int CompareTo (Note other) // Обобщенный интерфейс IComparable<T>
    {
        if (Equals (other)) return 0; // Отказоустойчивая проверка
        return _semitonesFromA.CompareTo (other._semitonesFromA);
    }

    int IComparable.CompareTo (object other) // Необобщенный интерфейс IComparable
    {
        if (!(other is Note))
            throw new InvalidOperationException ("CompareTo: Not a note");
            // не нота
        return CompareTo ((Note) other);
    }

    public static bool operator < (Note n1, Note n2)
        => n1.CompareTo (n2) < 0;

    public static bool operator > (Note n1, Note n2)
        => n1.CompareTo (n2) > 0;
}
```

```

public bool Equals (Note other) // для IEquatable<Note>
    => _semitonesFromA == other._semitonesFromA;
public override bool Equals (object other)
{
    if (!(other is Note)) return false;
    return Equals ((Note) other);
}

public override int GetHashCode() => _semitonesFromA.GetHashCode();
// Вызвать статический метод Equals, чтобы гарантировать
// надлежащую обработку значений null:
public static bool operator == (Note n1, Note n2) => Equals (n1, n2);
public static bool operator != (Note n1, Note n2) => !(n1 == n2);
}

```

Служебные классы

Класс Console

Статический класс `Console` обрабатывает ввод-вывод для консольных приложений. В приложении командной строки (консольном приложении) ввод поступает с клавиатуры через методы `Read`, `.ReadKey` и `.ReadLine`, а вывод осуществляется в текстовое окно посредством методов `Write` и `WriteLine`. Управлять позицией и размерами такого окна можно с помощью свойств `WindowLeft`, `WindowTop`, `WindowHeight` и `WindowWidth`. Можно также изменять свойства `BackgroundColor` и `ForegroundColor` и манипулировать курсором через свойства `CursorLeft`, `CursorTop` и `CursorSize`:

```

Console.WindowWidth = Console.LargestScreenWidth;
Console.ForegroundColor = ConsoleColor.Green;
Console.Write ("test... 50%");
Console.CursorLeft -= 3;
Console.Write ("90%"); // test... 90%

```

Методы `Write` и `WriteLine` перегружены для приема смешанной форматной строки (см. раздел “Метод `String.Format` и смешанные форматные строки” ранее в главе). Тем не менее, ни один из методов не принимает поставщик формата, так что вы привязаны к `CultureInfo.CurrentCulture`. (Разумеется, существует обходной путь, предусматривающий явный вызов `string.Format`.)

Свойство `Console.Out` возвращает объект `TextWriter`. Передача `Console.Out` методу, который ожидает `TextWriter` — удобный способ заставить этот метод выводить что-либо на консоль в целях диагностики.

Можно также перенаправлять потоки ввода и вывода на консоль с помощью методов `SetIn` и `SetOut`:

```

// Сначала сохранить существующий объект записи вывода:
System.IO.TextWriter oldOut = Console.Out;

// Перенаправить консольный вывод в файл:
using (System.IO.TextWriter w = System.IO.File.CreateText
        ("e:\\output.txt"))

```

```
{  
    Console.SetOut (w);  
    Console.WriteLine ("Hello world");  
}  
  
// Восстановить стандартный консольный вывод:  
Console.SetOut (oldOut);
```

Работа потоков данных и объектов записи текста обсуждается в главе 15.



При запуске приложений WPF или Windows Forms в среде Visual Studio консольный вывод автоматически перенаправляется в окно вывода Visual Studio (в режиме отладки). Такая особенность делает метод `Console.WriteLine` полезным для диагностических целей, хотя в большинстве случаев более подходящими будут классы `Debug` и `Trace` из пространства имен `System.Diagnostics` (см. главу 13).

Класс `Environment`

Статический класс `System.Environment` предлагает набор полезных свойств, предназначенных для взаимодействия с разнообразными сущностями.

Файлы и папки

`CurrentDirectory`, `SystemDirectory`, `CommandLine`

Компьютер и операционная система

`MachineName`, `ProcessorCount`, `OSVersion`, `NewLine`

Пользователь, вошедший в систему

`UserName`, `UserInteractive`, `UserDomainName`

Диагностика

`TickCount`, `StackTrace`, `WorkingSet`, `Version`

Дополнительные папки можно получить вызовом метода `GetFolderPath`; мы рассмотрим его в разделе “Операции с файлами и каталогами” главы 15.

Обращаться к переменным среды операционной системы (которые просматриваются за счет ввода `set` в командной строке) можно с помощью следующих трех методов: `GetEnvironmentVariable`, `GetEnvironmentVariables` и `SetEnvironmentVariable`.

Свойство `ExitCode` позволяет установить код возврата, предназначенный для ситуации, когда программа запускается из команды либо из пакетного файла, а метод `FailFast` завершает программу немедленно, не выполняя очистку.

Класс `Environment`, доступный приложениям из Магазина Microsoft, предлагаёт только ограниченное количество членов (`ProcessorCount`, `NewLine` и `FailFast`).

Класс `Process`

Класс `Process` из пространства имен `System.Diagnostics` позволяет запускать новый процесс. (В главе 13 будет описано, как его можно применять также для взаимодействия с другими процессами, выполняющимися на компьютере.)



По причинам, связанным с безопасностью, класс `Process` не доступен приложениям из Магазина Microsoft, поэтому запускать произвольные процессы невозможно. Взамен должен использоваться класс `Windows.System.Launcher` для “запуска” URI или файла, к которому имеется доступ, например:

```
Launcher.LaunchUriAsync (new Uri ("http://albahari.com"));
var file = await KnownFolders.DocumentsLibrary.GetFileAsync("foo.txt");
Launcher.LaunchFileAsync (file);
```

Такой код приводит к открытию URI или файла с применением любой программы, ассоциированной со схемой URI или файловым расширением. Чтобы все работало, программа должна функционировать на переднем плане.

Статический метод `Process.Start` имеет несколько перегруженных версий; простейшая из них принимает имя файла с необязательными аргументами:

```
Process.Start ("notepad.exe");
Process.Start ("notepad.exe", "e:\\file.txt");
```

Наиболее гибкая перегруженная версия принимает экземпляр `ProcessStartInfo`. С его помощью можно захватывать и перенаправлять потоки ввода, вывода и ошибок запущенного процесса (если свойство `UseShellExecute` установлено в `false`). В следующем коде захватывается вывод утилиты `ipconfig`:

```
ProcessStartInfo psi = new ProcessStartInfo
{
    FileName = "cmd.exe",
    Arguments = "/c ipconfig /all",
    RedirectStandardOutput = true,
    UseShellExecute = false
};
Process p = Process.Start (psi);
string result = p.StandardOutput.ReadToEnd();
Console.WriteLine (result);
```

Если вывод не перенаправлен, тогда метод `Process.Start` выполняет программу параллельно с вызывающей программой. Если нужно ожидать завершения нового процесса, то можно вызвать метод `WaitForExit` на объекте `Process` с указанием необязательного тайм-аута.

Перенаправление потоков вывода и ошибок

Когда свойство `UseShellExecute` установлено в `false` (как принято по умолчанию в .NET), вы можете захватывать стандартные потоки ввода, вывода и ошибок, после чего производить с ними запись/чтение через свойства `StandardInput`, `StandardOutput` и `StandardError`.

Сложность возникает при необходимости перенаправления и стандартного потока вывода, и стандартного потока ошибок, поскольку обычно вам не будет известно, в каком порядке читать данные из каждого потока (т.к. невозможно знать заранее, каким образом чередуются данные). Решение заключается в том, чтобы читать сразу оба потока, чего можно добиться, читая (хотя бы) из одного потока асинхронно. Ниже описано, как нужно поступать.

- Предусмотрите обработку событий `OutputDataReceived` и/или `ErrorDataReceived`, которые инициируются при получении данных вывода/ошибки.
- Вызовите метод `BeginOutputReadLine` и/или `BeginErrorReadLine`, что включает упомянутые выше события.

Следующий метод запускает исполняемый модуль, одновременно захватывая потоки вывода и ошибок:

```
(string output, string errors) Run (string exePath, string args = "")  
{  
    using var p = Process.Start (new ProcessStartInfo (exePath, args)  
    {  
        RedirectStandardOutput = true,  
        RedirectStandardError = true, UseShellExecute = false,  
    });  
    var errors = new StringBuilder ();  
    // Читать из потока ошибок асинхронно...  
    p.ErrorDataReceived += (sender, errorArgs) =>  
    {  
        if (errorArgs.Data != null) errors.AppendLine (errorArgs.Data);  
    };  
    p.BeginErrorReadLine ();  
    // ...наряду с чтением потока вывода синхронно:  
    string output = p.StandardOutput.ReadToEnd();  
    p.WaitForExit();  
    return (output, errors.ToString());  
}
```

Флаг `UseShellExecute`



В .NET 5+ (и .NET Core) флаг `UseShellExecute` по умолчанию установлен в `false`, тогда как в .NET Framework его стандартным значением было `true`. Поскольку это критическое изменение, при переносе кода из .NET Framework стоит проверить все вызовы метода `Process.Start`.

Флаг `UseShellExecute` изменяет способ запуска процесса средой CLR. Когда свойство `UseShellExecute` установлено в `true`, вы можете выполнять перечисленные ниже действия.

- Указывать путь к файлу или документу, а не к исполняемому модулю (в результате чего операционная система открывает файл или документ с помощью ассоциированного приложения).
- Указывать URL (в результате чего операционная система перейдет по этому URL в стандартном веб-браузере).
- (Только в Windows.) Указывать команду (такую как `runas` для запуска процесса с правами, повышенными до администратора).

Недостаток заключается в том, что перенаправление потоков ввода или вывода невозможно. Если вас интересует перенаправление при запуске файла или документа, то существует обходной способ — установите `UseShellExecute` в

`false` и вызовите процесс командной строки (`cmd.exe`) с переключателем `/c`, как делалось ранее в отношении вызова `ipconfig`.

В среде Windows флаг `UseShellExecute` инструктирует CLR о необходимости использования Windows-функции `ShellExecute`, а не `CreateProcess`. В среде Linux флаг `UseShellExecute` указывает CLR о том, что нужно вызвать `xdg-open`, `gnome-open` или `kfmclient`.

Класс `AppContext`

Статический класс `System.AppContext` предлагает два полезных свойства.

- `BaseDirectory` возвращает папку, в которой было запущено приложение. Такая папка важна для распознавания сборок (поиска и загрузки зависимостей) и нахождения конфигурационных файлов (таких как `appsettings.json`).
- `TargetFrameworkName` сообщает имя и версию исполняющей среды .NET, на которую нацелено приложение (как указано в его файле `.runtimeconfig.json`). Она может быть более старой, чем фактически используемая исполняющая среда.

В добавок класс `System.AppContext` ведет глобальный словарь булевых значений со строковыми ключами, предназначенный для разработчиков библиотек в качестве стандартного механизма, который позволяет потребителям включать и отключать новые функциональные средства. Подобный нетипизированный подход имеет смысл применять с экспериментальными функциональными средствами, которые желательно сохранять недокументированными для большинства пользователей.

Потребитель библиотеки требует, чтобы определенное функциональное средство было включено, следующим образом:

```
AppContext.SetSwitch ("MyLibrary.SomeBreakingChange", true);
```

Затем код внутри библиотеки может проверять признак включения функционального средства:

```
bool isDefined, switchValue;
isDefined = AppContext.TryGetSwitch ("MyLibrary.SomeBreakingChange",
                                    out switchValue);
```

Метод `TryGetSwitch` возвращает `false`, если признак включения не определен; это позволяет различать неопределенный признак включения от признака, значение которого установлено в `false`, когда в таком действии возникнет необходимость.



По иронии судьбы проектное решение, положенное в основу метода `TryGetSwitch`, иллюстрирует то, как не следует разрабатывать API-интерфейсы. Параметр `out` является излишним, а взамен метод должен возвращать допускающий `null` тип `bool`, который принимает значение `true`, `false` или же `null` для неопределенного признака включения. В таком случае вот как его можно было бы использовать:

```
bool switchValue = AppContext.GetSwitch ("...") ?? false;
```




Коллекции

В .NET имеется стандартный набор типов для хранения и управления коллекциями объектов. В него входят списки с изменяемыми размерами, связные списки, отсортированные и несортированные словари и массивы. Из всего перечисленного только массивы являются частью языка C#; остальные коллекции представляют собой просто классы, экземпляры которых можно создавать подобно любым другим классам.

Типы в библиотеке .NET BCL для коллекций могут быть разделены на следующие категории:

- интерфейсы, которые определяют стандартные протоколы коллекций;
- готовые к использованию классы коллекций (списки, словари и т.д.);
- базовые классы, которые позволяют создавать коллекции, специфичные для приложений.

В настоящей главе рассматриваются все указанные категории, а также типы, применяемые при определении эквивалентности и порядка следования элементов. Ниже перечислены пространства имен коллекций.

Пространство имен	Что содержит
System.Collections	Необщенные классы и интерфейсы коллекций
System.Collections.Specialized	Строго типизированные необщенные классы коллекций
System.Collections.Generic	Обобщенные классы и интерфейсы коллекций
System.Collections.ObjectModel	Посредники и базовые классы для специальных коллекций
System.Collections.Concurrent	Коллекции, безопасные к потокам (глава 22)

Перечисление

В программировании существует много разнообразных коллекций, начиная с простых структур данных вроде массивов и связных списков и заканчивая сложными структурами, такими как красно-черные деревья и хеш-таблицы. Хотя внутренняя реализация и внешние характеристики таких структур данных варьируются в широких пределах, наиболее универсальной потребностью является возможность прохода по содержимому коллекции. Библиотека .NET BCL поддерживает эту потребность через пару интерфейсов (`IEnumerable`, `IEnumerator` и их обобщенные аналоги), которые позволяют различным структурам данных открывать доступ к общим API-интерфейсам обхода. Они представляют собой часть более крупного множества интерфейсов коллекций, которые показаны на рис. 7.1.

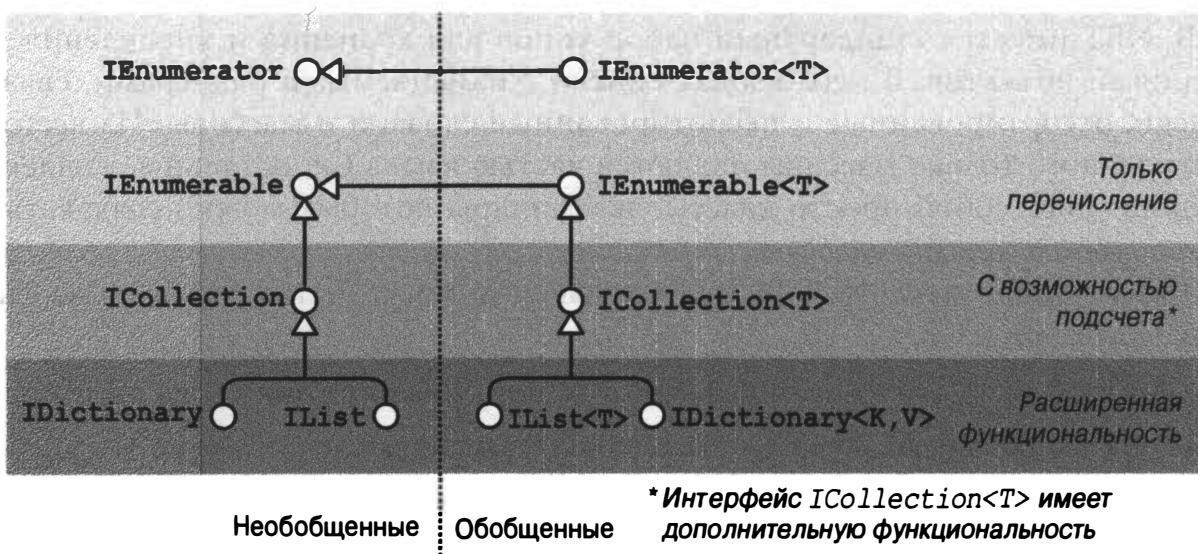


Рис. 7.1. Интерфейсы коллекций

Интерфейсы `IEnumerable` и `IEnumerator`

Интерфейс `IEnumerator` определяет базовый низкоуровневый протокол, посредством которого производится проход по элементам — или перечисление — коллекции в одностороннем стиле. Объявление этого интерфейса показано ниже:

```
public interface IEnumerator
{
    bool MoveNext();
    object Current { get; }
    void Reset();
}
```

Метод `MoveNext` продвигает текущий элемент, или “курсор”, на следующую позицию, возвращая `false`, если в коллекции больше не осталось элементов. Метод `Current` возвращает элемент в текущей позиции (обычно приводя его от `object` к более специальному типу). Перед извлечением первого элемента должен быть вызван метод `MoveNext`, что нужно для учета пустой коллекции.

Метод `Reset`, когда он реализован, выполняет перемещение в начало, делая возможным перечисление коллекции заново. Метод `Reset` существует главным образом для взаимодействия с COM: вызова его напрямую в общем случае избегают, т.к. он не является универсально поддерживаемым (и он необязателен, потому что обычно просто создает новый экземпляр перечислителя).

Как правило, коллекции не *реализуют* перечислители; заменой они *предоставляют* их через интерфейс `IEnumerable`:

```
public interface IEnumerable
{
    IEnumerator GetEnumerator();
}
```

За счет определения единственного метода, возвращающего перечислитель, интерфейс `IEnumerable` обеспечивает гибкость в том, что реализация логики итерации может быть возложена на другой класс. Кроме того, это означает, что несколько потребителей способны выполнять перечисление коллекции одновременно, не влияя друг на друга. Интерфейс `IEnumerable` можно воспринимать как “поставщик `IEnumerator`”, и он является наиболее базовым интерфейсом, который реализуют классы коллекций.

В следующем примере демонстрируется низкоуровневое использование интерфейсов `IEnumerable` и `IEnumerator`:

```
string s = "Hello";
// Так как тип string реализует IEnumerable, мы можем вызывать GetEnumerator():
IEnumerator rator = s.GetEnumerator();
while (rator.MoveNext())
{
    char c = (char) rator.Current;
    Console.Write (c + ".");
}
// Вывод: H.e.l.l.o.
```

Однако вызов методов перечислителей напрямую в такой манере встречается редко, поскольку C# предоставляет синтаксическое сокращение: оператор `foreach`. Ниже приведен тот же самый пример, переписанный с применением `foreach`:

```
string s = "Hello"; // Класс String реализует интерфейс IEnumerable
foreach (char c in s)
    Console.Write (c + ".");
```

Интерфейсы `IEnumerable<T>` и `IEnumerator<T>`

Интерфейсы `IEnumerator` и `IEnumerable` почти всегда реализуются в сочетании со своими расширенными обобщенными версиями:

```
public interface IEnumerator<T> : IEnumerator, IDisposable
{
    T Current { get; }
}
```

```
public interface IEnumerable<T> : IEnumerable
{
    IEnumerator<T> GetEnumerator();
}
```

Определяя типизированные версии свойства `Current` и метода `GetEnumerator`, данные интерфейсы усиливают статическую безопасность типов, избегают накладных расходов на упаковку элементов типов значений и повышают удобство эксплуатации потребителями. Массивы автоматически реализуют интерфейс `IEnumerable<T>` (где `T` — тип элементов массива).

Благодаря улучшенной статической безопасности типов вызов следующего метода с массивом символов приведет к возникновению ошибки на этапе компиляции:

```
void Test (IEnumerable<int> numbers) { ... }
```

Для классов коллекций стандартной практикой является открытие общего доступа к `IEnumerable<T>` и в то же время “сокрытие” необобщенного `IEnumerable` посредством явной реализации интерфейса. Это значит, что в случае вызова напрямую метода `GetEnumerator` будет получена реализация безопасного к типам обобщенного интерфейса `IEnumerator<T>`. Тем не менее, временами такое правило нарушается из-за необходимости обеспечения обратной совместимости (до выхода версии C# 2.0 обобщения не существовали). Хорошим примером считаются массивы — во избежание нарушения работы ранее написанного кода они должны возвращать экземпляр реализации необобщенного (можно сказать “классического”) интерфейса `IEnumerator`. Для того чтобы получить обобщенный интерфейс `IEnumerator<T>`, придется выполнить явное приведение к соответствующему интерфейсу:

```
int[] data = { 1, 2, 3 };
var rator = ((IEnumerable <int>)data).GetEnumerator();
```

К счастью, благодаря наличию оператора `foreach` писать код подобного рода приходится редко.

Интерфейсы `IEnumerable<T>` и `IDisposable`

Интерфейс `IEnumerator<T>` унаследован от `IDisposable`. Это позволяет перечислителям хранить ссылки на такие ресурсы, как подключения к базам данных, и гарантировать, что ресурсы будут освобождены, когда перечисление завершится (или прекратится на полпути). Оператор `foreach` распознает такие детали и транслирует следующий код:

```
foreach (var element in somethingEnumerable) { ... }
```

в его логический эквивалент:

```
using (var rator = somethingEnumerable.GetEnumerator())
{
    while (rator.MoveNext())
    {
        var element = rator.Current;
        ...
    }
}
```

Блок `using` обеспечивает освобождение (более подробно об интерфейсе `IDisposable` речь пойдет в главе 12).

Когда необходимо использовать необобщенные интерфейсы?

С учетом дополнительной безопасности типов, присущей обобщенным интерфейсам коллекций вроде `IEnumerable<T>`, возникает вопрос: нужно ли вообще применять необобщенный интерфейс `IEnumerable` (либо `ICollection` или `IList`)?

В случае интерфейса `IEnumerable` вы должны реализовать его в сочетании с `IEnumerable<T>`, т.к. последний является производным от первого. Однако вы очень редко будете действительно реализовывать данные интерфейсы с нуля: почти во всех ситуациях можно принять высокоуровневый подход, предусматривающий использование методов итератора, `Collection<T>` и LINQ.

А что насчет потребителя? Практически во всех случаях управление может осуществляться целиком с помощью обобщенных интерфейсов. Тем не менее, необобщенные интерфейсы по-прежнему иногда полезны своей способностью обеспечивать унификацию типов для коллекций по всем типам элементов. Например, показанный ниже метод подсчитывает элементы в любой коллекции *рекурсивным образом*:

```
public static int Count (IEnumerable e)
{
    int count = 0;
    foreach (object element in e)
    {
        var subCollection = element as IEnumerable;
        if (subCollection != null)
            count += Count (subCollection);
        else
            count++;
    }
    return count;
}
```

Поскольку язык C# предлагает ковариантность с обобщенными интерфейсами, может показаться допустимым заставить данный метод взамен принимать тип `IEnumerable<object>`. Однако тогда метод потерпит неудачу с элементами типов значений и унаследованными коллекциями, которые не реализуют интерфейс `IEnumerable<T>` — примером может служить класс `ControlCollection` из Windows Forms.

(Кстати, в приведенном примере вы могли заметить потенциальную ошибку: циклические ссылки приведут к бесконечной рекурсии и аварийному отказу метода. Устранить проблему проще всего за счет применения типа `HashSet` — см. раздел “Классы `HashSet<T>` и `SortedSet<T>`” далее в главе.)

Реализация интерфейсов перечисления

Реализация интерфейса `IEnumerable` или `IEnumerable<T>` может понадобиться по одной или нескольким описанным ниже причинам:

- для поддержки оператора `foreach`;
- для взаимодействия со всем, что ожидает стандартной коллекции;
- для удовлетворения требований более развитого интерфейса коллекции;
- для поддержки инициализаторов коллекций.

Чтобы реализовать `IEnumerable/IEnumerable<T>`, потребуется предоставить перечислитель. Это можно сделать одним из трех способов:

- если класс является оболочкой для другой коллекции, то путем возвращения перечислителя внутренней коллекции;
- через итератор с использованием оператора `yield return`;
- за счет создания экземпляра собственной реализации `IEnumerator/IEnumerator<T>`.



Можно также создать подкласс существующей коллекции: класс `Collection<T>` предназначен как раз для такой цели (см. раздел “Настраиваемые коллекции и посредники” далее в главе). Еще один подход предусматривает применение операций запросов LINQ, которые рассматриваются в следующей главе.

Возвращение перечислителя другой коллекции сводится к вызову метода `GetEnumerator` на внутренней коллекции. Однако данный прием жизнеспособен только в простейших сценариях, где элементы во внутренней коллекции являются в точности тем, что требуется. Более гибкий подход заключается в написании итератора с использованием оператора `yield return`. *Итератор* — это средство языка C#, которое помогает в написании коллекций таким же способом, каким оператор `foreach` оказывает содействие в их потреблении. Итератор автоматически поддерживает реализацию интерфейсов `IEnumerable` и `IEnumerator` либо их обобщенных версий. Ниже приведен простой пример:

```
public class MyCollection : IEnumerable
{
    int[] data = { 1, 2, 3 };

    public IEnumerator GetEnumerator()
    {
        foreach (int i in data)
            yield return i;
    }
}
```

Обратите внимание на “черную магию”: кажется, что метод `GetEnumerator` вообще не возвращает перечислитель! Столкнувшись с оператором `yield return`, компилятор “за кулисами” генерирует скрытый вложенный класс перечислителя, после чего проводит рефакторинг метода `GetEnumerator` для созда-

ния и возвращения экземпляра данного класса. Итераторы отличаются мощью и простотой (и широко применяются в реализации стандартных операций запросов LINQ to Objects).

Придерживаясь такого подхода, мы можем также реализовать обобщенный интерфейс `IEnumerable<T>`:

```
public class MyGenCollection : IEnumerable<int>
{
    int[] data = { 1, 2, 3 };

    public IEnumerator<int> GetEnumerator()
    {
        foreach (int i in data) yield return i;
    }

    // Явная реализация сохраняет его скрытым:
    IEnumerable.GetEnumerator() => GetEnumerator();
}
```

Из-за того, что интерфейс `IEnumerable<T>` унаследован от `IEnumerable`, мы должны реализовывать как обобщенную, так и необобщенную версию метода `GetEnumerator`. В соответствии со стандартной практикой мы реализовали необобщенную версию явно. Она может просто вызывать обобщенную версию `GetEnumerator`, поскольку интерфейс `IEnumerable<T>` унаследован от `IEnumerable`.

Только что написанный класс подошел бы в качестве основы для создания более развитой коллекции. Тем не менее, если ничего сверх простой реализации интерфейса `IEnumerable<T>` не требуется, то оператор `yield return` предлагает упрощенный вариант. Вместо написания класса логику итерации можно переместить внутрь метода, возвращающего обобщенную реализацию `IEnumerable<T>`, и позволить компилятору позаботиться об остальном. Например:

```
public class Test
{
    public static IEnumerable <int> GetSomeIntegers()
    {
        yield return 1;
        yield return 2;
        yield return 3;
    }
}
```

А вот как использовать такой метод:

```
foreach (int i in Test.GetSomeIntegers())
    Console.WriteLine (i);
```

Последний подход к написанию метода `GetEnumerator` предполагает построение класса, который реализует интерфейс `IEnumerable` напрямую. Это в точности то, что компилятор делает “за кулисами”, когда распознает итераторы. (К счастью, заходить настолько далеко вам придется редко.) В следующем примере определяется коллекция, содержащая целые числа 1, 2 и 3:

```

public class MyIntList : IEnumerable
{
    int[] data = { 1, 2, 3 };

    public IEnumerator GetEnumerator() => new Enumerator (this);

    class Enumerator : IEnumerator           // Определить внутренний
    {                                         // класс для перечислителя
        MyIntList collection;
        int currentIndex = -1;

        public Enumerator (MyIntList items) => this.collection = items;

        public object Current
        {
            get
            {
                if (currentIndex == -1)
                    throw new InvalidOperationException ("Enumeration not started!");
                                              // Перечисление не началось!
                if (currentIndex == collection.data.Length)
                    throw new InvalidOperationException ("Past end of list!");
                                              // Пройден конец списка!
                return collection.data [currentIndex];
            }
        }

        public bool MoveNext()
        {
            if (currentIndex >= collection.data.Length - 1) return false;
            return ++currentIndex < collection.data.Length;
        }

        public void Reset() => currentIndex = -1;
    }
}

```



Реализовывать метод `Reset` вовсе не обязательно — взамен можно сгенерировать исключение `NotSupportedException`.

Обратите внимание, что первый вызов `MoveNext` должен переместить на первый (а не на второй) элемент в списке.

Чтобы сравняться с итератором в плане функциональности, мы должны также реализовать интерфейс `IEnumerable<T>`. Ниже приведен пример, в котором для простоты опущена проверка границ:

```

class MyIntList : IEnumerable<int>
{
    int[] data = { 1, 2, 3 };

    // Обобщенный перечислитель совместим как
    // с IEnumerable, так и с IEnumerable<T>.
    // Во избежание конфликта имен мы реализуем
    // необобщенный метод GetEnumerator явно.

    public IEnumerator<int> GetEnumerator() => new Enumerator(this);
    IEnumerable.GetEnumerator() => new Enumerator(this);

```

```

class Enumerator : IEnumerator<int>
{
    int currentIndex = -1;
    MyIntList collection;

    public Enumerator (MyIntList items) => collection = items;
    public int Current => collection.data [currentIndex];
    object IEnumerator.Current => Current;

    public bool MoveNext() => ++currentIndex < collection.data.Length;
    public void Reset() => currentIndex = -1;
    // С учетом того, что метод Dispose не нужен,
    // рекомендуется реализовать его явно, чтобы
    // он не был виден через открытый интерфейс.
    void IDisposable.Dispose() {}
}
}

```

Пример с обобщениями функционирует быстрее, т.к. свойство `IEnumerator<int>.Current` не требует приведения `int` к `object`, что позволяет избежать накладных расходов, связанных с упаковкой.

Интерфейсы `ICollection` и `IList`

Хотя интерфейсы перечислений предлагают протокол для односторонней итерации по коллекции, они не предоставляют механизма, который позволил бы определять размер коллекции, получать доступ к членам по индексу, производить поиск или модифицировать коллекцию. Для такой функциональности в .NET определены интерфейсы `ICollection`, `IList` и `IDictionary`. Каждый из них имеет обобщенную и необобщенную версии; тем не менее, необобщенные версии существуют преимущественно для поддержки унаследованного кода.

Иерархия наследования для этих интерфейсов была показана на рис. 7.1. Резюмировать их проще всего следующим образом.

`IEnumerable<T>` (и `IEnumerable`)

Предоставляют минимальный уровень функциональности (только перечисление).

`ICollection<T>` (и `ICollection`)

Предоставляют средний уровень функциональности (например, свойство `Count`).

`IList<T>/IDictionary<K,V>` и их необобщенные версии

Предоставляют максимальный уровень функциональности (включая “произвольный” доступ по индексу/ключу).



Потребность в реализации любого из упомянутых интерфейсов возникает редко. Когда необходимо написать класс коллекции, почти во всех случаях можно создавать подкласс класса `Collection<T>` (см. раздел “Настраиваемые коллекции и посредники” далее в главе). Язык LINQ предлагает еще один вариант, охватывающий множество сценариев.

Обобщенная и необобщенная версии отличаются между собой сильнее, чем можно было бы ожидать, особенно в случае интерфейса `ICollection`. Причины по большей части исторические: поскольку обобщения появились позже, обобщенные интерфейсы были разработаны с оглядкой на прошлое, что привело к отличающемуся (и лучшему) подбору членов. В итоге интерфейс `ICollection<T>` не расширяет `ICollection`, `IList<T>` не расширяет `IList`, а `IDictionary< TKey, TValue >` не расширяет `IDictionary`. Разумеется, сам класс коллекции свободен в реализации обеих версий интерфейса, если это приносит пользу (часто именно так и есть).



Другая, более тонкая причина того, что интерфейс `IList<T>` не расширяет `IList`, заключается в том, что тогда приведение к `IList<T>` возвращало бы реализацию интерфейса с членами `Add(T)` и `Add(object)`. В результате нарушилась бы статическая безопасность типов, потому что метод `Add` можно было бы вызывать с объектом любого типа.

В текущем разделе рассматриваются интерфейсы `ICollection<T>` и `IList<T>` плюс их необобщенные версии, а в разделе “Словари” далее в главе обсуждаются интерфейсы словарей.



Не существует *разумного* объяснения способа применения слов *коллекция* и *список* повсюду в библиотеках .NET. Например, поскольку `IList<T>` является более функциональной версией `ICollection<T>`, можно было бы ожидать, что класс `List<T>` должен быть соответственно более функциональным, чем класс `Collection<T>`. Но это не так. Лучше всего считать термины *коллекция* и *список* в широком смысле синонимами кроме случаев, когда речь идет о конкретном типе.

Интерфейсы `ICollection<T>` и `ICollection`

`ICollection<T>` — стандартный интерфейс для коллекций объектов с поддержкой подсчета. Он предоставляет возможность определения размера коллекции (`Count`), выяснения, содержит ли элемент в коллекции (`Contains`), копирования коллекции в массив (`ToArrayList`) и определения, предназначена ли коллекция только для чтения (`IsReadOnly`). Для записываемых коллекций можно также добавлять (`Add`), удалять (`Remove`) и очищать (`Clear`) элементы коллекции. Из-за того, что интерфейс `ICollection<T>` расширяет `IEnumerable<T>`, можно также совершать обход с помощью оператора `foreach`:

```
public interface ICollection<T> : IEnumerable<T>, IEnumerable
{
    int Count { get; }

    bool Contains (T item);
    void CopyTo (T[] array, int arrayIndex);
    bool IsReadOnly { get; }
```

```
    void Add(T item);
    bool Remove (T item);
    void Clear();
}
```

Необобщенный интерфейс `ICollection` похож в том, что предоставляет коллекцию с возможностью подсчета, но не предлагает функциональности для изменения списка или проверки членства элементов:

```
public interface ICollection : IEnumerable
{
    int Count { get; }
    bool IsSynchronized { get; }
    object SyncRoot { get; }
    void CopyTo (Array array, int index);
}
```

В необобщенном интерфейсе также определены свойства для содействия в синхронизации (см. главу 14) — они были помещены в обобщенную версию, потому что безопасность в отношении потоков больше не считается внутренне присущей коллекции.

Оба интерфейса довольно прямолинейны в реализации. Если реализуется интерфейс `ICollection<T>`, допускающий только чтение, то методы `Add`, `Remove` и `Clear` должны генерировать исключение `NotSupportedException`.

Эти интерфейсы обычно реализуются в сочетании с интерфейсом `IList` или `IDictionary`.

Интерфейсы `IList<T>` и `IList`

`IList<T>` — стандартный интерфейс для коллекций, поддерживающих индексацию по позиции. В дополнение к функциональности, унаследованной от интерфейсов `ICollection<T>` и `IEnumerable<T>`, он предлагает возможность чтения/записи элемента по позиции (через индексатор) и вставки/удаления по позиции:

```
public interface IList<T> : ICollection<T>, IEnumerable<T>, IEnumerable
{
    T this [int index] { get; set; }
    int IndexOf (T item);
    void Insert (int index, T item);
    void RemoveAt (int index);
}
```

Методы `IndexOf` выполняют линейный поиск в списке, возвращая `-1`, если указанный элемент не найден.

Необобщенная версия `IList` имеет большее количество членов, поскольку она меньше наследует из `ICollection`:

```
public interface IList : ICollection, IEnumerable
{
    object this [int index] { get; set }
    bool IsFixedSize { get; }
    bool IsReadOnly { get; }
```

```
int Add (object value);
void Clear();
bool Contains (object value);
int IndexOf (object value);
void Insert (int index, object value);
void Remove (object value);
void RemoveAt (int index);
}
```

Метод `Add` необобщенного интерфейса `IList` возвращает целочисленное значение — индекс вновь добавленного элемента. Напротив, метод `Add` интерфейса `ICollection<T>` имеет возвращаемый тип `void`.

Универсальный класс `List<T>` является наиболее типичной реализацией обоих интерфейсов `IList<T>` и `IList`. Массивы в C# также реализуют обобщенную и необобщенную версии `IList` (хотя методы добавления или удаления элементов скрыты через явную реализацию интерфейса и в случае вызова генерируют исключение `NotSupportedException`).



При попытке доступа в многомерный массив через индексатор `IList` генерируется исключение `ArgumentException`. Такая опасность возникает при написании методов вроде показанного ниже:

```
public object FirstOrDefault (IList list)
{
    if (list == null || list.Count == 0) return null;
    return list[0];
}
```

Код может выглядеть “пуленепробиваемым”, однако он приведет к генерации исключения в случае вызова с многомерным массивом. Проверить во время выполнения, является ли массив многомерным, можно с помощью следующего кода (за дополнительными сведениями обращайтесь в главу 19):

```
list.GetType().IsArray && list.GetType().GetArrayRank() > 1
```

Интерфейсы `IReadOnlyCollection<T>` и `IReadOnlyList<T>`

В .NET определены интерфейсы коллекций и списков, открывающие доступ лишь к членам, которые требуются для операций, допускающих только чтение.

```
public interface IReadOnlyCollection<out T> : IEnumerable<T>, IEnumerable
{
    int Count { get; }
}

public interface IReadOnlyList<out T> : IReadOnlyCollection<T>,
                                         IEnumerable<T>, IEnumerable
{
    T this[int index] { get; }
}
```

Из-за того, что параметр типа таких интерфейсов используется только в выходных позициях, он помечается как *ковариантный*. В итоге появляется возможность трактовать список кошек, например, как список животных, предназначенный только для чтения. Напротив, в `IList<T>` тип `T` не помечается как ковариантный, потому что он присутствует и во входных, и в выходных позициях.



Описанные интерфейсы являются *представлением* коллекции или списка, предназначенным только для чтения; лежащая в основе реализация по-прежнему может допускать запись. Большинство записываемых (*изменяемых*) коллекций реализуют как интерфейсы только для чтения, так и интерфейсы для чтения/записи.

Помимо возможности работы с коллекциями ковариантным образом интерфейсы, допускающие только чтение, позволяют классу открывать доступ к представлению только для чтения закрытой записываемой коллекции. Мы продемонстрируем это вместе с лучшим решением в разделе “Класс `ReadOnlyCollection<T>`” далее в главе.

Интерфейс `IReadOnlyList<T>` отображается на тип Windows Runtime по имени `IVectorView<T>`.

Класс `Array`

Класс `Array` является неявным базовым классом для всех одномерных и многомерных массивов, а также одним из наиболее фундаментальных типов, реализующих стандартные интерфейсы коллекций. Класс `Array` обеспечивает унификацию типов, так что общий набор методов доступен всем массивам независимо от их объявления или типа элементов.

По причине настолько фундаментального характера массивов язык C# предлагает явный синтаксис для их объявления и инициализации, который был описан в главах 2 и 3. Когда массив объявляется с применением синтаксиса C#, среда CLR неявно создает подтип класса `Array` за счет синтеза *псевдотипа*, подходящего для размерностей и типов элементов массива. Псевдотип реализует типизированные необобщенные интерфейсы коллекций вроде `IList<string>`.

Среда CLR трактует типы массивов специальным образом также при конструировании, выделяя им непрерывный участок в памяти. Это делает индексацию в массивах высокоэффективной, но препятствует изменению их размеров в будущем.

Класс `Array` реализует интерфейсы коллекций вплоть до `IList<T>` в обеих формах — обобщенной и необобщенной. Однако сам интерфейс `IList<T>` реализован явно, чтобы сохранить открытый интерфейс `Array` свободным от методов, подобных `Add` или `Remove`, которые генерируют исключение на коллекциях фиксированной длины, таких как массивы. Класс `Array` в действительности предлагает статический метод `Resize`, хотя он работает путем создания нового массива и копирования в него всех элементов. Вдобавок к такой неэффективности ссылки на массив в других местах программы будут по-прежнему указывать на его исходную версию. Более удачное решение для коллекций с из-

меняемыми размерами предусматривает использование класса `List<T>` (описанного в следующем разделе).

Массив может содержать элементы, имеющие тип значения или ссылочный тип. Элементы типа значения хранятся в массиве на месте, а потому массив из трех элементов типа `long` (по 8 байтов каждое) будет занимать непрерывный участок памяти размером 24 байта. С другой стороны, элементы ссылочного типа занимают только объем, требующийся для ссылки (4 байта в 32-разрядной среде или 8 байтов в 64-разрядной среде). На рис. 7.2 показано распределение в памяти для приведенного ниже кода:

```
StringBuilder[] builders = new StringBuilder [5];
builders [0] = new StringBuilder ("builder1");
builders [1] = new StringBuilder ("builder2");
builders [2] = new StringBuilder ("builder3");

long[] numbers = new long [3];
numbers [0] = 12345;
numbers [1] = 54321;
```

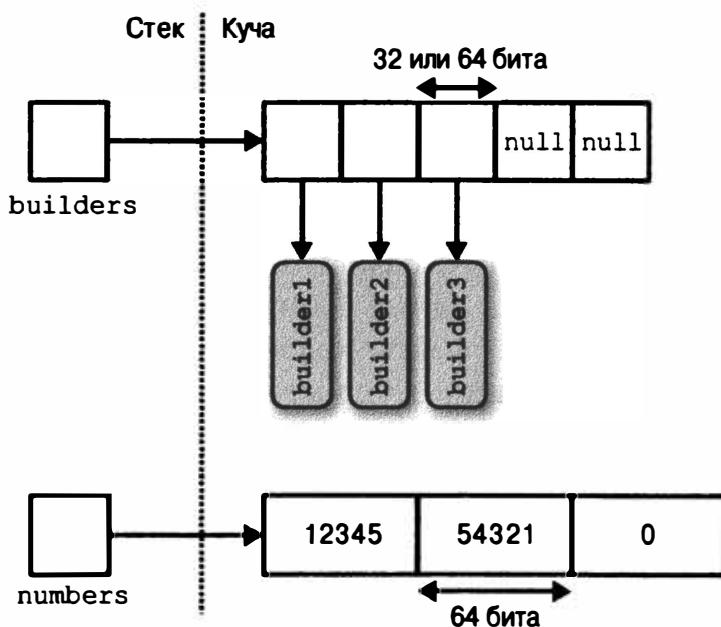


Рис. 7.2. Массивы в памяти

Из-за того, что `Array` представляет собой класс, массивы (сами по себе) всегда являются ссылочными типами независимо от типа элементов массива. Это значит, что оператор `arrayB = arrayA` даст в результате две переменные, которые ссылаются на один и тот же массив. Аналогично два разных массива всегда будут приводить к отрицательному результату при проверке эквивалентности — если только вы не задействуете компаратор структурной эквивалентности, который сравнивает каждый элемент массива:

```
object[] a1 = { "string", 123, true };
object[] a2 = { "string", 123, true };
Console.WriteLine (a1 == a2);           // False
Console.WriteLine (a1.Equals (a2));     // False
IStructuralEquatable sel = a1;
Console.WriteLine (sel.Equals (a2,
    StructuralComparisons.StructuralEqualityComparer)); // True
```

Дубликат массива можно создавать вызовом метода `Clone`: `arrayB = arrayA.Clone()`. Тем не менее, результатом будет поверхностная (неглубокая) копия, означающая копирование только участка памяти, в котором представлен собственно массив. Если массив содержит объекты типов значений, тогда копируются сами значения; если же массив содержит объекты ссылочных типов, то копируются только ссылки (в итоге давая два массива с членами, которые указывают на одни и те же объекты). На рис. 7.3 показан эффект от добавления в пример следующего кода:

```
StringBuilder[] builders2 = builders;
StringBuilder[] shallowClone = (StringBuilder[]) builders.Clone();
```

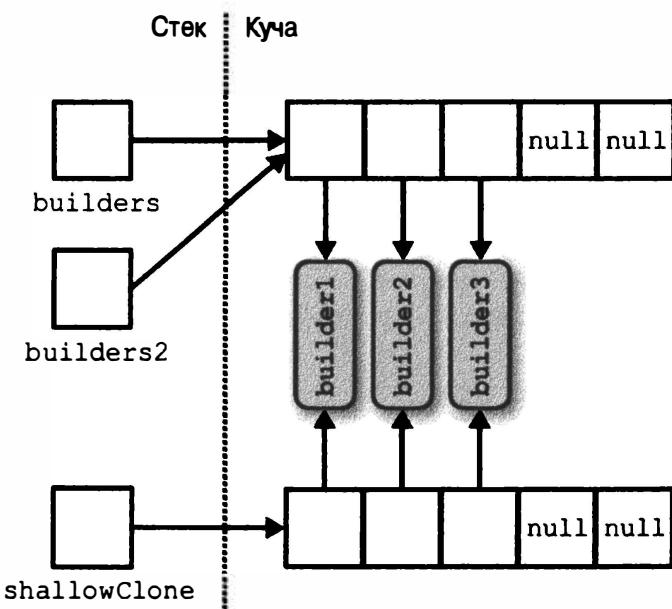


Рис. 7.3. Поверхностное копирование массива

Чтобы создать глубокую копию, при которой объекты ссылочных типов дублируются, потребуется пройти в цикле по массиву и клонировать каждый его элемент вручную. Те же самые правила применимы к другим типам коллекций .NET.

Хотя класс `Array` предназначен в первую очередь для использования с 32-битными индексаторами, он также располагает ограниченной поддержкой 64-битных индексаторов (позволяя массиву теоретически адресовать до 264 элементов) через несколько методов, которые принимают параметры типов `Int32` и `Int64`. На практике эти перегруженные версии бесполезны, т.к. CLR не разрешает ни одному объекту — включая массивы — занимать более 2 Гбайт (как в 32-разрядной, так и в 64-разрядной среде).



Многие методы в классе `Array`, которые вы, возможно, ожидали видеть как методы экземпляра, на самом деле являются статическими методами. Такое довольно странное проектное решение означает, что при поиске подходящего метода в `Array` следует просматривать и статические методы, и методы экземпляра.

Конструирование и индексация

Простейший способ создания и индексации массивов предусматривает применение языковых конструкций C#:

```
int[] myArray = { 1, 2, 3 };
int first = myArray [0];
int last = myArray [myArray.Length - 1];
```

В качестве альтернативы можно создать экземпляр массива динамически, вызвав метод `Array.CreateInstance`, что позволяет указывать тип элементов и ранг (количество измерений) во время выполнения — равно как и создавать массивы с индексацией, начинающейся не с нуля, задавая нижнюю границу. Массивы с индексацией, начинающейся не с нуля, не совместимы с поддерживаемой в .NET общеязыковой спецификацией (Common Language Specification — CLS) и не должны быть доступными как открытые члены в библиотеке, которая может потребляться программой, написанной на языке F# или Visual Basic.

Методы `GetValue` и `SetValue` позволяют получать доступ к элементам в динамически созданном массиве (они также работают с обычными массивами):

```
// Создать строковый массив длиной 2 элемента:
Array a = Array.CreateInstance (typeof(string), 2);
a.SetValue ("hi", 0);                                // → a[0] = "hi";
a.SetValue ("there", 1);                            // → a[1] = "there";
string s = (string) a.GetValue (0);                // → s = a[0];

// Можно также выполнить приведение к массиву C#:
string[] cSharpArray = (string[]) a;
string s2 = cSharpArray [0];
```

Созданные динамическим образом массивы с индексацией, начинающейся с нуля, могут быть приведены к массиву C# совпадающего или совместимого типа (совместимого согласно стандартным правилам вариантиности массивов). Например, если `Apple` является подклассом `Fruit`, то массив `Apple[]` может быть приведен к `Fruit[]`. В результате возникает вопрос о том, почему в качестве унифицированного типа массива вместо класса `Array` не был выбран `object[]`? Дело в том, что массив `object[]` несовместим с многомерными массивами и массивами типов значений (и массивами с индексацией, начинающейся не с нуля). Массив `int[]` не может быть приведен к `object[]`. Таким образом, для полной унификации типов требуется класс `Array`.

Методы `GetValue` и `SetValue` также работают с массивами, созданными компилятором, и они полезны при написании методов, которые имеют дело с массивом любого типа и ранга. Для многомерных массивов они принимают массив индексаторов:

```
public object GetValue (params int[] indices)
public void SetValue (object value, params int[] indices)
```

Следующий метод выводит на экран первый элемент любого массива независимо от ранга (количества измерений):

```

void WriteFirstValue (Array a)
{
    Console.Write (a.Rank + "-dimensional; "); // размерность массива
    // Массив индексаторов будет автоматически инициализироваться всеми нулями,
    // поэтому его передача в метод GetValue или SetValue приведет к получению
    // или установке основанного на нуле (т.е. первого) элемента в массиве.
    int[] indexers = new int[a.Rank];
    Console.WriteLine ("First value is " + a.GetValue (indexers));
}
void Demo()
{
    int[] oneD = { 1, 2, 3 };
    int[,] twoD = { {5,6}, {8,9} };
    WriteFirstValue (oneD); // одномерный; первое значение равно 1
    WriteFirstValue (twoD); // двумерный; первое значение равно 5
}

```



Для работы с массивами неизвестного типа, но с известным рангом, обобщения предлагают более простое и эффективное решение:

```

void WriteFirstValue<T> (T[] array)
{
    Console.WriteLine (array[0]);
}

```

Метод SetValue генерирует исключение, если элемент имеет тип, несовместимый с массивом. Когда экземпляр массива создан, либо посредством языкового синтаксиса, либо с помощью Array.CreateInstance, его элементы автоматически инициализируются своими стандартными значениями. Для массивов с элементами ссылочных типов это означает занесение в них null, а для массивов с элементами типов значений — побитовое “обнуление” членов. Класс Array предоставляет такую функциональность и по запросу через метод Clear:

```
public static void Clear (Array array, int index, int length);
```

Данный метод не влияет на размер массива, что отличается от обычного использования метода Clear (такого как в ICollection<T>.Clear), при котором коллекция сокращается до нуля элементов.

Перечисление

С массивами легко выполнять перечисление с помощью оператора foreach:

```

int[] myArray = { 1, 2, 3 };
foreach (int val in myArray)
    Console.WriteLine (val);

```

Перечисление можно также проводить с применением метода Array.ForEach, определенного следующим образом:

```
public static void ForEach<T> (T[] array, Action<T> action);
```

Здесь используется делегат Action с приведенной ниже сигнатурой:

```
public delegate void Action<T> (T obj);
```

А вот как выглядит первый пример, переписанный с применением метода `Array.ForEach`:

```
Array.ForEach (new[] { 1, 2, 3 }, Console.WriteLine);
```

Начиная с версии C# 12, код можно еще больше упростить с помощью *выражения коллекции*:

```
Array.ForEach ([ 1, 2, 3 ], Console.WriteLine);
```

Длина и ранг

Класс `Array` предоставляет следующие методы и свойства для запросивания длины и ранга:

```
public int GetLength (int dimension);
public long GetLongLength (int dimension);

public int Length { get; }
public long LongLength { get; }

public int GetLowerBound (int dimension);
public int GetUpperBound (int dimension);

public int Rank { get; } // Возвращает количество измерений в массиве (ранг)
```

Методы `GetLength` и `GetLongLength` возвращают длину для заданного измерения (0 для одномерного массива), а свойства `Length` и `LongLength` — количество элементов в массиве (включая все измерения).

Методы `GetLowerBound` и `GetUpperBound` удобны при работе с массивами, индексы которых начинаются не с нуля. Метод `GetUpperBound` возвращает сумму значений, возвращенных методами `GetLowerBound` и `GetLength` для любого заданного измерения.

Поиск

Класс `Array` предлагает набор методов для нахождения элементов внутри одномерного массива.

Методы `BinarySearch`

Для быстрого поиска заданного элемента в отсортированном массиве.

Методы `IndexOf/LastIndex`

Для поиска заданного элемента в несортированном массиве.

Методы `Find/FindLast/FindIndex/FindLastIndex/FindAll/Exists/TrueForAll`

Для поиска элемента или элементов, удовлетворяющих заданному предикату `Predicate<T>`, в несортированном массиве.

Ни один из методов поиска в массиве не генерирует исключение в случае, если указанное значение не найдено. Взамен, когда элемент не найден, методы, возвращающие целочисленное значение, возвращают -1 (предполагая, что индекс массива начинается с нуля), а методы, возвращающие обобщенный тип, возвращают стандартное значение для этого типа (скажем, 0 для `int` или `null` для `string`).

Методы двоичного поиска характеризуются высокой скоростью, но работают только с отсортированными массивами и требуют, чтобы элементы сравнивались на предмет *порядка*, а не просто *эквивалентности*. С такой целью методы двоичного поиска могут принимать объект, реализующий интерфейс *IComparer* или *IComparer<T>*, который позволяет принимать решения по упорядочению (см. раздел “Подключение протоколов эквивалентности и порядка” далее в главе). Он должен быть согласован с любым компаратором, используемым при исходной сортировке массива. Если компаратор не предоставляется, то будет применен стандартный алгоритм упорядочения типа, основанный на его реализации *IComparable/IComparable<T>*.

Методы *IndexOf* и *LastIndexOf* выполняют простое перечисление по массиву, возвращая первый (или последний) элемент, который совпадает с заданным значением.

Методы поиска на основе предикатов позволяют управлять *совпадением* заданного элемента с помощью метода делегата или лямбда-выражения. Предикат представляет собой просто делегат, принимающий объект и возвращающий *true* или *false*:

```
public delegate bool Predicate<T> (T object);
```

В следующем примере выполняется поиск в массиве строк имени, содержащего букву “a”:

```
string[] names = { "Rodney", "Jack", "Jill" };
string match = Array.Find (names, ContainsA);
Console.WriteLine (match); // Jack
ContainsA (string name) { return name.Contains ("a"); }
```

Ниже показан тот же пример, сокращенный с помощью лямбда-выражения:

```
string[] names = { "Rodney", "Jack", "Jill" };
string match = Array.Find (names, n => n.Contains ("a")); // Jack
```

Метод *FindAll* возвращает массив всех элементов, удовлетворяющих предикату. На самом деле он эквивалентен методу *Enumerable.Where* из пространства имен *System.Linq* за исключением того, что *FindAll* возвращает массив совпадающих элементов, а не перечисление *IEnumerable<T>* таких элементов.

Метод *Exists* возвращает *true*, если член массива удовлетворяет заданному предикату, и он эквивалентен методу *Any* класса *System.Linq.Enumerable*.

Метод *TrueForAll* возвращает *true*, если все элементы удовлетворяют заданному предикату, и он эквивалентен методу *All* класса *System.Linq.Enumerable*.

Сортировка

Класс *Array* имеет следующие встроенные методы сортировки:

```
// Для сортировки одиночного массива:
public static void Sort<T> (T[] array);
public static void Sort      (Array array);
// Для сортировки пары массивов:
```

```
public static void Sort<TKey, TValue> (TKey[] keys, TValue[] items);
public static void Sort
    (Array keys, Array items);
```

Каждый из указанных методов дополнительно перегружен, чтобы принимать также описанные далее аргументы:

```
int index      // Начальный индекс, с которого должна стартовать сортировка
int length     // Количество элементов, подлежащих сортировке
IComparer<T> comparer // Объект, принимающий решения по упорядочению
Comparison<T> comparison // Делегат, принимающий решения по упорядочению
```

Ниже демонстрируется простейший случай использования метода Sort:

```
int[] numbers = { 3, 2, 1 };
Array.Sort (numbers); // Массив теперь содержит { 1, 2, 3 }
```

Методы, принимающие пару массивов, работают путем переупорядочения элементов каждого массива в tandemе, основываясь на решениях по упорядочению из первого массива. В следующем примере числа и соответствующие им слова сортируются в числовом порядке:

```
int[] numbers = { 3, 2, 1 };
string[] words = { "three", "two", "one" };
Array.Sort (numbers, words);

// Массив numbers теперь содержит { 1, 2, 3 }
// Массив words теперь содержит { "one", "two", "three" }
```

Метод Array.Sort требует, чтобы элементы в массиве реализовывали интерфейс IComparable (см. раздел “Сравнение порядка” в главе 6). Это означает возможность сортировки для большинства встроенных типов C# (таких как целочисленные типы из предыдущего примера). Если элементы по своей сути несравнимы или нужно переопределить стандартное упорядочение, то методу Sort понадобится предоставить собственный поставщик сравнения, который будет сообщать относительные позиции двух элементов. Решить задачу можно двумя способами:

- посредством вспомогательного объекта, который реализует интерфейс IComparer/IComparer<T> (см. раздел “Подключение протоколов эквивалентности и порядка” далее в главе);
- посредством делегата Comparison:

```
public delegate int Comparison<T> (T x, T y);
```

Делегат Comparison следует той же семантике, что и метод IComparer<T>.CompareTo: если x находится перед y, то возвращается отрицательное целое число; если x располагается после y, тогда возвращается положительное целое число; если x и y имеют одну и ту же позицию сортировки, то возвращается 0.

В следующем примере мы сортируем массив целых чисел так, чтобы нечетные числа шли первыми:

```
int[] numbers = { 1, 2, 3, 4, 5 };
Array.Sort (numbers, (x, y) => x % 2 == y % 2 ? 0 : x % 2 == 1 ? -1 : 1);

// Массив numbers теперь содержит { 1, 3, 5, 2, 4 }
```



В качестве альтернативы вызову метода Sort можно применять операции OrderBy и ThenBy языка LINQ. В отличие от Array.Sort операции LINQ не изменяют исходный массив, а взамен выдают отсортированный результат в новой последовательности IEnumerable<T>.

Обращение порядка следования элементов

Приведенные ниже методы класса Array изменяют порядок следования всех или части элементов массива на противоположный:

```
public static void Reverse (Array array);  
public static void Reverse (Array array, int index, int length);
```

Копирование

Класс Array предлагает четыре метода для выполнения поверхностного копирования: Clone, CopyTo, Copy и ConstrainedCopy. Первые два являются методами экземпляра, а последние два — статическими методами.

Метод Clone возвращает полностью новый (поверхностно скопированный) массив. Методы CopyTo и Copy копируют непрерывное подмножество элементов массива. Копирование многомерного прямоугольного массива требует отображения многомерного индекса на линейный индекс. Например, позиция [1, 1] в массиве 3×3 представляется индексом 4 на основе следующего вычисления: $1 \times 3 + 1$. Исходный и целевой диапазоны могут перекрываться без возникновения проблем.

Метод ConstrainedCopy выполняет *атомарную* операцию: если все запрошенные элементы не могут быть успешно скопированы (например, из-за ошибки, связанной с типом), то производится откат всей операции.

Класс Array также предоставляет метод AsReadOnly, который возвращает оболочку, предотвращающую переустановку элементов.

Преобразование и изменение размера

Метод Array.ConvertAll создает и возвращает новый массив элементов типа TOutput, вызывая во время копирования элементов предоставленный делегат Converter. Делегат Converter определен следующим образом:

```
public delegate TOutput Converter<TInput, TOutput> (TInput input)
```

Приведенный ниже код преобразует массив чисел с плавающей точкой в массив целых чисел:

```
float[] reals = { 1.3f, 1.5f, 1.8f };  
int[] wholes = Array.ConvertAll (reals, r => Convert.ToInt32 (r));  
// Массив wholes содержит { 1, 2, 2 }
```

Метод Resize создает новый массив и копирует в него элементы, возвращая новый массив через ссылочный параметр. Любые ссылки на исходный массив в других объектах остаются неизмененными.



Пространство имен `System.Linq` предлагает дополнительный набор расширяющих методов, которые подходят для преобразования массивов. Такие методы возвращают экземпляр реализации интерфейса `IEnumerable<T>`, который можно преобразовать обратно в массив с помощью метода `ToArray` класса `Enumerable`.

Списки, очереди, стеки и наборы

.NET предоставляет базовый набор конкретных классов коллекций, которые реализуют интерфейсы, описанные в настоящей главе. В этом разделе внимание сосредоточено на списковых коллекциях (в противоположность *словарным* коллекциям, обсуждаемым в разделе “Словари” далее в главе). Как и в случае с ранее рассмотренными интерфейсами, обычно доступен выбор между обобщенной и необобщенной версиями каждого типа. В плане гибкости и производительности обобщенные классы имеют преимущество, делая свои необобщенные аналоги избыточными и предназначенными только для обеспечения обратной совместимости. Ситуация с интерфейсами коллекций иная: их необобщенные версии все еще иногда полезны.

Из описанных в данном разделе классов наиболее часто используется обобщенный класс `List`.

Классы `List<T>` и `ArrayList`

Обобщенный класс `List` и необобщенный класс `ArrayList` представляют массив объектов с возможностью динамического изменения размера и относятся к числу самых часто применяемых классов коллекций. Класс `ArrayList` реализует интерфейс `IList`, в то время как класс `List<T>` — интерфейсы `IList` и `IList<T>` (а также `IReadOnlyList<T>` — новую версию, допускающую только чтение). В отличие от массивов все интерфейсы реализованы открытым образом, а методы вроде `Add` и `Remove` открыты и работают совершенно ожидаемо.

Классы `List<T>` и `ArrayList` функционируют за счет поддержки внутреннего массива объектов, который заменяется более крупным массивом при достижении предельной емкости. Добавление элементов производится эффективно (потому что в конце обычно есть свободные позиции), но вставка элементов может оказаться медленной (т.к. все элементы после точки вставки должны быть сдвинуты для освобождения позиции), как и удаление элементов (особенно поблизости к началу). Аналогично массивам поиск будет эффективным, если метод `BinarySearch` используется со списком, который был отсортирован, но в противном случае он не эффективен, поскольку каждый элемент должен проверяться индивидуально.



Класс `List<T>` работает в несколько раз быстрее класса `ArrayList`, если `T` является типом значения, потому что `List<T>` избегает накладных расходов, связанных с упаковкой и распаковкой элементов.

Классы `List<T>` и `ArrayList` предоставляют конструкторы, которые принимают существующую коллекцию элементов — они копируют каждый элемент из нее в новый экземпляр `List<T>` или `ArrayList`:

```
public class List<T> : IList<T>, IReadOnlyList<T>
{
    public List();
    public List(IEnumerable<T> collection);
    public List(int capacity);

    // Добавление и вставка:
    public void Add(T item);
    public void AddRange(IEnumerable<T> collection);
    public void Insert(int index, T item);
    public void InsertRange(int index, IEnumerable<T> collection);

    // Удаление:
    public bool Remove(T item);
    public void RemoveAt(int index);
    public void RemoveRange(int index, int count);
    public int RemoveAll(Predicate<T> match);

    // Индексация:
    public T this[int index] { get; set; }
    public List<T> GetRange(int index, int count);
    public Enumerator<T> GetEnumerator();

    // Экспортирование, копирование и преобразование:
    public T[] ToArray();
    public void CopyTo(T[] array);
    public void CopyTo(T[] array, int arrayIndex);
    public void CopyTo(int index, T[] array, int arrayIndex, int count);
    public ReadOnlyCollection<T> AsReadOnly();
    public List<TOutput> ConvertAll<TOutput>(Converter<T, TOutput>
                                                converter);

    // Другие:
    public void Reverse(); // Меняет порядок следования элементов
                          // в списке на противоположный
    public int Capacity { get; set; } // Инициализирует расширение внутреннего массива
    public void TrimExcess(); // Усекает внутренний массив до
                           // фактического количества элементов
    public void Clear(); // Удаляет все элементы, так что Count=0
}

public delegate TOutput Converter<TInput, TOutput>(TInput input);
```

В дополнение к указанным членам класс `List<T>` предлагает версии экземпляра для всех методов поиска и сортировки из класса `Array`.

В показанном ниже коде демонстрируется работа свойств и методов `List` (примеры поиска и сортировки приводились в разделе “Класс `Array`” ранее в главе):

```
List<string> words = new List<string>(); // Новый список типа string
words.Add("melon");
words.Add("avocado");
words.AddRange(["banana", "plum"]);
words.Insert(0, "lemon"); // Вставить в начало
```

```

words.InsertRange (0, ["peach", "nashi"]); // Вставить в начало
words.Remove ("melon");
words.RemoveAt (3); // Удалить 4-й элемент
words.RemoveRange (0, 2); // Удалить первые 2 элемента

// Удалить все строки, начинающиеся с n:
words.RemoveAll (s => s.StartsWith ("n"));

Console.WriteLine (words [0]); // первое слово
Console.WriteLine (words [words.Count - 1]); // последнее слово
foreach (string s in words) Console.WriteLine (s); // все слова
List<string> subset = words.GetRange (1, 2); // слова со 2-го по 3-е

string[] wordsArray = words.ToArray(); // Создает новый типизированный массив

// Копировать первые два элемента в конец существующего массива:
string[] existing = new string [1000];
words.CopyTo (0, existing, 998, 2);

List<string> upperCaseWords = words.ConvertAll (s => s.ToUpper());
List<int> lengths = words.ConvertAll (s => s.Length);

```

Необобщенный класс ArrayList требует довольно неуклюжих приведений:

```

ArrayList al = new ArrayList();
al.Add ("hello");
string first = (string) al [0];
string[] strArr = (string[]) al.ToArray (typeof (string));

```

Такие приведения не могут быть проверены компилятором; скажем, представленный далее код скомпилируется успешно, но потерпит неудачу во время выполнения:

```
int first = (int) al [0]; // Исключение во время выполнения
```



Класс `ArrayList` функционально похож на класс `List<object>`. Оба класса удобны, когда необходим список элементов смешанных типов, которые не разделяют общий базовый тип (кроме `object`). В таком случае выбор `ArrayList` может обеспечить преимущество, если в отношении списка должна использоваться рефлексия (см. главу 18). Рефлексию реализовать проще с помощью необобщенного класса `ArrayList`, чем посредством `List<object>`.

Импортировав пространство имен `System.Linq`, экземпляр `ArrayList` можно преобразовать в обобщенный `List` за счет вызова метода `Cast` и затем `ToList`:

```

ArrayList al = new ArrayList();
al.AddRange (new[] { 1, 5, 9 } );
List<int> list = al.Cast<int>().ToList();

```

`Cast` и `ToList` — расширяющие методы в классе `System.Linq.Enumerable`.

Класс `LinkedList<T>`

Класс `LinkedList<T>` представляет обобщенный двусвязный список (рис. 7.4). Двусвязный список — это цепочка узлов, в которой каждый узел ссылается на предыдущий узел, следующий узел и действительный элемент. Его главное преимущество заключается в том, что элемент может быть эффективно вставлен в любое место списка, т.к. подобное действие требует только создания нового узла и обновления нескольких ссылок. Однако поиск позиции вставки может оказаться медленным ввиду отсутствия в связном списке встроенного механизма для прямой индексации; должен производиться обход каждого узла, и двоичный поиск невозможен.

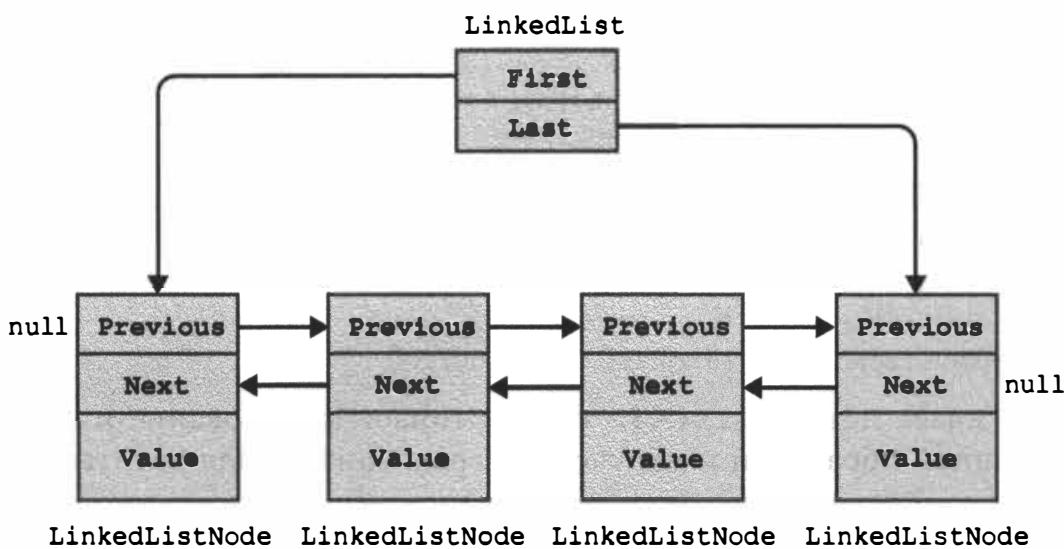


Рис. 7.4. Класс `LinkedList<T>`

Класс `LinkedList<T>` реализует интерфейсы `IEnumerable<T>` и `ICollection<T>` (а также их необобщенные версии), но не `IList<T>`, поскольку доступ по индексу не поддерживается. Узлы списка реализованы с помощью такого класса:

```
public sealed class LinkedListNode<T>
{
    public LinkedList<T> List { get; }
    public LinkedListNode<T> Next { get; }
    public LinkedListNode<T> Previous { get; }
    public T Value { get; set; }
}
```

При добавлении узла можно указывать его позицию либо относительно другого узла, либо относительно начала/конца списка. Класс `LinkedList<T>` предоставляет для этого следующие методы:

```
public void AddFirst(LinkedListNode<T> node);
public LinkedListNode<T> AddFirst (T value);

public void AddLast (LinkedListNode<T> node);
public LinkedListNode<T> AddLast (T value);

public void AddAfter (LinkedListNode<T> node, LinkedListNode<T> newNode);
public LinkedListNode<T> AddAfter (LinkedListNode<T> node, T value);
```

```
public void AddBefore (LinkedListNode<T> node, LinkedListNode<T> newNode);  
public LinkedListNode<T> AddBefore (LinkedListNode<T> node, T value);
```

Для удаления элементов предлагаются похожие методы:

```
public void Clear();  
public void RemoveFirst();  
public void RemoveLast();  
public bool Remove (T value);  
public void Remove (LinkedListNode<T> node);
```

Класс `LinkedList<T>` имеет внутренние поля для отслеживания количества элементов в списке, а также для представления головы и хвоста списка. Доступ к таким полям обеспечивается с помощью следующих открытых свойств:

```
public int Count { get; } // Быстрое  
public LinkedListNode<T> First { get; } // Быстрое  
public LinkedListNode<T> Last { get; } // Быстрое
```

Класс `LinkedList<T>` также поддерживает показанные далее методы поиска (каждый из них требует, чтобы список был внутренне перечислимым):

```
public bool Contains (T value);  
public LinkedListNode<T> Find (T value);  
public LinkedListNode<T> FindLast (T value);
```

Наконец, класс `LinkedList<T>` поддерживает копирование в массив для индексированной обработки и получение перечислителя для работы оператора `foreach`:

```
public void CopyTo (T[] array, int index);  
public Enumerator<T> GetEnumerator();
```

Ниже демонстрируется применение класса `LinkedList<string>`:

```
var tune = new LinkedList<string>();  
tune.AddFirst ("do"); // do  
tune.AddLast ("so"); // do - so  
tune.AddAfter (tune.First, "re"); // do - re - so  
tune.AddAfter (tune.First.Next, "mi"); // do - re - mi - so  
tune.AddBefore (tune.Last, "fa"); // do - re - mi - fa - so  
tune.RemoveFirst(); // re - mi - fa - so  
tune.RemoveLast(); // re - mi - fa  
  
LinkedListNode<string> miNode = tune.Find ("mi");  
tune.Remove (miNode); // re - fa  
tune.AddFirst (miNode); // mi - re - fa  
  
foreach (string s in tune) Console.WriteLine (s);
```

Классы `Queue<T>` и `Queue`

Классы `Queue<T>` и `Queue` — это структуры данных FIFO (first-in first-out — первым пришел, первым обслужен; т.е. очередь), предоставляющие методы `Enqueue` (добавление элемента в конец очереди) и `Dequeue` (извлечение и удаление элемента с начала очереди). Также имеется метод `Peek`, предназначенный

для возвращения элемента с начала очереди без его удаления, и свойство Count (удобно для проверки, существуют ли элементы в очереди, перед их извлечением).

Хотя очереди являются перечислимыми, они не реализуют интерфейс IList<T>/IList, потому что доступ к членам напрямую по индексу никогда не производится. Тем не менее, есть метод ToArray, который предназначен для копирования элементов в массив, где к ним возможен произвольный доступ:

```
public class Queue<T> : IEnumerable<T>, ICollection, IEnumerable
{
    public Queue();
    public Queue (IEnumerable<T> collection); //Копирует существующие элементы
    public Queue (int capacity); // Сокращает количество автоматических изменений размера
    public void Clear();
    public bool Contains (T item);
    public void CopyTo (T[] array, int arrayIndex);
    public int Count { get; }
    public T Dequeue();
    public void Enqueue (T item);
    public Enumerator<T> GetEnumerator(); // Для поддержки оператора foreach
    public T Peek();
    public T[] ToArray();
    public void TrimExcess();
}
```

Вот пример использования класса Queue<int>:

```
var q = new Queue<int>();
q.Enqueue (10);
q.Enqueue (20);
int[] data = q.ToArray(); // Экспортирует в массив
Console.WriteLine (q.Count); // "2"
Console.WriteLine (q.Peek()); // "10"
Console.WriteLine (q.Dequeue()); // "10"
Console.WriteLine (q.Dequeue()); // "20"
Console.WriteLine (q.Dequeue()); // Генерируется исключение (очередь пуста)
```

Внутренне очереди реализованы с применением массива, который при необходимости расширяется, что очень похоже на обобщенный класс List. Очередь поддерживает индексы, которые указывают непосредственно на начальный и хвостовой элементы; таким образом, помещение и извлечение из очереди являются очень быстрыми операциями (кроме случая, когда требуется внутреннее изменение размера).

Классы Stack<T> и Stack

Классы Stack<T> и Stack — это структуры данных LIFO (last-in first-out — последним пришел, первым обслужен; т.е. стек), которые предоставляют методы Push (добавление элемента на верхушку стека) и Pop (извлечение и удаление элемента из верхушки стека). Также определены недеструктивный метод Peek, свойство Count и метод ToArray для экспорта данных в массив с целью произвольного доступа к ним:

```

public class Stack<T> : IEnumerable<T>, ICollection, IEnumerable
{
    public Stack();
    public Stack (IEnumerable<T> collection); // Копирует существующие элементы
    public Stack (int capacity); // Сокращает количество автоматических изменений размера
    public void Clear();
    public bool Contains (T item);
    public void CopyTo (T[] array, int arrayIndex);
    public int Count { get; }
    public Enumerator<T> GetEnumerator(); // Для поддержки оператора foreach
    public T Peek();
    public T Pop();
    public void Push (T item);
    public T[] ToArray();
    public void TrimExcess();
}

```

В следующем примере демонстрируется использование класса Stack<int>:

```

var s = new Stack<int>();
s.Push (1); // Содержимое стека: 1
s.Push (2); // Содержимое стека: 1,2
s.Push (3); // Содержимое стека: 1,2,3
Console.WriteLine (s.Count); // Выводит 3
Console.WriteLine (s.Peek()); // Выводит 3, содержимое стека: 1,2,3
Console.WriteLine (s.Pop()); // Выводит 3, содержимое стека: 1,2
Console.WriteLine (s.Pop()); // Выводит 2, содержимое стека: 1
Console.WriteLine (s.Pop()); // Выводит 1, содержимое стека: <пусто>
Console.WriteLine (s.Pop()); // Генерируется исключение (стек пуст)

```

Внутренне стеки реализованы с помощью массива, который при необходимости расширяется, что очень похоже на Queue<T> и List<T>.

Класс BitArray

Класс BitArray представляет собой коллекцию сжатых значений bool с динамически изменяющимся размером. С точки зрения затрат памяти класс BitArray более эффективен, чем простой массив bool и обобщенный список элементов bool, поскольку каждое значение занимает только один бит; в противном случае тип bool требует по одному байту на значение.

Индексатор BitArray читает и записывает индивидуальные биты:

```

var bits = new BitArray(2);
bits[1] = true;

```

Доступны четыре метода для выполнения побитовых операций (And, Or, Xor и Not). Все они кроме последнего принимают еще один экземпляр BitArray:

```

bits.Xor (bits); // Побитовое исключающее ИЛИ экземпляра bits с самим собой
Console.WriteLine (bits[1]); // False

```

Классы HashSet<T> и SortedSet<T>

Классы HashSet<T> и SortedSet<T> обладают следующим отличительными особенностями:

- их методы Contains выполняются быстро, применяя поиск на основе хеширования;
- они не хранят дублированные элементы и молча игнорируют запросы на добавление дубликатов;
- доступ к элементам по позициям невозможен.

Коллекция SortedSet<T> хранит элементы в упорядоченном виде, тогда как HashSet<T> — нет.

Общность типов HashSet<T> и SortedSet<T> обеспечивается интерфейсом ISet<T>. Начиная с .NET 5, эти классы также реализуют интерфейс по имени IReadOnlySet<T>, который реализуется и типами неизменяемых множеств (см. раздел “Неизменяемые коллекции” далее в главе).

Коллекция HashSet<T> реализована с помощью хеш-таблицы, в которой хранятся только ключи, а SortedSet<T> — посредством красно-черного дерева.

Обе коллекции реализуют интерфейс ICollection<T> и предлагают вполне ожидаемые методы, такие как Contains, Add и Remove. Вдобавок предусмотрен метод удаления на основе предиката по имени RemoveWhere.

В следующем коде из существующей коллекции конструируется экземпляр HashSet<char>, затем выполняется проверка членства и перечисление коллекции (обратите внимание на отсутствие дубликатов):

```
var letters = new HashSet<char> ("the quick brown fox");
Console.WriteLine (letters.Contains ('t'));           // True
Console.WriteLine (letters.Contains ('j')));          // False
foreach (char c in letters) Console.Write (c);        // the quickbrownfx
```

(Передача значения string конструктору HashSet<char> объясняется тем, что тип string реализует интерфейс IEnumerable<char>.)

Самый большой интерес вызывают операции над множествами. Приведенные ниже методы операций над множествами являются *деструктивными*, т.к. они модифицируют набор:

```
public void UnionWith      (IEnumerable<T> other);    // Добавляет
public void IntersectWith   (IEnumerable<T> other);    // Удаляет
public void ExceptWith     (IEnumerable<T> other);    // Удаляет
public void SymmetricExceptWith (IEnumerable<T> other); // Удаляет
```

тогда как следующие методы просто запрашивают набор и потому деструктивными не считаются:

```
public bool IsSubsetOf      (IEnumerable<T> other);
public bool IsProperSubsetOf (IEnumerable<T> other);
public bool IsSupersetOf    (IEnumerable<T> other);
public bool IsProperSupersetOf (IEnumerable<T> other);
public bool Overlaps        (IEnumerable<T> other);
public bool SetEquals       (IEnumerable<T> other);
```

Метод `UnionWith` добавляет все элементы из второго набора в первоначальный набор (исключая дубликаты). Метод `IntersectWith` удаляет элементы, которые не находятся сразу в обоих наборах. Вот как можно извлечь все гласные из набора символов:

```
var letters = new HashSet<char> ("the quick brown fox");
letters.IntersectWith ("aeiou");
foreach (char c in letters) Console.Write (c);           // euio
```

Метод `ExceptWith` удаляет указанные элементы из исходного набора. Ниже показано, каким образом удалить все гласные из набора:

```
var letters = new HashSet<char> ("the quick brown fox");
letters.ExceptWith ("aeiou");
foreach (char c in letters) Console.Write (c);           // th qckbrwnfx
```

Метод `SymmetricExceptWith` удаляет все элементы кроме тех, которые являются уникальными в одном или в другом наборе:

```
var letters = new HashSet<char> ("the quick brown fox");
letters.SymmetricExceptWith ("the lazy brown fox");
foreach (char c in letters) Console.Write (c);           // quicklazy
```

Обратите внимание, что поскольку типы `HashSet<T>` и `SortedSet<T>` реализуют интерфейс `IEnumerable<T>`, в качестве аргумента в любом методе операции над множествами можно использовать другой тип набора (или коллекции).

Тип `SortedSet<T>` предлагает все члены типа `HashSet<T>` и вдобавок следующие члены:

```
public virtual SortedSet<T> GetViewBetween (T lowerValue, T upperValue)
public IEnumerable<T> Reverse()
public T Min { get; }
public T Max { get; }
```

Кроме того, конструктор класса `SortedSet<T>` принимает дополнительный параметр типа `IComparer<T>` (отличающийся от компаратора эквивалентности).

Ниже приведен пример загрузки в `SortedSet<char>` тех же букв, что и ранее:

```
var letters = new SortedSet<char> ("the quick brown fox");
foreach (char c in letters) Console.Write (c);           // bcefhiknoqrtuvwxyz
```

Исходя из этого, получить буквы между “f” и “i” в наборе можно так:

```
foreach (char c in letters.GetViewBetween ('f', 'i'))
    Console.Write (c);                                // fhi
```

Словари

Словарь — это коллекция, в которой каждый элемент является парой “ключ/значение”. Словари чаще всего применяются для поиска и представления сортirованных списков.

В .NET определен стандартный протокол для словарей через интерфейсы `IDictionary` и `IDictionary<TKey, TValue>`, а также набор универсальных классов словарей. Упомянутые классы различаются в следующих отношениях:

- хранятся ли элементы в отсортированной последовательности;
- можно ли получать доступ к элементам по позиции (индексу) и по ключу;
- является тип обобщенным или необобщенным;
- является тип быстрым или медленным при извлечении элементов по ключу из крупного словаря.

В табл. 7.1 представлена сводка по всем классам словарей, а также описаны отличия в перечисленных выше аспектах. Значения времени указаны в миллисекундах и основаны на выполнении 50000 операций в словаре с целочисленными ключами и значениями на персональном компьютере с процессором 1,5 ГГц. (Разница в производительности между обобщенными и необобщенными версиями для одной и той же структуры коллекции объясняется упаковкой и связана только с элементами типов значений.)

С помощью записи “большое О” время извлечения можно описать следующим образом:

- $O(1)$ для `Hashtable`, `Dictionary` и `OrderedDictionary`;
- $O(\log n)$ для `SortedDictionary` и `SortedList`;
- $O(n)$ для `ListDictionary` (и несловарных типов, таких как `List<T>`).

где n — количество элементов в коллекции.

Интерфейс `IDictionary<TKey, TValue>`

Интерфейс `IDictionary<TKey, TValue>` определяет стандартный протокол для всех коллекций, основанных на парах “ключ/значение”. Он расширяет интерфейс `ICollection<T>`, добавляя методы и свойства для доступа к элементам на основе ключей произвольных типов:

```
public interface IDictionary <TKey, TValue> :  
    ICollection <KeyValuePair <TKey, TValue>>, IEnumerable  
{  
    bool ContainsKey (TKey key);  
    bool TryGetValue (TKey key, out TValue value);  
    void Add (TKey key, TValue value);  
    bool Remove (TKey key);  
    TValue this [TKey key] { get; set; } // Основной индексатор - по ключу  
    ICollection <TKey> Keys { get; } // Возвращает только ключи  
    ICollection <TValue> Values { get; } // Возвращает только значения  
}
```



Существует также интерфейс по имени `IReadOnlyDictionary<TKey, TValue>`, в котором определено подмножество членов словаря, допускающих только чтение.

Таблица 7.1. Классы словарей

Тип	Внутренняя структура	Поддерживается ли извлечение по индексу?	Накладные расходы, связанные с памятью (среднее количество байтов на элемент)	Скорость: произвольная вставка	Скорость: последовательная вставка	Скорость: извлечение по ключу
Несортированные						
Dictionary<K, V>	Хеш-таблица	Нет	22	30	30	20
Hashtable	Хеш-таблица	Нет	38	50	50	30
ListDictionary	Связный список	Нет	36	50 000	50 000	50 000
OrderedDictionary	Хеш-таблица плюс массив	Да	59	70	70	40
Сортированные						
SortedDictionary<K, V>	Красно-черное дерево	Нет	20	130	100	120
SortedList<K, V>	Пара массивов	Да	2	3 300	30	40
SortedList	Пара массивов	Да	27	4 500	100	180

Чтобы добавить элемент в словарь, необходимо либо вызвать метод `Add`, либо воспользоваться средством доступа `set` индекса — в последнем случае элемент добавляется в словарь, если такой ключ в словаре отсутствует (или производится обновление элемента, если ключ присутствует). Дублированные ключи запрещены во всех реализациях словарей, поэтому вызов метода `Add` два раза с тем же самым ключом приводит к генерации исключения.

Для извлечения элемента из словаря применяется либо индексатор, либо метод `TryGetValue`. Если ключ не существует, тогда индексатор генерирует исключение, в то время как метод `TryGetValue` возвращает `false`. Можно явно проверить членство, вызвав метод `ContainsKey`; однако за это придется заплатить двумя поисками, если элемент впоследствии будет извлекаться.

Перечисление прямо по `IDictionary<TKey, TValue>` возвращает последовательность структур `KeyValuePair`:

```
public struct KeyValuePair <TKey, TValue>
{
    public TKey Key { get; }
    public TValue Value { get; }
}
```

С помощью свойств `Keys/Values` словаря можно организовать перечисление только по ключам или только по значениям.

Мы продемонстрируем использование интерфейса `IDictionary<TKey, TValue>` с обобщенным классом `Dictionary` в следующем разделе.

Интерфейс `IDictionary`

Необобщенный интерфейс `IDictionary` в принципе является таким же, как интерфейс `IDictionary<TKey, TValue>`, за исключением двух важных функциональных отличий. Эти отличия необходимо понимать, потому что `IDictionary` присутствует в унаследованном коде (а местами и в самой библиотеке .NET BCL):

- извлечение несуществующего ключа через индексатор дает в результате `null` (не приводя к генерации исключения);
- членство проверяется с помощью метода `Contains`, но не `ContainsKey`.

Перечисление по необобщенному интерфейсу `IDictionary` возвращает последовательность структур `DictionaryEntry`:

```
public struct DictionaryEntry
{
    public object Key { get; set; }
    public object Value { get; set; }
}
```

Классы `Dictionary<TKey, TValue>` и `Hashtable`

Обобщенный класс `Dictionary` представляет одну из наиболее часто применяемых коллекций (наряду с коллекцией `List<T>`). Для хранения ключей и значений класс `Dictionary` использует структуру данных в форме хеш-таблицы, а также характеризуется высокой скоростью работы и эффективностью.



Необобщенная версия `Dictionary< TKey, TValue >` называется `Hashtable`; необобщенного класса, который бы имел имя “`Dictionary`”, не существует. Когда мы ссылаемся просто на `Dictionary`, то имеем в виду обобщенный класс `Dictionary< TKey, TValue >`.

Класс `Dictionary` реализует обобщенный и необобщенный интерфейсы `IDictionary`, причем обобщенный интерфейс `IDictionary` открыт. Фактически `Dictionary` является “учебной” реализацией обобщенного интерфейса `IDictionary`.

Ниже показано, как с ним работать:

```
var d = new Dictionary<string, int>();

d.Add("One", 1);
d["Two"] = 2; // Добавляет в словарь, потому что "two" пока отсутствует
d["Two"] = 22; // Обновляет словарь, т.к. "two" уже присутствует
d["Three"] = 3;

Console.WriteLine (d["Two"]); // Выводит "22"
Console.WriteLine (d.ContainsKey ("One")); // True (быстрая операция)
Console.WriteLine (d.ContainsValue (3)); // True (медленная операция)
int val = 0;
if (!d.TryGetValue ("onE", out val))
    Console.WriteLine ("No val"); // "No val" (чувствительно к регистру)

// Три разных способа перечисления словаря:

foreach (KeyValuePair<string, int> kv in d) // One; 1
    Console.WriteLine (kv.Key + "; " + kv.Value); // Two; 22
                                                // Three; 3

foreach (string s in d.Keys) Console.Write (s); // OneTwoThree
Console.WriteLine();
foreach (int i in d.Values) Console.Write (i); // 1223
```

Лежащая в основе `Dictionary` хеш-таблица преобразует ключ каждого элемента в целочисленный хеш-код — псевдоуникальное значение — и затем применяет алгоритм для преобразования хеш-кода в хеш-ключ. Такой хеш-ключ используется внутренне для определения, к какому “сегменту” относится запись. Если сегмент содержит более одного значения, тогда в нем производится линейный поиск. Хорошая хеш-функция не стремится возвращать строго уникальные хеш-коды (что обычно невозможно); она старается вернуть хеш-коды, которые равномерно распределены в пространстве 32-битных целых чисел. Это позволяет избежать сценария с получением нескольких очень крупных (и неэффективных) сегментов.

Благодаря своей возможности определения эквивалентности ключей и получения хеш-кодов словарь может работать с ключами любого типа. По умолчанию эквивалентность определяется с помощью метода `object.Equals` ключа, а псевдоуникальный хеш-код получается через метод `GetHashCode` ключа. Такое поведение можно изменить, либо переопределив указанные методы, либо предоставив при конструировании словаря объект, который реализует интерфейс `IEqualityComparer`.

Распространенный случай применения предусматривает указание нечувствительного к регистру компаратора эквивалентности, когда используются строковые ключи:

```
var d = new Dictionary<string, int> (StringComparer.OrdinalIgnoreCase);
```

Мы обсудим данный момент более подробно в разделе “Подключение протоколов эквивалентности и порядка” далее в главе.

Как и со многими другими типами коллекций, производительность словаря можно несколько улучшить за счет указания в конструкторе ожидаемого размера коллекции, избегая или снижая тем самым потребность во внутренних операциях изменения размера.

Необщенная версия имеет имя `Hashtable` и функционально подобна, не считая отличий, которые являются результатом открытия ею необщенного интерфейса `IDictionary`, как обсуждалось ранее.

Недостаток `Dictionary` и `Hashtable` связан с тем, что элементы не отсортированы. Кроме того, первоначальный порядок, в котором добавлялись элементы, не предохраняется. Как и со всеми словарями, дублированные ключи не разрешены.



Когда в 2005 году появились обобщенные коллекции, команда разработчиков CLR решила именовать их согласно тому, что они представляют (`Dictionary`, `List`), а не тому, как они реализованы внутренне (`Hashtable`, `ArrayList`). Хотя такой подход обеспечивает свободу изменения реализации в будущем, он также означает, что в имени больше не отражается *контракт производительности* (зачастую являющийся самым важным критерием при выборе одного вида коллекции из нескольких доступных).

Класс `OrderedDictionary`

Класс `OrderedDictionary` — необщенный словарь, который хранит элементы в порядке их добавления. С помощью `OrderedDictionary` получать доступ к элементам можно и по индексам, и по ключам.



Класс `OrderedDictionary` не является *отсортированным* словарем.

Класс `OrderedDictionary` представляет собой комбинацию классов `Hashtable` и `ArrayList`. Таким образом, он обладает всей функциональностью `Hashtable`, а также имеет функции вроде `RemoveAt` и целочисленный индексатор. Кроме того, класс `OrderedDictionary` открывает доступ к свойствам `Keys` и `Values`, которые возвращают элементы в их исходном порядке.

Класс `OrderedDictionary` появился в .NET 2.0 и, как ни странно, его обобщенной версии не предусмотрено.

Классы `ListDictionary` и `HybridDictionary`

Для хранения лежащих в основе данных в классе `ListDictionary` применяется односвязный список. Он не обеспечивает сортировку, хотя предохраняет исходный порядок элементов. С большими списками класс `ListDictionary` работает исключительно медленно. Единственным “предметом гордости” можно считать его эффективность в случае очень маленьких списков (до 10 элементов).

Класс `HybridDictionary` — это `ListDictionary`, который автоматически преобразуется в `Hashtable` при достижении определенного размера, решая проблемы низкой производительности класса `ListDictionary`. Идея заключается в том, чтобы обеспечить невысокое потребление памяти для мелких словарей и хорошую производительность для крупных словарей. Однако, учитывая накладные расходы, которые сопровождают переход от одного класса к другому, а также тот факт, что класс `Dictionary` довольно неплох в любом сценарии, вполне разумно использовать `Dictionary` с самого начала.

Оба класса доступны только в необобщенной форме.

Отсортированные словари

Библиотека .NET BCL предлагает два класса словарей, которые внутренне устроены так, что их содержимое всегда сортируется по ключу:

- `SortedDictionary< TKey, TValue >`
- `SortedList< TKey, TValue >`¹

(В настоящем разделе мы будем сокращать `< TKey, TValue >` до `<, >`.)

Класс `SortedDictionary<, >` применяет красно-черное дерево — структуру данных, которая спроектирована так, что работает одинаково хорошо в любом сценарии вставки либо извлечения.

Класс `SortedList<, >` внутренне реализован с помощью пары упорядоченных массивов, обеспечивая высокую производительность извлечения (посредством двоичного поиска), но низкую производительность вставки (поскольку существующие значения должны сдвигаться, чтобы освободить место под новый элемент).

Класс `SortedDictionary<, >` намного быстрее класса `SortedList<, >` при вставке элементов в произвольном порядке (особенно в случае крупных списков). Тем не менее, класс `SortedList<, >` обладает дополнительной возможностью: доступом к элементам по индексу и по ключу. Благодаря отсортированному списку можно переходить непосредственно к *n*-ному элементу в отсортированной последовательности (с помощью индексатора на свойствах `Keys`/`Values`). Чтобы сделать то же самое с помощью `SortedDictionary<, >`, потребуется вручную пройти через *n* элементов. (В качестве альтернативы можно было бы написать класс, комбинирующий отсортированный словарь и список.)

Ни одна из трех коллекций не допускает наличие дублированных ключей (как и все словари).

¹ Существует также функционально идентичная ему необобщенная версия по имени `SortedList`.

В следующем примере используется рефлексия с целью загрузки всех методов, определенных в классе `System.Object`, внутрь отсортированного списка с ключами по именам, после чего производится перечисление их ключей и значений:

```
// Класс MethodInfo находится в пространстве имен System.Reflection
var sorted = new SortedList <string, MethodInfo>();
foreach (MethodInfo m in typeof (object).GetMethods())
    sorted [m.Name] = m;
foreach (string name in sorted.Keys)
    Console.WriteLine (name);
foreach (MethodInfo m in sorted.Values)
    Console.WriteLine (m.Name + " returns a " + m.ReturnType);
```

Ниже показаны результаты первого перечисления:

```
Equals
GetHashCode
GetType
ReferenceEquals
ToString
```

А вот результаты второго перечисления:

```
Equals returns a System.Boolean
GetHashCode returns a System.Int32
GetType returns a System.Type
ReferenceEquals returns a System.Boolean
ToString returns a System.String
```

Обратите внимание, что словарь наполняется посредством своего индексатора. Если заменить метод `Add`, то сгенерируется исключение, т.к. в классе `object`, на котором осуществляется рефлексия, метод `Equals` перегружен, и добавить в словарь тот же самый ключ два раза не удастся. В случае использования индексатора элемент, добавляемый позже, переписывает элемент, добавленный раньше, предотвращая возникновение такой ошибки.



Можно сохранять несколько членов одного ключа, делая каждый элемент значения списком:

```
SortedList <string, List<MethodInfo>>
```

Расширяя рассматриваемый пример, следующий код извлекает объект `MethodInfo` с ключом "GetHashCode", точно как в случае обычного словаря:

```
Console.WriteLine (sorted ["GetHashCode"]); // Int32 GetHashCode()
```

Весь написанный до сих пор код также будет работать с классом `SortedDictionary<, >`. Однако показанные ниже две строки кода, которые извлекают последний ключ и значение, работают только с отсортированным списком:

```
Console.WriteLine (sorted.Keys [sorted.Count - 1]); // ToString
Console.WriteLine (sorted.Values[sorted.Count - 1].IsVirtual); // True
```

Настраиваемые коллекции и посредники

Классы коллекций, которые обсуждались в предшествующих разделах, удобны своей возможностью непосредственного создания экземпляров, но они не позволяют управлять тем, что происходит, когда элемент добавляется или удаляется из коллекции. При работе со строго типизированными коллекциями в приложении периодически возникает необходимость в таком контроле, например:

- для запуска события, когда элемент добавляется или удаляется;
- для обновления свойств из-за добавления или удаления элемента;
- для обнаружения “несанкционированной” операции добавления/удаления и генерации исключения (скажем, если операция нарушает какое-то бизнес-правило).

Именно по указанным причинам библиотека .NET BCL предоставляет классы коллекций, определенные в пространстве имен `System.Collections.ObjectModel`. В сущности, они являются посредниками, или оболочками, реализующими интерфейс `IList<T>` либо `IDictionary<, >`, которые переадресуют вызовы методам внутренней коллекции. Каждая операция `Add`, `Remove` или `Clear` проходит через виртуальный метод, действующий в качестве “шлюза”, когда он переопределен.

Классы настраиваемых коллекций обычно применяются для коллекций, открытых публично; например, в классе `System.Windows.Form` официально открыта коллекция элементов управления.

Классы `Collection<T>` и `CollectionBase`

Класс `Collection<T>` является настраиваемой оболочкой для `List<T>`. Помимо реализации интерфейсов `IList<T>` и `IList` в нем определены четыре дополнительных виртуальных метода и защищенное свойство:

```
public class Collection<T> :  
    IList<T>, ICollection<T>, IEnumerable<T>, IList, ICollection, IEnumerable  
{  
    // ...  
  
    protected virtual void ClearItems();  
    protected virtual void InsertItem (int index, T item);  
    protected virtual void RemoveItem (int index);  
    protected virtual void SetItem (int index, T item);  
  
    protected IList<T> Items { get; }  
}
```

Виртуальные методы предоставляют шлюз, с помощью которого можно “привязаться” с целью изменения или расширения нормального поведения списка. Защищенное свойство `Items` позволяет реализующему коду получать прямой доступ во “внутренний список” — это используется для внесения изменений внутренне без запуска виртуальных методов.

Виртуальные методы переопределять не обязательно; их можно оставить незатронутыми, если только не возникает потребность в изменении стандартного

поведения списка. В следующем примере показан типичный “скелет” программы, в которой применяется класс Collection<T>:

```
Zoo zoo = new Zoo();
zoo.Animals.Add (new Animal ("Kangaroo", 10));
zoo.Animals.Add (new Animal ("Mr Sea Lion", 20));
foreach (Animal a in zoo.Animals) Console.WriteLine (a.Name);

public class Animal
{
    public string Name;
    public int Popularity;

    public Animal (string name, int popularity)
    {
        Name = name; Popularity = popularity;
    }
}

public class AnimalCollection : Collection <Animal>
{
    // AnimalCollection - уже полностью функционирующий список животных.
    // Никакого дополнительного кода не требуется.
}

public class Zoo      // Класс, который откроет доступ к AnimalCollection.
{
    // Обычно он может иметь дополнительные члены.
    public readonly AnimalCollection Animals = new AnimalCollection();
}
```

Как здесь видно, класс AnimalCollection не обладает большей функциональностью, чем простой класс List<Animal>; его роль заключается в том, чтобы предоставить базу для будущего расширения. В целях иллюстрации мы добавим к Animal свойство Zoo, так что экземпляр животного может ссылаться на зоопарк (zoo), где оно содержится, и переопределим все виртуальные методы в Collection<Animal> для автоматической поддержки данного свойства:

```
public class Animal
{
    public string Name;
    public int Popularity;
    public Zoo Zoo { get; internal set; }
    public Animal(string name, int popularity)
    {
        Name = name; Popularity = popularity;
    }
}

public class AnimalCollection : Collection <Animal>
{
    Zoo zoo;
    public AnimalCollection (Zoo zoo) { this.zoo = zoo; }

    protected override void InsertItem (int index, Animal item)
    {
        base.InsertItem (index, item);
        item.Zoo = zoo;
    }
}
```

```

protected override void SetItem (int index, Animal item)
{
    base.SetItem (index, item);
    item.Zoo = zoo;
}
protected override void RemoveItem (int index)
{
    this [index].Zoo = null;
    base.RemoveItem (index);
}
protected override void ClearItems()
{
    foreach (Animal a in this) a.Zoo = null;
    base.ClearItems();
}
}
public class Zoo
{
    public readonly AnimalCollection Animals;
    public Zoo() { Animals = new AnimalCollection (this); }
}

```

Класс `Collection<T>` также имеет конструктор, который принимает существующую реализацию `IList<T>`. В отличие от других классов коллекций передаваемый список не *копируется*, а для него *создается посредник*, т.е. последующие изменения будут отражаться в оболочке `Collection<T>` (хотя и без запуска виртуальных методов `Collection<T>`). И наоборот, изменения, внесенные через `Collection<T>`, будут воздействовать на лежащий в основе список.

Класс CollectionBase

Класс `CollectionBase` — это необобщенная версия `Collection<T>`. Он поддерживает большинство тех же возможностей, что и `Collection<T>`, но менее удобен в использовании.

Вместо шаблонных методов `InsertItem`, `RemoveItem`, `SetItem` и `ClearItem` класс `CollectionBase` имеет методы “привязки”, что удваивает количество требуемых методов: `OnInsert`, `OnInsertComplete`, `OnSet`, `OnSetComplete`, `OnRemove`, `OnRemoveComplete`, `OnClear` и `OnClearComplete`. Поскольку класс `CollectionBase` не является обобщенным, при создании его подклассов понадобится также реализовать типизированные методы — как минимум, типизированный индексатор и метод `Add`.

Классы KeyedCollection<TKey, TItem> и DictionaryBase

Класс `KeyedCollection<TKey, TItem>` представляет собой подкласс класса `Collection<TItem>`. Определенная функциональность в него добавлена, а определенная — удалена. К добавленной функциональности относится возможность доступа к элементам по ключу, почти как в словаре. Удаление функциональности касается устранения возможности создавать посредника для собственного внутреннего списка.

Коллекция с ключами имеет некоторое сходство с классом `OrderedDictionary` в том, что комбинирует линейный список с хеш-таблицей. Тем не менее, в отличие от `OrderedDictionary` коллекция с ключами не реализует интерфейс `IDictionary` и не поддерживает концепцию пары “ключ/значение”. Взамен ключи получаются из самих элементов: через абстрактный метод `GetKeyForItem`. Это означает, что перечисление по коллекции с ключами производится точно так же, как в обычном списке.

Лучше всего воспринимать `KeyedCollection< TKey, TItem >` как класс `Collection< TItem >` с добавочным быстрым поиском по ключу.

Поскольку коллекция с ключами является подклассом класса `Collection<>`, она наследует всю функциональность `Collection<>` кроме возможности указания существующего списка при конструировании. В классе `KeyedCollection< TKey, TItem >` определены дополнительные члены, как показано ниже:

```
public abstract class KeyedCollection < TKey, TItem > : Collection < TItem >
{
    // ...

    protected abstract TKey GetKeyForItem(TItem item);
    protected void ChangeItemKey(TItem item, TKey newKey);

    // Быстрый поиск по ключу - является дополнением к поиску по индексу
    public TItem this[TKey key] { get; }

    protected IDictionary< TKey, TItem > Dictionary { get; }
}
```

Метод `GetKeyForItem` переопределяется для получения ключа элемента из лежащего в основе объекта. Метод `ChangeItemKey` должен вызываться, если свойство ключа элемента изменяется, чтобы обновить внутренний словарь. Свойство `Dictionary` возвращает внутренний словарь, применяемый для реализации поиска, который создается при добавлении первого элемента. Такое поведение можно изменить, указав в конструкторе порог создания, что отсрочит создание внутреннего словаря до момента, когда будет достигнуто пороговое значение (а тем временем при поступлении запроса элемента по ключу будет выполняться линейный поиск). Веская причина, по которой порог создания не указывается, объясняется тем, что наличие допустимого словаря может быть полезно в получении коллекции `ICollection<>` ключей через свойство `Keys` класса `Dictionary`. Затем данная коллекция может быть передана открытому свойству.

Самое распространенное использование класса `KeyedCollection<, >` связано с предоставлением коллекции элементов, доступных как по индексу, так и по имени. В целях демонстрации мы реализуем класс `AnimalCollection` в виде `KeyedCollection< string, Animal >`:

```
public class Animal
{
    string name;
    public string Name
    {
        get { return name; }
```

```

set {
    if (Zoo != null) Zoo.Animals.NotifyNameChange (this, value);
    name = value;
}
}

public int Popularity;
public Zoo Zoo { get; internal set; }

public Animal (string name, int popularity)
{
    Name = name; Popularity = popularity;
}
}

public class AnimalCollection : KeyedCollection <string, Animal>
{
    Zoo zoo;
    public AnimalCollection (Zoo zoo) { this.zoo = zoo; }
    internal void NotifyNameChange (Animal a, string newName) =>
        this.ChangeItemKey (a, newName);
    protected override string GetKeyForItem (Animal item) => item.Name;
    //Следующие методы должны быть реализованы так же, как в предыдущем примере
    protected override void InsertItem (int index, Animal item)... 
    protected override void SetItem (int index, Animal item)... 
    protected override void RemoveItem (int index)... 
    protected override void ClearItems()...
}

public class Zoo
{
    public readonly AnimalCollection Animals;
    public Zoo() { Animals = new AnimalCollection (this); }
}

```

Вот как можно задействовать класс AnimalCollection:

```

Zoo zoo = new Zoo();
zoo.Animals.Add (new Animal ("Kangaroo", 10));
zoo.Animals.Add (new Animal ("Mr Sea Lion", 20));
Console.WriteLine (zoo.Animals [0].Popularity);           // 10
Console.WriteLine (zoo.Animals ["Mr Sea Lion"].Popularity); // 20
zoo.Animals ["Kangaroo"].Name = "Mr Roo";
Console.WriteLine (zoo.Animals ["Mr Roo"].Popularity);     // 10

```

Класс DictionaryBase

Необобщенная версия коллекции KeyedCollection называется DictionaryBase. Этот унаследованный класс существенно отличается принятым в нем подходом: он реализует интерфейс IDictionary и подобно классу CollectionBase применяет множество неуклюжих методов привязки: OnInsert, OnInsertComplete, OnSet, OnSetComplete, OnRemove, OnRemoveComplete, OnClear и OnClearComplete (и дополнительно OnGet). Главное преимущество реализации IDictionary вместо принятия подхода с KeyedCollection состоит в том, что для получения ключей не требуется создавать его подкласс. Но поскольку основным назначением DictionaryBase

является создание подклассов, в итоге какие-либо преимущества вообще отсутствуют. Улучшенная модель в KeyedCollection почти наверняка объясняется тем фактом, что данный класс был написан несколькими годами позже, с оглядкой на прошлый опыт. Класс DictionaryBase лучше всего рассматривать как предназначенный для обратной совместимости.

Класс `ReadOnlyCollection<T>`

Класс `ReadOnlyCollection<T>` — это оболочка, или *посредник*, который является представлением коллекции, доступным только для чтения. Он полезен в ситуации, когда нужно разрешить классу открывать доступ только для чтения к коллекции, которую данный класс может внутренне обновлять.

Конструктор класса `ReadOnlyCollection<T>` принимает входную коллекцию, на которую будет поддерживаться постоянная ссылка. Он не создает статическую копию входной коллекции, а потому последующие изменения входной коллекции будут видны через оболочку, допускающую только чтение.

В целях иллюстрации предположим, что классу необходимо предоставить открытый доступ только для чтения к списку строк по имени `Names`. Вот как мы могли бы поступить:

```
public class Test
{
    List<string> names = new List<string>();
    public IReadonlyList<string> Names => names;
}
```

Хотя `Names` возвращает интерфейс только для чтения, потребитель по-прежнему может во время выполнения предпринять приведение вниз к `List<string>` или `IList<string>` и затем вызывать `Add`, `Remove` или `Clear` на списке. Класс `ReadOnlyCollection<T>` обеспечивает более надежное решение:

```
public class Test
{
    List<string> names = new List<string>();
    public ReadOnlyCollection<string> Names { get; private set; }
    public Test() => Names = new ReadOnlyCollection<string> (names);
    public void AddInternally() => names.Add ("test");
}
```

Теперь изменять список имен могут только члены класса `Test`:

```
Test t = new Test();
Console.WriteLine (t.Names.Count);           // 0
t.AddInternally();
Console.WriteLine (t.Names.Count);           // 1
t.Names.Add ("test");                      // Ошибка на этапе компиляции
((IList<string>) t.Names).Add ("test");   // Генерируется исключение
                                         // NotSupportedException
```

Неизменяемые коллекции

Только что было описано, каким образом `ReadOnlyCollection<T>` создает представление коллекции, допускающее только чтение. Ограничение возможности записывания в коллекцию (ее изменения) или в любой другой объект упрощает программное обеспечение и уменьшает количество ошибок.

Неизменяемые коллекции расширяют данный принцип, предлагая коллекции, которые после инициализации вообще не могут быть модифицированы. Если вам нужно добавить элемент в неизменяемую коллекцию, тогда вы должны создать новый экземпляр коллекции, оставив старый экземпляр незатронутым.

Неизменяемость является отличительной чертой функционального программирования и обеспечивает следующие преимущества:

- она устраняет крупный класс ошибок, ассоциированных с изменением состояния;
- она значительно упрощает реализацию параллелизма и многопоточной обработки, избегая большинства проблем с безопасностью в отношении потоков, которые мы рассмотрим в главах 14, 21 и 22;
- она облегчает понимание кода.

Недостаток неизменяемости в том, что когда необходимо внести изменение, вам придется создавать целиком новый объект. В итоге снижается производительность, хотя в текущем разделе мы обсудим стратегии смягчения последствий, включая возможность повторного использования частей первоначальной структуры.

Неизменяемые коллекции являются частью .NET (в .NET Framework они доступны через NuGet-пакет `System.Collections.Immutable`). Все коллекции определены в пространстве имен `System.Collections.Immutable`:

Тип	Внутренняя структура
<code>ImmutableArray<T></code>	Массив
<code>ImmutableList<T></code>	AVL-дерево
<code>ImmutableDictionary<K, V></code>	AVL-дерево
<code>ImmutableHashSet<T></code>	AVL-дерево
<code>ImmutableSortedDictionary<K, V></code>	AVL-дерево
<code>ImmutableSortedSet<T></code>	AVL-дерево
<code>ImmutableStack<T></code>	Связный список
<code>ImmutableQueue<T></code>	Связный список

Типы `ImmutableArray<T>` и `ImmutableList<T>` представляют собой неизменяемые версии `List<T>`. Оба они делают ту же самую работу, но с разными характеристиками производительности, которые мы обсудим в разделе “Неизменяемые коллекции и производительность” далее в главе.

Неизменяемые коллекции предоставляют доступ к открытому интерфейсу подобно своим изменяемым аналогам. Ключевое отличие в том, что методы, которые выглядят как изменяющие коллекцию (вроде Add или Remove), не модифицируют первоначальную коллекцию, а взамен возвращают новую коллекцию с добавленным или удаленным элементом. Это называется *неразрушающим изменением*.



Неизменяемые коллекции предотвращают добавление и удаление элементов; они не препятствуют изменению самих элементов. Чтобы получить все преимущества неизменяемости, вы должны обеспечить наличие в неизменяемой коллекции только неизменяемых элементов.

Создание неизменяемых коллекций

Каждый тип неизменяемой коллекции предлагает метод Create<T>(), который принимает необязательные начальные значения и возвращает инициализированную неизменяемую коллекцию:

```
ImmutableArray<int> array = ImmutableArray.Create<int> (1, 2, 3);
```

Кроме того, каждая коллекция предлагает метод CreateRange<T>, выполняющий такую же работу, как и Create<T>; разница в том, что его параметром типа является IEnumerable<T>, а не params T[].

Создавать неизменяемую коллекцию можно и из существующей реализации IEnumerable<T>, используя подходящие расширяющие методы (ToImmutableArray, ToImmutableList, ToImmutableDictionary и т.д.):

```
var list = new[] { 1, 2, 3 }.ToImmutableList();
```

Манипулирование неизменяемыми коллекциями

Метод Add возвращает новую коллекцию, содержащую существующие элементы плюс новый элемент:

```
var oldList = ImmutableList.Create<int> (1, 2, 3);
ImmutableList<int> newList = oldList.Add (4);
Console.WriteLine (oldList.Count);           // 3 (не изменилось)
Console.WriteLine (newList.Count);           // 4
```

Метод Remove работает в той же манере, возвращая новую коллекцию, из которой удален элемент.

Многократное добавление или удаление элементов подобным образом неэффективно, потому что для каждой операции добавления или удаления создается новая неизменяемая коллекция. Более удачное решение предусматривает вызов метода AddRange (или RemoveRange), принимающего реализацию IEnumerable<T> с элементами, которые будут добавлены или удалены за один присест:

```
var anotherList = oldList.AddRange ([4, 5, 6]);
```

В неизменяемом списке и массиве также определены методы `Insert` и `InsertRange` для вставки элементов по специальному индексу, метод `RemoveAt` для удаления элемента по индексу и метод `RemoveAll`, который удаляет на основе предиката.

Построители

Для более сложных потребностей в инициализации каждый класс неизменяемой коллекции определяет аналог *построителя*. Построители представляют собой классы, которые функционально эквивалентны изменяемой коллекции и обладают сходными характеристиками производительности. После того, как данные инициализированы, вызов `.ToImmutable()` на построителе возвращает неизменяемую коллекцию:

```
ImmutableArray<int>.Builder builder = ImmutableArray.CreateBuilder<int>();  
builder.Add(1);  
builder.Add(2);  
builder.Add(3);  
builder.RemoveAt(0);  
ImmutableArray<int> myImmutable = builder.ToImmutable();
```

Построители можно также применять для *пакетирования* множества обновлений, подлежащих внесению в существующую неизменяемую коллекцию:

```
var builder2 = myImmutable.ToBuilder();  
builder2.Add(4);           // Эффективная операция  
builder2.Remove(2);       // Эффективная операция  
...                      // Дополнительные изменения в построителе...  
// Возвратить новую неизменяемую коллекцию, в которой применены все изменения:  
ImmutableArray<int> myImmutable2 = builder2.ToImmutable();
```

Неизменяемые коллекции и производительность

Большинство неизменяемых коллекций внутренне используют *AVL-дерево* (сбалансированное двоичное дерево поиска; аббревиатура AVL образована по первым буквам фамилий его создателей Г.М. Адельсона-Вельского и Е.М. Ландиса — *прим. пер.*), которое дает возможность операциям добавления/удаления повторно задействовать части первоначальной внутренней структуры, не создавая коллекцию заново. В итоге накладные расходы операций добавления/удаления снижаются с потенциально *огромных* (в случае крупных коллекций) до *умеренно больших*, но за счет замедления операций чтения. В результате большинство неизменяемых коллекций оказываются медленнее своих изменяемых аналогов при чтении и записи.

Наиболее серьезно страдает тип `ImmutableList<T>`, операции чтения и добавления в котором от 10 до 200 раз медленнее, чем в `List<T>` (в зависимости от размера списка). Вот почему существует тип `ImmutableArray<T>`: за счет применения внутри себя массива он избегает накладных расходов, связанных с операциями чтения (для которых он сопоставим по производительности с обычным изменяемым массивом). Обратной стороной является тот факт, что операции добавления в нем гораздо медленнее, чем (даже) в `ImmutableList<T>`, потому что ничего из первоначальной структуры не может использоваться повторно.

Следовательно, тип `ImmutableArray<T>` желательно применять, когда вам нужна высокая производительность чтения, и вы не ожидаете множества обращений к `Add` или `Remove` (без использования построителя):

Тип	Производительность чтения	Производительность добавления
<code>ImmutableList<T></code>	Низкая	Низкая
<code>ImmutableArray<T></code>	Очень высокая	Очень низкая



Вызов метода `Remove` на экземпляре `ImmutableArray` сопряжен с более высокими затратами, чем вызов `Remove` на экземпляре `List<T>` (даже в худшем случае удаления первого элемента), поскольку выделение памяти под новую коллекцию создает дополнительную нагрузку на сборщик мусора.

Хотя неизменяемые коллекции в целом влекут за собой потенциально значительное снижение производительности, важно удерживать общую величину в перспективе. На обычном портативном компьютере операция добавления для экземпляра `ImmutableList` с миллионом элементов по-прежнему может длиться менее микросекунды, а операция чтения — менее 100 нс. И если вам необходимо выполнять операции записи в цикле, то вы можете избежать накопления накладных расходов за счет применения построителя.

Уменьшить накладные расходы помогают также следующие факторы.

- Неизменяемость позволяет облегчить распараллеливание (см. главу 22), так что вы можете задействовать все доступные ядра. Распараллеливание с изменяемым состоянием легко приводит к ошибкам и требует использования блокировок или параллельных коллекций, что наносит ущерб производительности.
- Благодаря неизменяемости вам не придется создавать “защитные копии” коллекций или структур данных, чтобы препятствовать непредвиденным изменениям. Это было фактором в пользу применения неизменяемых коллекций при написании недавних порций Visual Studio.
- В большинстве типичных программ некоторые коллекции содержать достаточно количество элементов, чтобы разница имела значение.

Помимо Visual Studio с использованием неизменяемых коллекций был построен хорошо работающий набор инструментальных средств Microsoft Roslyn, демонстрируя тем самым, что преимущества могут перевешивать затраты.

Замороженные коллекции

Начиная с .NET 8, пространство имен `System.Collections.Frozen` содержит следующие два класса коллекций, допускающие только чтение:

- `FrozenDictionary< TKey, TValue >`
- `FrozenSet< T >`

Они похожи на классы `ImmutableDictionary<K, V>` и `ImmutableHashSet<T>`, но в них отсутствуют методы неразрушающего изменения (вроде `Add` или `Remove`), что обеспечивает высокую оптимизацию производительности чтения. Для создания замороженной коллекции необходимо сначала создать другую коллекцию или последовательность, а затем вызвать расширяющий метод `ToFrozenDictionary` или `ToFrozenSet`:

```
int[] numbers = { 10, 20, 30 };
FrozenSet<int> frozen = numbers.ToFrozenSet();
Console.WriteLine (frozen.Contains (10)); // True
```

Замороженные коллекции великолепно подходят для поиска, который инициализируется в начале программы и затем используется на протяжении всей жизни приложения:

```
class Disassembler
{
    public readonly static IReadOnlyDictionary<string, string> OpCodeLookup =
        new Dictionary<string, string>()
    {
        { "ADC", "Add with Carry" },
        { "ADD", "Add" },
        { "AND", "Logical AND" },
        { "ANDN", "Logical AND NOT" },
        ...
    }
    .ToFrozenDictionary();
}
```

Замороженные коллекции реализуют стандартные интерфейсы словаря/набора, включая их версии, доступные только для чтения. В этом примере мы представили `FrozenDictionary<string, string>` как поле типа `IReadOnlyDictionary<string, string>`.

Подключение протоколов эквивалентности и порядка

В разделах “Сравнение эквивалентности” и “Сравнение порядка” главы 6 были описаны стандартные протоколы .NET, которые привносят в тип возможность эквивалентности, хеширования и сравнения. Тип, который реализует упомянутые протоколы, может корректно функционировать в словаре или отсортированном списке. В частности:

- тип, для которого методы `Equals` и `GetHashCode` возвращают осмысленные результаты, может использоваться в качестве ключа в `Dictionary` или `Hashtable`;
- тип, который реализует `IComparable/IComparable<T>`, может применяться в качестве ключа в любом *отсортированном* словаре или списке.

Стандартная реализация эквивалентности или сравнения типа обычно отражает то, что является наиболее “естественным” для данного типа. Тем не менее,

иногда стандартное поведение не подходит. Может понадобиться словарь, в котором ключ типа `string` трактуется без учета регистра. Или же может потребоваться список заказчиков, отсортированный по их почтовым индексам. По этой причине в .NET также определен соответствующий набор “подключаемых” протоколов. Подключаемые протоколы служат двум целям:

- они позволяют переключаться на альтернативное поведение эквивалентности или сравнения;
- они позволяют использовать словарь или отсортированную коллекцию с типом ключа, который не обладает внутренней возможностью эквивалентности или сравнения.

Подключаемые протоколы состоят из указанных ниже интерфейсов.

- `IEqualityComparer` и `IEqualityComparer<T>`
 - выполняют подключаемое *сравнение эквивалентности и хеширование*;
 - распознаются классами `Hashtable` и `Dictionary`.
- `IComparer` и `IComparer<T>`
 - выполняют подключаемое *сравнение порядка*;
 - распознаются отсортированными словарями и коллекциями, а также методом `Array.Sort`.

Каждый интерфейс доступен в обобщенной и необобщенной формах. Интерфейсы `IEqualityComparer` также имеют стандартную реализацию в классе по имени `EqualityComparer`.

Кроме того, существуют интерфейсы `IStructuralEquatable` и `IStructuralComparable`, которые позволяют выполнять структурные сравнения для классов и массивов.

Интерфейсы `IEqualityComparer` и `EqualityComparer`

Компаратор эквивалентности позволяет переключаться на нестандартное поведение эквивалентности и хеширования главным образом для классов `Dictionary` и `Hashtable`.

Вспомним требования к словарю, основанному на хеш-таблице. Для любого заданного ключа он должен отвечать на два следующих вопроса.

- Является ли указанный ключ таким же, как другой ключ?
- Какой целочисленный хеш-код имеет указанный ключ?

Компаратор эквивалентности отвечает на такие вопросы путем реализации интерфейсов `IEqualityComparer`:

```
public interface IEqualityComparer<T>
{
    bool Equals (T x, T y);
    int GetHashCode (T obj);
}
```

```
public interface IEqualityComparer // Необобщенная версия
{
    bool Equals (object x, object y);
    int GetHashCode (object obj);
}
```

Для написания специального компаратора необходимо реализовать один или оба интерфейса (реализация обоих интерфейсов обеспечивает максимальную степень взаимодействия). Поскольку это несколько утомительно, в качестве альтернативы можно создать подкласс абстрактного класса EqualityComparer, определение которого показано ниже:

```
public abstract class EqualityComparer<T> : IEqualityComparer,
    IEqualityComparer<T>
{
    public abstract bool Equals (T x, T y);
    public abstract int GetHashCode (T obj);

    bool IEqualityComparer.Equals (object x, object y);
    int IEqualityComparer.GetHashCode (object obj);

    public static EqualityComparer<T> Default { get; }
}
```

Класс EqualityComparer реализует оба интерфейса; ваша работа сводится к тому, чтобы просто переопределить два абстрактных метода.

Семантика методов Equals и GetHashCode подчиняется тем же правилам для методов object.Equals и object.GetHashCode, которые были описаны в главе 6. В следующем примере мы определяем класс Customer с двумя полями и затем записываем компаратор эквивалентности, сопоставляющий имена и фамилии:

```
public class Customer
{
    public string LastName;
    public string FirstName;

    public Customer (string last, string first)
    {
        LastName = last;
        FirstName = first;
    }
}

public class LastFirstEqComparer : EqualityComparer <Customer>
{
    public override bool Equals (Customer x, Customer y)
        => x.LastName == y.LastName && x.FirstName == y.FirstName;

    public override int GetHashCode (Customer obj)
        => (obj.LastName + ";" + obj.FirstName).GetHashCode();
}
```

Чтобы проиллюстрировать его работу, давайте создадим два экземпляра класса Customer:

```
Customer c1 = new Customer ("Bloggs", "Joe");
Customer c2 = new Customer ("Bloggs", "Joe");
```

Так как метод `object.Equals` не был переопределен, применяется нормальная семантика эквивалентности ссылочных типов:

```
Console.WriteLine (c1 == c2);           // False
Console.WriteLine (c1.Equals (c2));      // False
```

Та же самая стандартная семантика эквивалентности применяется, когда эти экземпляры используются в классе `Dictionary` без указания компаратора эквивалентности:

```
var d = new Dictionary<Customer, string>();
d [c1] = "Joe";
Console.WriteLine (d.ContainsKey (c2));    // False
```

А теперь укажем специальный компаратор эквивалентности:

```
var eqComparer = new LastFirstEqComparer();
var d = new Dictionary<Customer, string> (eqComparer);
d [c1] = "Joe";
Console.WriteLine (d.ContainsKey (c2));    // True
```

В приведенном примере необходимо проявлять осторожность, чтобы не изменить значение полей `FirstName` или `LastName` экземпляра `Customer` пока с ним производится работа в словаре, иначе изменится его хеш-код и функционирование словаря будет нарушено.

Свойство `EqualityComparer<T>.Default`

Свойство `EqualityComparer<T>.Default` возвращает универсальный компаратор эквивалентности, который может использоваться в качестве альтернативы вызову статического метода `object.Equals`. Его преимущество заключается в том, что такой компаратор сначала проверяет, реализует ли тип `T` интерфейс `IEquatable<T>`, и если реализует, то вызывает данную реализацию, избегая накладных расходов на упаковку. Это особенно удобно в обобщенных методах:

```
static bool Foo<T> (T x, T y)
{
    bool same = EqualityComparer<T>.Default.Equals (x, y);
    ...
}
```

Свойство `ReferenceEqualityComparer.Instance` (.NET 5+)

Начиная с .NET 5, свойство `ReferenceEqualityComparer.Instance` возвращает компаратор эквивалентности, который всегда применяет ссылочную эквивалентность. В случае типов значений его метод `Equals` всегда возвращает `false`.

Интерфейс `IComparer` и класс `Comparer`

Компараторы используются для переключения на специальную логику упорядочения в отсортированных словарях и коллекциях.

Обратите внимание, что компаратор бесполезен в несортированных словарях, таких как `Dictionary` и `Hashtable` — они требуют реализации `IEqualityComparer` для получения хеш-кодов. Подобным же образом компаратор эквивалентности бесполезен для отсортированных словарей и коллекций.

Ниже приведены определения интерфейса `IComparer`:

```
public interface IComparer
{
    int Compare(object x, object y);
}
public interface IComparer <in T>
{
    int Compare(T x, T y);
}
```

Как и в случае компараторов эквивалентности, имеется абстрактный класс, предназначенный для создания из него подклассов вместо реализации указанных интерфейсов:

```
public abstract class Comparer<T> : IComparer, IComparer<T>
{
    public static Comparer<T> Default { get; }
    public abstract int Compare (T x, T y); // Реализуется вами
    int IComparer.Compare (object x, object y); // Реализован для вас
}
```

В следующем примере показан класс `Wish`, описывающий желание, и компаратор, который сортирует желания по приоритету:

```
class Wish
{
    public string Name;
    public int Priority;

    public Wish (string name, int priority)
    {
        Name = name;
        Priority = priority;
    }
}

class PriorityComparer : Comparer<Wish>
{
    public override int Compare (Wish x, Wish y)
    {
        if (object.Equals (x, y)) return 0; // Оптимизация
        if (x == null) return -1;
        if (y == null) return 1;
        return x.Priority.CompareTo (y.Priority);
    }
}
```

Вызов метода `object.Equals` гарантирует, что путаница с методом `Equals` никогда не возникнет. В данном случае вызов статического метода `object.Equals` лучше вызова `x.Equals`, потому что он будет работать, даже если `x` имеет значение `null`!

Ниже показано, как применять класс PriorityComparer для сортировки содержимого List:

```
var wishList = new List<Wish>();
wishList.Add (new Wish ("Peace", 2));
wishList.Add (new Wish ("Wealth", 3));
wishList.Add (new Wish ("Love", 2));
wishList.Add (new Wish ("3 more wishes", 1));

wishList.Sort (new PriorityComparer());
foreach (Wish w in wishList) Console.Write (w.Name + " | ");
// ВЫВОД: 3 more wishes | Love | Peace | Wealth |
```

В следующем примере класс SurnameComparer позволяет сортировать строки фамилий в порядке, подходящем для телефонной книги:

```
class SurnameComparer : Comparer <string>
{
    string Normalize (string s)
    {
        s = s.Trim().ToUpper();
        if (s.StartsWith ("MC")) s = "MAC" + s.Substring (2);
        return s;
    }

    public override int Compare (string x, string y)
        => Normalize (x).CompareTo (Normalize (y));
}
```

А вот как использовать класс SurnameComparer в отсортированном словаре:

```
var dic = new SortedDictionary<string, string> (new SurnameComparer ());
dic.Add ("MacPhail", "second!");
dic.Add ("MacWilliam", "third!");
dic.Add ("McDonald", "first!");

foreach (string s in dic.Values)
    Console.Write (s + " ");           // first! second! third!
```

Класс StringComparer

StringComparer — предопределенный подключаемый класс для поддержки эквивалентности и сравнения строк, который позволяет указывать язык и чувствительность к регистру символов. Он реализует интерфейсы IEqualityComparer и IComparer (плюс их обобщенные версии), так что может применяться с любым типом словаря или отсортированной коллекции.

Из-за того, что класс StringComparer является абстрактным, экземпляры получаются через его статические методы и свойства. Свойство StringComparer.Ordinal отражает стандартное поведение для строкового сравнения эквивалентности, а свойство StringComparer.CurrentCulture — стандартное поведение для сравнения порядка. Ниже перечислены все его статические члены:

```
public static StringComparer CurrentCulture { get; }
public static StringComparer CurrentCultureIgnoreCase { get; }
public static StringComparer InvariantCulture { get; }
public static StringComparer InvariantCultureIgnoreCase { get; }
public static StringComparer Ordinal { get; }
public static StringComparer OrdinalIgnoreCase { get; }
public static StringComparer Create (CultureInfo culture,
                                     bool ignoreCase);
```

В следующем примере создается ординальный нечувствительный к регистру словарь, в рамках которого `dict["Joe"]` и `dict["JOE"]` означают то же самое:

```
var dict = new Dictionary<string, int> (StringComparer.OrdinalIgnoreCase);
```

Вот как отсортировать массив имен с использованием австралийского английского:

```
string[] names = { "Tom", "HARRY", "sheila" };
CultureInfo ci = new CultureInfo ("en-AU");
Array.Sort<string> (names, StringComparer.Create (ci, false));
```

В финальном примере представлена учитывающая культуру версия класса `SurnameComparer`, написанного в предыдущем разделе (со сравнением имен, подходящим для телефонной книги):

```
class SurnameComparer : Comparer<string>
{
    StringComparer strCmp;
    public SurnameComparer (CultureInfo ci)
    {
        // Создать строковый компаратор, чувствительный к регистру и культуре
        strCmp = StringComparer.Create (ci, false);
    }
    string Normalize (string s)
    {
        s = s.Trim();
        if (s.ToUpper().StartsWith ("MC")) s = "MAC" + s.Substring (2);
        return s;
    }
    public override int Compare (string x, string y)
    {
        // Напрямую вызвать Compare на учитывающем культуру StringComparer
        return strCmp.Compare (Normalize (x), Normalize (y));
    }
}
```

Интерфейсы `IStructuralEquatable` и `IStructuralComparable`

Как обсуждалось в главе 6, по умолчанию структуры реализуют *структурное сравнение*: две структуры эквивалентны, если эквивалентны все их поля. Однако иногда структурная эквивалентность и сравнение порядка удобны в виде подключаемых вариантов также для других типов, таких как массивы и кортежи. В этом помогут следующие интерфейсы:

```

public interface IStructuralEquatable
{
    bool Equals (object other, IEqualityComparer comparer);
    int GetHashCode (IEqualityComparer comparer);
}

public interface IStructuralComparable
{
    int CompareTo (object other, IComparer comparer);
}

```

Передаваемая реализация `IEqualityComparer/IComparer` применяется к каждому индивидуальному элементу в составном объекте. Мы можем продемонстрировать это с использованием массивов и кортежей, которые реализуют указанные интерфейсы. В следующем примере мы сравниваем два массива на предмет эквивалентности сначала с применением стандартного метода `Equals`, а затем его версии из интерфейса `IStructuralEquatable`:

```

int[] a1 = { 1, 2, 3 };
int[] a2 = { 1, 2, 3 };
IStructuralEquatable sel1 = a1;
Console.WriteLine (a1.Equals (a2));                                // False
Console.WriteLine (sel1.Equals (a2, EqualityComparer<int>.Default)); // True

```

Вот еще один пример:

```

string[] a1 = "the quick brown fox".Split();
string[] a2 = "THE QUICK BROWN FOX".Split();
IStructuralEquatable sel1 = a1;
bool isTrue = sel1.Equals (a2, StringComparer.InvariantCultureIgnoreCase);

```




Запросы LINQ

Язык интегрированных запросов (Language Integrated Query — LINQ) представляет собой набор языковых средств и возможностей исполняющей среды, предназначенный для написания структурированных и безопасных в отношении типов запросов к локальным коллекциям объектов и удаленным источникам данных.

Язык LINQ позволяет создавать запросы к любой коллекции, которая реализует интерфейс `IEnumerable<T>`, будь то массив, список или DOM-модель XML, а также к удаленным источникам данных, таким как таблицы в базе данных SQL Server. Язык LINQ обладает преимуществами проверки типов на этапе компиляции и формирования динамических запросов.

В настоящей главе объясняется архитектура LINQ и фундаментальные основы написания запросов. Все основные типы определены в пространствах имен `System.Linq` и `System.Linq.Expressions`.



Примеры, рассматриваемые в текущей и двух последующих главах, доступны вместе с интерактивным инструментом запросов под названием LINQPad. Загрузить LINQPad можно на веб-сайте <http://www.linqpad.net>.

Начало работы

Базовыми единицами данных в LINQ являются *последовательности* и *элементы*. Последовательность — это любой объект, который реализует интерфейс `IEnumerable<T>`, а элемент — это каждая единица данных внутри последовательности. В следующем примере `names` является последовательностью, а `"Tom"`, `"Dick"` и `"Harry"` — элементами:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry" };
```

Мы называем ее *локальной последовательностью*, потому что она представляет локальную коллекцию объектов в памяти.

Операция запроса — это метод, который трансформирует последовательность. Типичная операция запроса принимает *входную последовательность* и выдает трансформированную *выходную последовательность*. В классе `Enumerable` из пространства имен `System.Linq` имеется около 40 операций запросов — все они реализованы в виде статических методов. Их называют *стандартными операциями запросов*.



Запросы, оперирующие на локальных последовательностях, называются *локальными запросами* или *запросами LINQ to Objects*.

Язык LINQ также поддерживает последовательности, которые могут динамически наполняться из удаленного источника данных, такого как база данных SQL Server. Последовательности подобного рода дополнительно реализуют интерфейс `IQueryable<T>` и поддерживаются через соответствующий набор стандартных операций запросов в классе `Queryable`. Мы обсудим данную тему более подробно в разделе “Интерпретируемые запросы” далее в главе.

Запрос представляет собой выражение, которое при перечислении трансформирует последовательности с помощью операций запросов. Простейший запрос состоит из одной входной последовательности и одной операции. Например, мы можем применить операцию `Where` к простому массиву для извлечения элементов с длиной, по меньшей мере, четырех символов:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry" };
IEnumerable<string> filteredNames = System.Linq.Enumerable.Where
    (names, n => n.Length >= 4);
foreach (string n in filteredNames)
    Console.WriteLine (n);
```

Вот как выглядит вывод:

```
Dick
Harry
```

Поскольку стандартные операции запросов реализованы в виде расширяющих методов, мы можем вызывать `Where` прямо на `names` — как если бы он был методом экземпляра:

```
IEnumerable<string> filteredNames = names.Where (n => n.Length >= 4);
```

Чтобы такой код скомпилировался, потребуется импортировать пространство имен `System.Linq`. Ниже приведен завершенный пример:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry" };
IEnumerable<string> filteredNames = names.Where (n => n.Length >= 4);
foreach (string name in filteredNames) Console.WriteLine (name);
```

Вывод будет таким:

```
Dick
Harry
```



Мы могли бы дополнительно сократить код, неявно типизируя `filteredNames`:

```
var filteredNames = names.Where (n => n.Length >= 4);
```

Однако в результате затрудняется зрительное восприятие запроса, особенно за пределами IDE-среды, где нет никаких всплывающих подсказок, которые помогли бы понять запрос. По этой причине в настоящей главе мы будем в меньшей степени использовать неявную типизацию, чем может оказаться у вас в собственном проекте.

Большинство операций запросов принимают в качестве аргумента лямбда-выражение. Лямбда-выражение помогает направлять и формировать запрос. В приведенном выше примере лямбда-выражение выглядит следующим образом:

```
n => n.Length >= 4
```

Входной аргумент соответствует входному элементу. В рассматриваемой ситуации входной аргумент `n` представляет каждое имя в массиве и относится к типу `string`. Операция `Where` требует, чтобы лямбда-выражение возвращало значение типа `bool`, которое в случае равенства `true` указывает на то, что элемент должен быть включен в выходную последовательность. Ниже приведена его сигнатура:

```
public static IEnumerable<TSource> Where<TSource>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, bool> predicate)
```

Следующий запрос извлекает все имена, которые содержат букву “`a`”:

```
IEnumerable<string> filteredNames = names.Where (n => n.Contains ("a"));
foreach (string name in filteredNames)
    Console.WriteLine (name);           // Harry
```

До сих пор мы строили запросы с применением расширяющих методов и лямбда-выражений. Как вскоре вы увидите, такая стратегия хорошо компонуема в том смысле, что позволяет формировать цепочки операций запросов. В книге мы будем называть это *текучим синтаксисом*¹. Для написания запросов язык C# также предлагает другой синтаксис, который называется *синтаксисом выражений запросов*. Вот как записать предыдущий запрос в виде выражения запроса:

```
IEnumerable<string> filteredNames = from n in names
                                         where n.Contains ("a")
                                         select n;
```

Текущий синтаксис и синтаксис выражений запросов дополняют друг друга. В следующих двух разделах мы исследуем каждый из них более детально.

¹ Термин “текущий” (fluent) основан на работе Эрика Эванса и Мартина Фаулера, посвященной текучим интерфейсам.

Текущий синтаксис

Текущий синтаксис является наиболее гибким и фундаментальным. В этом разделе мы покажем, как выстраивать цепочки операций для формирования более сложных запросов, а также объясним важность расширяющих методов в данном процессе. Мы также расскажем, как формулировать лямбда-выражения для операции запроса, и представим несколько новых операций запросов.

Выстраивание в цепочки операций запросов

В предыдущем разделе были показаны два простых запроса, включающие одну операцию. Для построения более сложных запросов к выражению добавляются дополнительные операции запросов, формируя в итоге цепочку. В качестве примера следующий запрос извлекает все строки, содержащие букву "а", сортирует их по длине и затем преобразует результаты в верхний регистр:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;

string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };

IQueryable<string> query = names
    .Where (n => n.Contains ("a"))
    .OrderBy (n => n.Length)
    .Select (n => n.ToUpper ());

foreach (string name in query) Console.WriteLine (name);
```

Вывод:

```
JAY
MARY
HARRY
```



Переменная `n` в приведенном примере имеет закрытую область видимости в каждом лямбда-выражении. Идентификатор `n` можно многократно использовать по той же причине, по которой подобное возможно для идентификатора `c` в следующем методе:

```
void Test()
{
    foreach (char c in "string1") Console.Write (c);
    foreach (char c in "string2") Console.Write (c);
    foreach (char c in "string3") Console.Write (c);
}
```

`Where`, `OrderBy` и `Select` — стандартные операции запросов, которые распознаются как вызовы расширяющих методов класса `Enumerable` (если импортировано пространство имен `System.Linq`).

Мы уже представляли операцию `Where`, которая выдает отфильтрованную версию входной последовательности. Операция `OrderBy` выдает отсортированную версию своей входной последовательности, а метод `Select` — последова-

тельность, в которой каждый входной элемент трансформирован, или *спроектирован*, с помощью заданного лямбда-выражения (`n.ToUpper` в этом случае). Данные протекают слева направо через цепочку операций, так что они сначала фильтруются, затем сортируются и, наконец, проецируются.



Операция запроса никогда не изменяет входную последовательность; замен она возвращает новую последовательность. Подход согласуется с парадигмой *функционального программирования*, которая была побудительной причиной создания языка LINQ.

Ниже приведены сигнатуры задействованных ранее расширяющих методов (с несколько упрощенной сигнатурой `OrderBy`):

```
public static IEnumerable<TSource> Where<TSource>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, bool> predicate)
public static IEnumerable<TSource> OrderBy<TSource, TKey>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, TKey> keySelector)
public static IEnumerable<TResult> Select<TSource, TResult>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, TResult> selector)
```

Когда операции запросов выстраиваются в цепочку, как в рассмотренном примере, выходная последовательность одной операции является входной последовательностью следующей операции. Полный запрос напоминает производственную линию с конвейерными лентами (рис. 8.1).

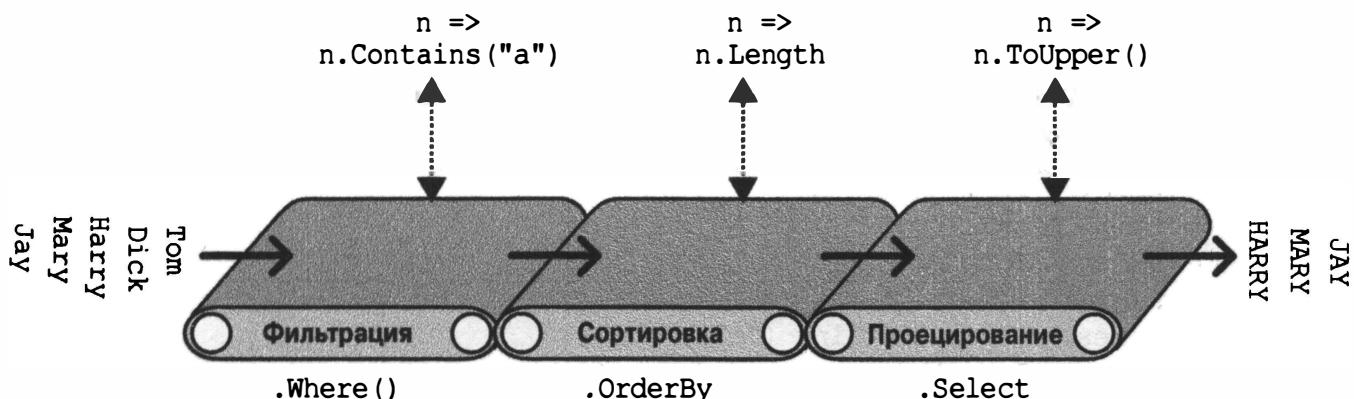


Рис. 8.1. Цепочка операций запросов

Точно такой же запрос можно строить *постепенно*, как показано ниже:

```
// Чтобы этот код скомпилировался, необходимо импортировать
// пространство имен System.Linq:
IQueryable<string> filtered = names .Where (n => n.Contains ("a"));
IQueryable<string> sorted = filtered.OrderBy (n => n.Length);
IQueryable<string> finalQuery = sorted .Select (n => n.ToUpper());
```

Запрос `finalQuery` композиционно идентичен ранее сконструированному запросу `query`. Кроме того, каждый промежуточный шаг также состоит из допустимого запроса, который можно выполнить:

```

foreach (string name in filtered)
    Console.Write (name + "|");           // Harry|Mary|Jay|
Console.WriteLine();
foreach (string name in sorted)
    Console.Write (name + "|");           // Jay|Mary|Harry|
Console.WriteLine();
foreach (string name in finalQuery)
    Console.Write (name + "|");           // JAY|MARY|HARRY|

```

Почему расширяющие методы важны

Вместо применения синтаксиса расширяющих методов для вызова операций запросов можно использовать привычный синтаксис статических методов:

```

IEnumerable<string>filtered = Enumerable.Where (names, n => n.Contains ("a"));
IEnumerable<string> sorted = Enumerable.OrderBy (filtered, n => n.Length);
IEnumerable<string>finalQuery = Enumerable.Select (sorted, n => n.ToUpper());

```

Именно так компилятор фактически транслирует вызовы расширяющих методов. Однако избегание расширяющих методов не обходится даром, когда желательно записать запрос в одном операторе, как делалось ранее. Давайте вернемся к запросу в виде одного оператора — сначала с синтаксисом расширяющих методов:

```

IEnumerable<string> query = names.Where (n => n.Contains ("a"))
                                    .OrderBy (n => n.Length)
                                    .Select (n => n.ToUpper());

```

Его естественная линейная форма отражает протекание данных слева направо и также удерживает лямбда-выражения рядом с их операциями запросов (инфиксная система обозначений). Без расширяющих методов запрос утрачивает свою текучесть:

```

IEnumerable<string> query =
    Enumerable.Select (
        Enumerable.OrderBy (
            Enumerable.Where (
                names, n => n.Contains ("a")
            ), n => n.Length
        ), n => n.ToUpper()
    );

```

Составление лямбда-выражений

В предыдущем примере мы передаем операции `Where` следующее лямбда-выражение:

```
n => n.Contains ("a") // Входной тип - string, возвращаемый тип - bool
```



Лямбда-выражение, которое принимает значение и возвращает результат типа `bool`, называется *предикатом*.

Предназначение лямбда-выражения зависит от конкретной операции запроса. В операции `Where` оно указывает, должен ли элемент помещаться в вы-

ходную последовательность. В случае операции `OrderBy` лямбда-выражение отображает каждый элемент во входной последовательности на его ключ сортировки. В операции `Select` лямбда-выражение определяет, каким образом каждый элемент во входной последовательности трансформируется перед попаданием в выходную последовательность.



Лямбда-выражение в операции запроса всегда работает с индивидуальными элементами во входной последовательности, но не с последовательностью как единым целым.

Операция запроса вычисляет лямбда-выражение по требованию — обычно один раз на элемент во входной последовательности. Лямбда-выражения позволяют помещать внутрь операций запросов собственную логику. Это делает операции запросов универсальными и одновременно простыми по своей сути. Ниже приведена полная реализация `Enumerable.Where` кроме обработки исключений:

```
public static IEnumerable<TSource> Where<TSource>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, bool> predicate)
{
    foreach (TSource element in source)
        if (predicate (element))
            yield return element;
}
```

Лямбда-выражения и сигнатуры `Func`

Стандартные операции запросов задействуют обобщенные делегаты `Func`. Семейство универсальных обобщенных делегатов под названием `Func` определено в пространстве имен `System` со следующим замыслом.

Аргументы типа в `Func` появляются в том же самом порядке, что и в лямбда-выражениях.

Таким образом, `Func<TSource, bool>` соответствует лямбда-выражению `TSource=>bool`, которое принимает аргумент `TSource` и возвращает значение `bool`.

Аналогично `Func<TSource, TResult>` соответствует лямбда-выражению `TSource=>TResult`.

Делегаты `Func` перечислены в разделе “Делегаты `Func` и `Action`” главы 4.

Лямбда-выражения и типизация элементов

Стандартные операции запросов применяют описанные ниже имена обобщенных типов.

Имя обобщенного типа	Что означает
<code>TSource</code>	Тип элемента для входной последовательности
<code>TResult</code>	Тип элемента для выходной последовательности (если он отличается от <code>TSource</code>)
<code>TKey</code>	Тип элемента для ключа, используемого при сортировке, группировании или соединении

Тип `TSource` определяется входной последовательностью. Типы `TResult` и `TKey` обычно выводятся из лямбда-выражения.

Например, взгляните на сигнатуру операции запроса `Select`:

```
public static IEnumerable<TResult> Select<TSource, TResult>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, TResult> selector)
```

Делегат `Func<TSource, TResult>` соответствует лямбда-выражению `TSource=>TResult`, которое отображает входной элемент на выходной элемент. Типы `TSource` и `TResult` могут быть разными, так что лямбда-выражение способно изменять тип каждого элемента. Более того, лямбда-выражение определяет тип выходной последовательности. В следующем запросе с помощью операции `Select` выполняется трансформация элементов строкового типа в элементы целочисленного типа:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };
IEnumerable<int> query = names.Select (n => n.Length);
foreach (int length in query)
    Console.Write (length + "|");                                // 3|4|5|4|3|
```

Компилятор может выводить тип `TResult` из возвращаемого значения лямбда-выражения. В данном случае `n.Length` возвращает значение `int`, поэтому для `TResult` выводится тип `int`. Операция запроса `Where` проще и не требует выведения типа для выходной последовательности, т.к. входной и выходной элементы относятся к тому же самому типу. Это имеет смысл, потому что данная операция просто фильтрует элементы; она не трансформирует их:

```
public static IEnumerable<TSource> Where<TSource>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, bool> predicate)
```

Наконец, рассмотрим сигнатуру операции `OrderBy`:

```
// Сигнатура несколько упрощена:
public static IEnumerable<TSource> OrderBy<TSource, TKey>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, TKey> keySelector)
```

Делегат `Func<TSource, TKey>` отображает входной элемент на ключ сортировки. Тип `TKey` выводится из лямбда-выражения и является отдельным от типов входного и выходного элементов. Например, можно реализовать сортировку списка имен по длине (ключ `int`) или в алфавитном порядке (ключ `string`):

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };
IEnumerable<string> sortedByLength, sortedAlphabetically;
sortedByLength      = names.OrderBy (n => n.Length);        // ключ int
sortedAlphabetically = names.OrderBy (n => n);                // ключ string
```



Операции запросов в классе `Enumerable` можно вызывать с помощью традиционных делегатов, ссылающихся на методы, а не на лямбда-выражения. Такой подход эффективен в плане упрощения некоторых видов локальных запросов — особенно LINQ to XML — и демонстрируется в главе 10. Однако он не работает с последовательностями, основанными на интерфейсе `IQueryable<T>` (например, при запрашивании базы данных), т.к. операции в классе `Queryable` требуют лямбда-выражений для выпуска деревьев выражений. Мы обсудим это позже в разделе “Интерпретируемые запросы”.

Естественный порядок

В языке LINQ исходный порядок элементов внутри входной последовательности важен. На такое поведение полагаются некоторые операции запросов, в частности, Take, Skip и Reverse.

Операция Take выдает первые x элементов, отбрасывая остальные:

```
int[] numbers = { 10, 9, 8, 7, 6 };
IEnumerable<int> firstThree = numbers.Take(3); // { 10, 9, 8 }
```

Операция Skip игнорирует первые x элементов и выдает остальные:

```
IEnumerable<int> lastTwo = numbers.Skip(3); // { 7, 6 }
```

Операция Reverse изменяет порядок следования элементов на противоположный:

```
IEnumerable<int> reversed = numbers.Reverse(); // { 6, 7, 8, 9, 10 }
```

В локальных запросах (LINQ to Objects) операции наподобие Where и Select предохраняют исходный порядок во входной последовательности (как поступают все остальные операции запросов за исключением тех, которые специально изменяют порядок).

Другие операции

Не все операции запросов возвращают последовательность. Операции над элементами извлекают один элемент из входной последовательности; примерами таких операций служат First, Last, Single и ElementAt:

```
int[] numbers = { 10, 9, 8, 7, 6 };
int firstNumber = numbers.First(); // 10
int lastNumber = numbers.Last(); // 6
int secondNumber = numbers.ElementAt(1); // 9
int secondLowest = numbers.OrderBy(n=>n).Skip(1).First(); // 7
```

Операции агрегирования возвращают скалярное значение, обычно числового типа:

```
int count = numbers.Count(); // 5;
int min = numbers.Min(); // 6;
```

Квантификаторы возвращают значение bool:

```
bool hasTheNumberNine = numbers.Contains(9); // true
bool hasMoreThanZeroElements = numbers.Any(); // true
bool hasAnOddElement = numbers.Any(n => n % 2 != 0); // true
```

Поскольку эти операции возвращают одиночный элемент, вызов дополнительных операций запросов на их результате обычно не производится, если только сам элемент не является коллекцией.

Некоторые операции запросов принимают две входных последовательности. Примерами могут служить операция Concat, которая добавляет одну последовательность к другой, и операция Union, делающая то же самое, но с удалением дубликатов:

```
int[] seq1 = { 1, 2, 3 };
int[] seq2 = { 3, 4, 5 };
IEnumarable<int> concat = seq1.Concat (seq2);      // { 1, 2, 3, 3, 4, 5 }
IEnumarable<int> union  = seq1.Union (seq2);      // { 1, 2, 3, 4, 5 }
```

К данной категории относятся также и операции соединения. Все операции запросов подробно рассматриваются в главе 9.

Выражения запросов

Язык C# предоставляет синтаксическое сокращение для написания запросов LINQ, которое называется *выражениями запросов*. Вопреки распространенному мнению выражение запроса не является средством встраивания в C# возможностей языка SQL. В действительности на проектное решение для выражений запросов повлияли главным образом *выражения спискового включения* (они же *генераторы списков*; list comprehension) из таких языков функционального программирования, как LISP и Haskell, хотя косметическое влияние оказал и язык SQL.



В настоящей книге мы ссылаемся на синтаксис выражений запросов просто как на *синтаксис запросов*.

В предыдущем разделе с использованием текущего синтаксиса мы написали запрос для извлечения строк, содержащих букву "а", их сортировки и преобразования в верхний регистр. Ниже показано, как сделать то же самое с помощью синтаксиса запросов:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;

string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };

IEnumarable<string> query =
    from n in names
    where n.Contains ("a") // Фильтровать элементы
    orderby n.Length        // Сортировать элементы
    select n.ToUpper(); // Транслировать (проецировать) каждый элемент

foreach (string name in query) Console.WriteLine (name);
```

Вывод:

```
JAY
MARY
HARRY
```

Выражения запросов всегда начинаются с конструкции `from` и заканчиваются либо конструкцией `select`, либо конструкцией `group`. Конструкция `from` объявляет *переменную диапазона* (в данном случае `n`), которую можно воспринимать как переменную, предназначенную для обхода входной последовательности — почти как в цикле `foreach`. На рис. 8.2 представлен полный синтаксис в виде синтаксической (или т.н. железнодорожной) диаграммы.



Для чтения этой диаграммы начинайте слева и продолжайте двигаться по пути подобно поезду. Например, после обязательной конструкции `from` можно дополнительно включить конструкцию `orderby`, `where`, `let` или `join`. Затем можно либо продолжить конструкцией `select` или `group`, либо вернуться и включить еще одну конструкцию `from`, `orderby`, `where`, `let` или `join`.

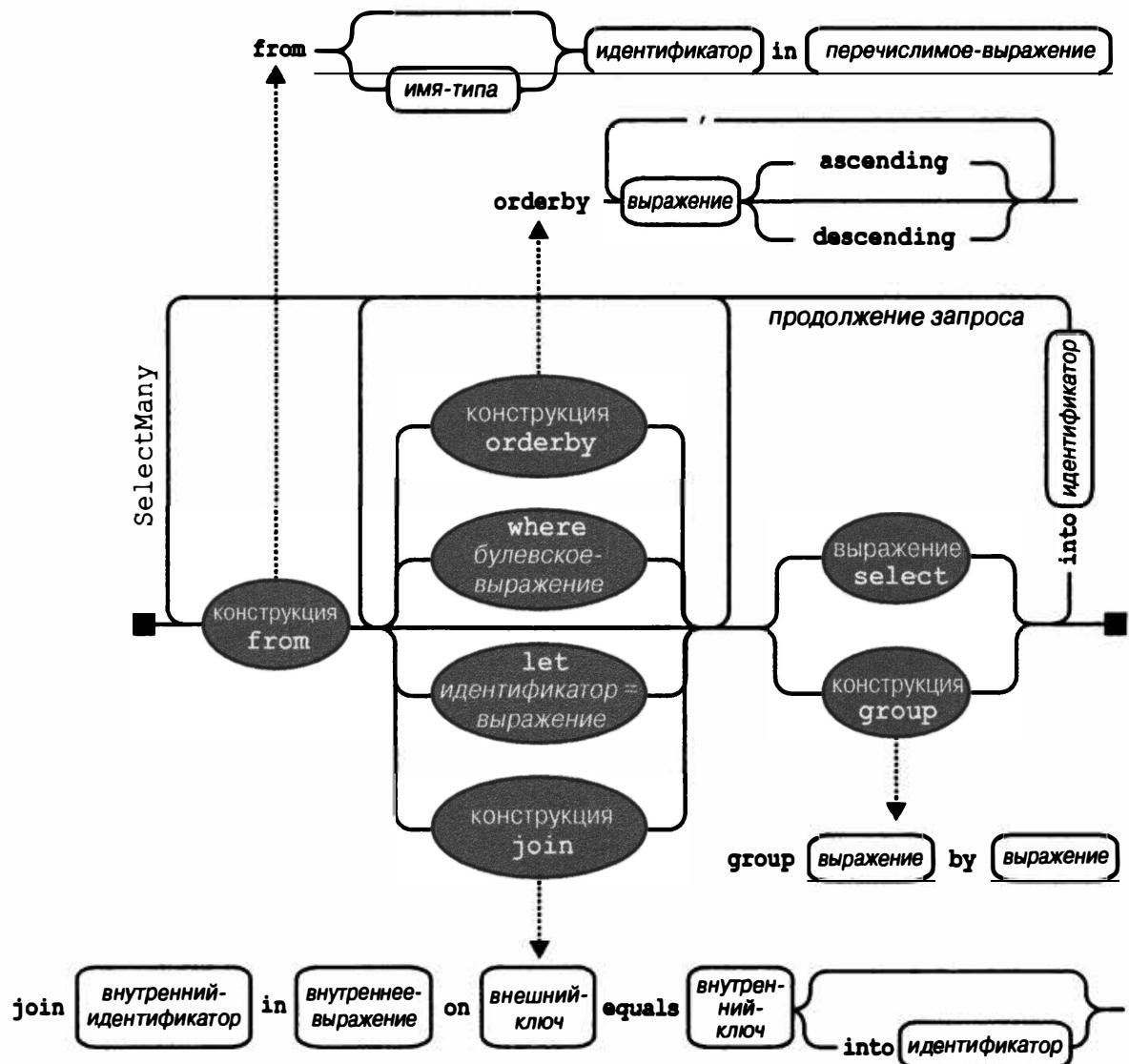


Рис. 8.2. Синтаксис запросов

Компилятор обрабатывает выражения запросов, транслируя их в текущий синтаксис. Трансляция делается в довольно-таки механической манере — очень похоже на то, как операторы `foreach` транслируются в вызовы методов `GetEnumerator` и `MoveNext`. Это значит, что любое выражение запроса, написанное с применением синтаксиса запросов, можно также представить посредством текущего синтаксиса. Компилятор (первоначально) транслирует показанный выше пример запроса в следующий код:

```
IEnumerable<string> query = names.Where (n => n.Contains ("a"))
    .OrderBy (n => n.Length)
    .Select (n => n.ToUpper());
```

Затем операции `Where`, `OrderBy` и `Select` преобразуются с использованием тех же правил, которые применялись бы к запросу, написанному с помощью текущего синтаксиса. В данном случае операции привязываются к расширяющим методам в классе `Enumerable`, т.к. пространство имен `System.Linq` импортировано и тип `names` реализует интерфейс `IEnumerable<string>`. Однако при трансляции выражений запросов компилятор не оказывает специальное действие классу `Enumerable`. Можете считать, что компилятор механически вводит слова “`Where`”, “`OrderBy`” и “`Select`” внутрь оператора, после чего компилирует его, как если бы вы набирали такие имена методов самостоятельно. Это обеспечивает гибкость в том, как они распознаются. Например, операции в запросах к базе данных, которые мы будем строить в последующих разделах, взамен привязываются к расширяющим методам из класса `Queryable`.



Если удалить из программы директиву `using System.Linq`, тогда запросы не скомпилируются, поскольку методы `Where`, `OrderBy` и `Select` не к чему привязывать. Выражения запросов *не могут быть скомпилированы* до тех пор, пока не будет импортировано `System.Linq` или другое пространство имен с реализацией этих методов запросов.

Переменные диапазона

Идентификатор, непосредственно следующий за словом `from` в синтаксисе, называется *переменной диапазона*. Переменная диапазона ссылается на текущий элемент в последовательности, в отношении которой должна выполняться операция.

В наших примерах переменная диапазона `n` присутствует в каждой конструкции запроса. Однако в каждой конструкции эта переменная на самом деле выполняет *перечисление отличающейся последовательности*:

```
from n in names           // n - переменная диапазона
where n.Contains ("a")    // n берется прямо из массива
orderby n.Length          // n впоследствии фильтруется
select n.ToUpper()        // n впоследствии сортируется
```

Все станет ясным, если взглянуть на механическую трансляцию в текущий синтаксис, предпринимаемую компилятором:

```
names.Where (n => n.Contains ("a")) // n с локальной областью видимости
      .OrderBy (n => n.Length)       // n с локальной областью видимости
      .Select  (n => n.ToUpper())     // n с локальной областью видимости
```

Как видите, каждый экземпляр переменной `n` имеет закрытую область видимости, которая ограничена собственным лямбда-выражением.

Выражения запросов также позволяют вводить новые переменные диапазонов с помощью следующих конструкций:

- `let`
- `into`
- дополнительная конструкция `from`
- `join`

Мы рассмотрим данную тему позже в разделе “Стратегии композиции” настоящей главы и также в разделах “Выполнение проектирования” и “Выполнение соединения” главы 9.

Сравнение синтаксиса запросов и синтаксиса SQL

Выражения запросов внешне похожи на код SQL, хотя они существенно отличаются. Запрос LINQ сводится к выражению C#, а потому следует стандартным правилам языка C#. Например, в LINQ нельзя использовать переменную до ее объявления. Язык SQL разрешает ссылаться в операторе SELECT на псевдоним таблицы до его определения в конструкции FROM.

Подзапрос в LINQ является просто еще одним выражением C#, так что никакого специального синтаксиса он не требует. Подзапросы в SQL подчиняются специальным правилам.

В LINQ данные логически протекают слева направо через запрос. Что касается потока данных в SQL, то порядок структурирован не настолько хорошо.

Запрос LINQ состоит из *конвейера* операций, принимающих и выпускающих последовательности, в которых порядок следования элементов может иметь значение. Запрос SQL образован из *сети* конструкций, которые работают по большей части с *неупорядоченными наборами*.

Сравнение синтаксиса запросов и текущего синтаксиса

И синтаксис выражений запросов, и текущий синтаксис обладают своими преимуществами.

Синтаксис запросов проще для запросов, которые содержат в себе любой из перечисленных ниже аспектов:

- конструкцию `let` для введения новой переменной наряду с переменной диапазона;
- операцию `SelectMany`, `Join` или `GroupJoin`, за которой следует ссылка на внешнюю переменную диапазона.

(Мы опишем конструкцию `let` в разделе “Стратегии композиции” далее в главе, а операции `SelectMany`, `Join` и `GroupJoin` — в главе 9.)

Посредине находятся запросы, которые просто применяют операции `Where`, `OrderBy` и `Select`. С ними одинаково хорошо работает любой синтаксис; выбор здесь определяется в основном личными предпочтениями.

Для запросов, состоящих из одной операции, текущий синтаксис короче и характеризуется меньшим беспорядком.

Наконец, есть много операций, для которых ключевые слова в синтаксисе запросов не предусмотрены. Такие операции требуют использования текущего синтаксиса — по крайней мере, частично. К ним относится любая операция, выходящая за рамки перечисленных ниже:

`Where`, `Select`, `SelectMany`,
`OrderBy`, `ThenBy`, `OrderByDescending`, `ThenByDescending`,
`GroupBy`, `Join`, `GroupJoin`

Запросы со смешанным синтаксисом

Если операция запроса не поддерживается в синтаксисе запросов, тогда синтаксис запросов и текущий синтаксис можно смешивать. Единственное ограничение заключается в том, что каждый компонент синтаксиса запросов должен быть завершен (т.е. начинаться с конструкции `from` и заканчиваться конструкцией `select` или `group`).

Предположим, что есть такое объявление массива:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };
```

В следующем примере подсчитывается количество имен, содержащих букву “`a`”:

```
int matches = (from n in names where n.Contains ("a") select n).Count(); //3
```

Показанный ниже запрос получает имя, которое находится первым в алфавитном порядке:

```
string first = (from n in names orderby n select n).First(); // Dick
```

Подход со смешанным синтаксисом иногда полезен в более сложных запросах. Однако в представленных выше простых примерах мы могли бы безо всяких проблем придерживаться текущего синтаксиса:

```
int matches = names.Where (n => n.Contains ("a")).Count(); // 3
string first = names.OrderBy (n => n).First(); // Dick
```



Временами запросы со смешанным синтаксисом обеспечивают почти максимальную выгоду в плане функциональности и простоты. Важно не отдавать одностороннее предпочтение синтаксису запросов или текущему синтаксису, иначе вы не сможете записывать запросы со смешанным синтаксисом, когда они являются наилучшим вариантом.

В оставшейся части главы мы будем демонстрировать ключевые концепции с применением обоих видов синтаксиса, когда это уместно.

Отложенное выполнение

Важная особенность большинства операций запросов связана с тем, что они выполняются не тогда, когда создаются, а когда происходит *перечисление* (другими словами, при вызове метода `MoveNext` на перечислителе). Рассмотрим следующий запрос:

```
var numbers = new List<int>();
numbers.Add (1);

IEnumerable<int> query = numbers.Select (n => n * 10); // Построить запрос
numbers.Add (2); // Вставить дополнительный элемент
foreach (int n in query)
    Console.Write (n + "|"); // 10|20|
```

Дополнительное число, вставленное в список *после* конструирования запроса, включается в результат, поскольку любая фильтрация или сортировка не делается вплоть до выполнения оператора `foreach`. Это называется *отложенным* или *ленивым* выполнением и представляет собой то же самое действие, которое происходит с делегатами:

```
Action a = () => Console.WriteLine ("Foo");  
// Пока на консоль ничего не выводится. А теперь запустим запрос:  
a(); // Отложенное выполнение!
```

Отложенное выполнение поддерживают все стандартные операции запросов со следующими исключениями:

- операции, которые возвращают одиничный элемент или скалярное значение, такие как `First` или `Count`;
- перечисленные ниже *операции преобразования*:

`ToArray`, `ToList`, `ToDictionary`, `ToLookup`, `ToHashSet`

Указанные операции вызывают немедленное выполнение запроса, т.к. их результирующие типы не имеют механизма для обеспечения отложенного выполнения. Скажем, метод `Count` возвращает простое целочисленное значение, для которого последующее перечисление невозможно. Показанный ниже запрос выполняется немедленно:

```
int matches = numbers.Where (n => n <= 2).Count(); // 1
```

Отложенное выполнение важно из-за того, что оно отвязывает *конструирование* запроса от его *выполнения*. Это позволяет строить запрос в течение нескольких шагов и также делает возможными запросы к базе данных.



Подзапросы предоставляют еще один уровень косвенности. Все, что находится в подзапросе, подпадает под отложенное выполнение — включая методы агрегирования и преобразования. Мы рассмотрим их в разделе “Подзапросы” далее в главе.

Повторное вычисление

С отложенным выполнением связано еще одно последствие — запрос с отложенным выполнением при повторном перечислении вычисляется заново:

```
var numbers = new List<int>() { 1, 2 };  
IEnumerable<int> query = numbers.Select (n => n * 10);  
foreach (int n in query) Console.Write (n + "|"); // 10|20|  
numbers.Clear();  
foreach (int n in query) Console.Write (n + "|"); // Ничего не выводится
```

Есть пара причин, по которым повторное вычисление иногда неблагоприятно:

- временами требуется “заморозить” или кэшировать результаты в определенный момент времени;
- некоторые запросы сопровождаются большим объемом вычислений (или полагаются на обращение к удаленной базе данных), поэтому повторять их без настоятельной необходимости нежелательно.

Повторного вычисления можно избежать за счет вызова операции преобразования, такой как `ToArray` или `ToList`. Операция `ToArray` копирует выходные данные запроса в массив, а `ToList` — в обобщенный список `List<T>`:

```
var numbers = new List<int>() { 1, 2 };
List<int> timesTen = numbers
    .Select (n => n * 10)
    .ToList(); // Выполняется немедленное преобразование в List<int>
numbers.Clear();
Console.WriteLine (timesTen.Count); // По-прежнему 2
```

Захваченные переменные

Если лямбда-выражения запроса *захватывают* внешние переменные, то запрос будет принимать на обработку значения таких переменных в момент, когда он запускается:

```
int[] numbers = { 1, 2 };
int factor = 10;
IQueryable<int> query = numbers.Select (n => n * factor);
factor = 20;
foreach (int n in query) Console.Write (n + "|"); // 20|40|
```

В итоге может возникнуть проблема при построении запроса внутри цикла `for`. Например, предположим, что необходимо удалить все гласные из строки. Следующий код, несмотря на свою неэффективность, дает корректный результат:

```
IEnumerable<char> query = "Not what you might expect";
query = query.Where (c => c != 'a');
query = query.Where (c => c != 'e');
query = query.Where (c => c != 'i');
query = query.Where (c => c != 'o');
query = query.Where (c => c != 'u');
foreach (char c in query) Console.Write (c); // Nt wht y mght xpct
```

А теперь посмотрим, что произойдет, если мы переделаем код с использованием цикла `for`:

```
IEnumerable<char> query = "Not what you might expect";
string vowels = "aeiou";
for (int i = 0; i < vowels.Length; i++)
    query = query.Where (c => c != vowels[i]);
foreach (char c in query) Console.Write (c);
```

При перечислении запроса генерируется исключение `IndexOutOfRangeException`, потому что, как было указано в разделе “*Захватывание внешних переменных*” главы 4, компилятор назначает переменной итерации в цикле `for` такую же область видимости, как если бы она была объявлена *вне* цикла. Следовательно, каждое замыкание захватывает *ту же самую* переменную (`i`), значение которой равно 5, когда начинается действительное перечисление запроса. Чтобы решить проблему, переменную цикла потребуется присвоить другой переменной, объявленной *внутри* блока операторов:

```
for (int i = 0; i < vowels.Length; i++)
{
    char vowel = vowels[i];
    query = query.Where (c => c != vowel);
}
```

В таком случае на каждой итерации цикла будет захватываться свежая локальная переменная.



Еще один способ решения описанной проблемы предусматривает замену цикла `for` циклом `foreach`:

```
foreach (char vowel in vowels)
    query = query.Where (c => c != vowel);
```

Как работает отложенное выполнение

Операции запросов обеспечивают отложенное выполнение за счет возвращения *декораторных* последовательностей.

В отличие от традиционного класса коллекции, такого как массив или связанный список, декораторная последовательность (в общем случае) не имеет собственной поддерживающей структуры для хранения элементов. Взамен она является оболочкой для другой последовательности, предоставляемой во время выполнения, и поддерживает с ней постоянную зависимость. Всякий раз, когда запрашиваются данные из декоратора, он в свою очередь должен запрашивать данные из внутренней входной последовательности.



Трансформация операции запроса образует “декорацию”. Если выходная последовательность не подвергается трансформациям, то результатом будет простой *посредник*, а не декоратор.

Вызов операции `Where` просто конструирует декораторную последовательность-оболочку, которая хранит ссылку на входную последовательность, лямбда-выражение и любые другие указанные аргументы. Входная последовательность перечисляется только при перечислении декоратора.

На рис. 8.3 проиллюстрирована композиция следующего запроса:

```
IEnumerable<int> lessThanTen = new int[] { 5, 12, 3 }.Where (n => n < 10);
```

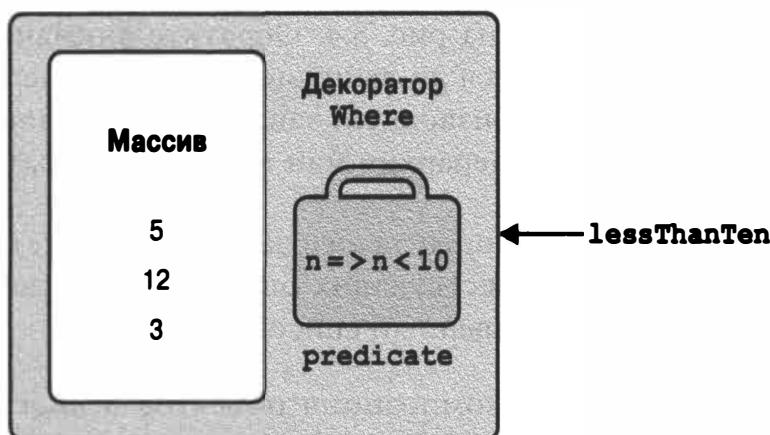


Рис. 8.3. Декораторная последовательность

При перечислении lessThanTen в действительности происходит запрос массива через декоратор Where.

Хорошая новость заключается в том, что даже если требуется создать собственную операцию запроса, то декораторная последовательность легко реализуется с помощью итератора C#. Ниже показано, как можно написать собственный метод MySelect:

```
public static IEnumerable<TResult> MySelect<TSource, TResult>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, TResult> selector)
{
    foreach (TSource element in source) yield return selector (element);
}
```

Данный метод является итератором благодаря наличию оператора `yield return`. С точки зрения функциональности он представляет собой сокращение для следующего кода:

```
public static IEnumerable<TResult> MySelect<TSource, TResult>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, TResult> selector)
{
    return new SelectSequence (source, selector);
}
```

где `SelectSequence` — это (сгенерированный компилятором) класс, перечислитель которого инкапсулирует логику из метода итератора.

Таким образом, при вызове операции вроде `Select` или `Where` всего лишь создается экземпляр перечислимого класса, который декорирует входную последовательность.

Построение цепочки декораторов

Объединение операций запросов в цепочку приводит к созданию иерархических представлений декораторов. Рассмотрим следующий запрос:

```
IEnumerable<int> query = new int[] { 5, 12, 3 }.Where (n => n < 10)
    .OrderBy (n => n)
    .Select (n => n * 10);
```

Каждая операция запроса создает новый экземпляр декоратора, который является оболочкой для предыдущей последовательности (подобно матрешке). Объектная модель этого запроса показана на рис. 8.4. Обратите внимание, что объектная модель полностью конструируется до выполнения любого перечисления.

При перечислении `query` производятся запросы к исходному массиву, трансформированному посредством иерархии или цепочки декораторов.



Добавление `ToList` в конец такого запроса приведет к немедленному выполнению предшествующих операций, что свернет всю объектную модель в единственный список.

На рис. 8.5 показана та же композиция объектов в виде диаграммы UML (Unified Modeling Language — универсальный язык моделирования).

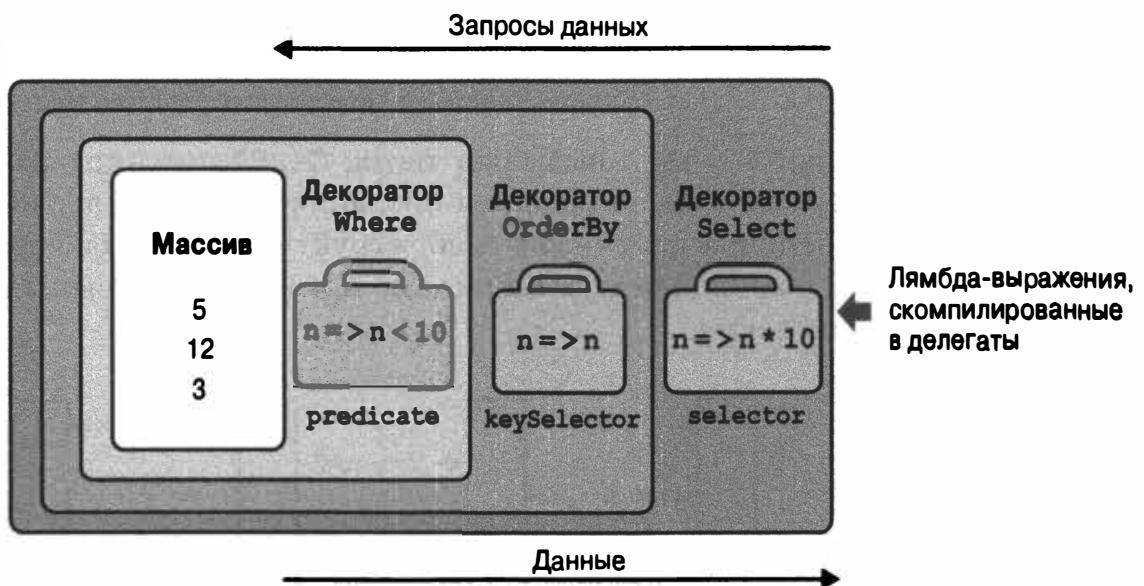


Рис. 8.4. Иерархия декораторных последовательностей

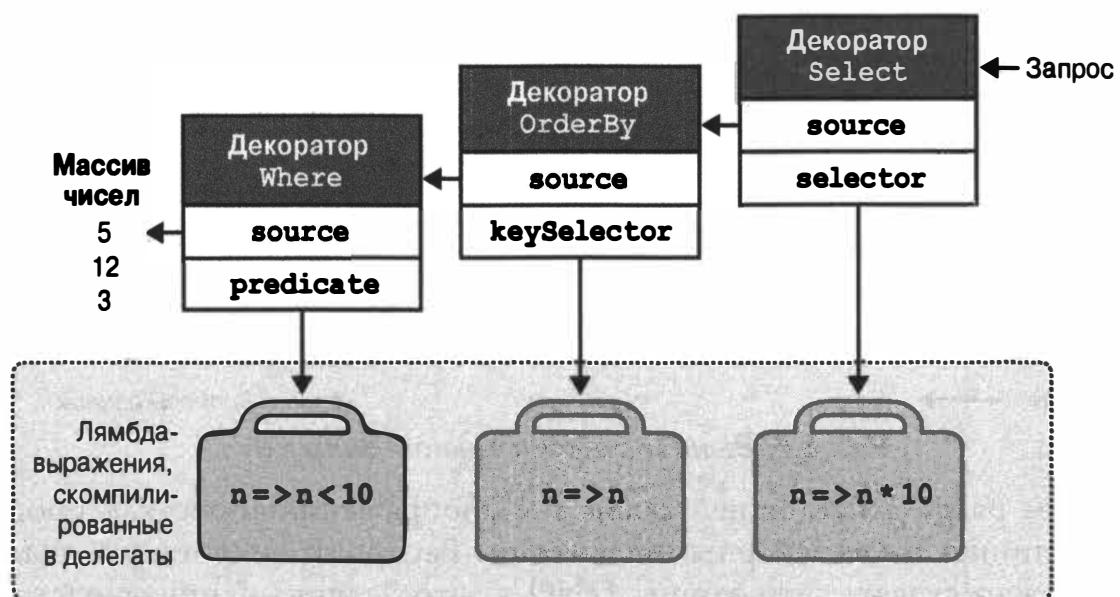


Рис. 8.5. UML-диаграмма композиции декораторов

Декоратор `Select` ссылается на декоратор `OrderBy`, который в свою очередь ссылается на декоратор `Where`, а тот — на массив. Особенность отложенного выполнения заключается в том, что при постепенном формировании запроса строится идентичная объектная модель:

```
IEnumerator<int>
source = new int[] { 5, 12, 3 },
filtered = source .Where (n => n < 10),
sorted = filtered .OrderBy (n => n),
query = sorted .Select (n => n * 10);
```

Каким образом выполняются запросы

Ниже представлены результаты перечисления предыдущего запроса:

```
foreach (int n in query) Console.WriteLine (n);
```

Вот вывод:

30

50

“За кулисами” цикл `foreach` вызывает метод `GetEnumerator` на декораторе `Select` (последняя или самая внешняя операция), который все и запускает. Результатом будет цепочка перечислителей, структурно отражающая цепочку декораторных последовательностей. На рис. 8.6 показан поток выполнения при прохождении перечисления.

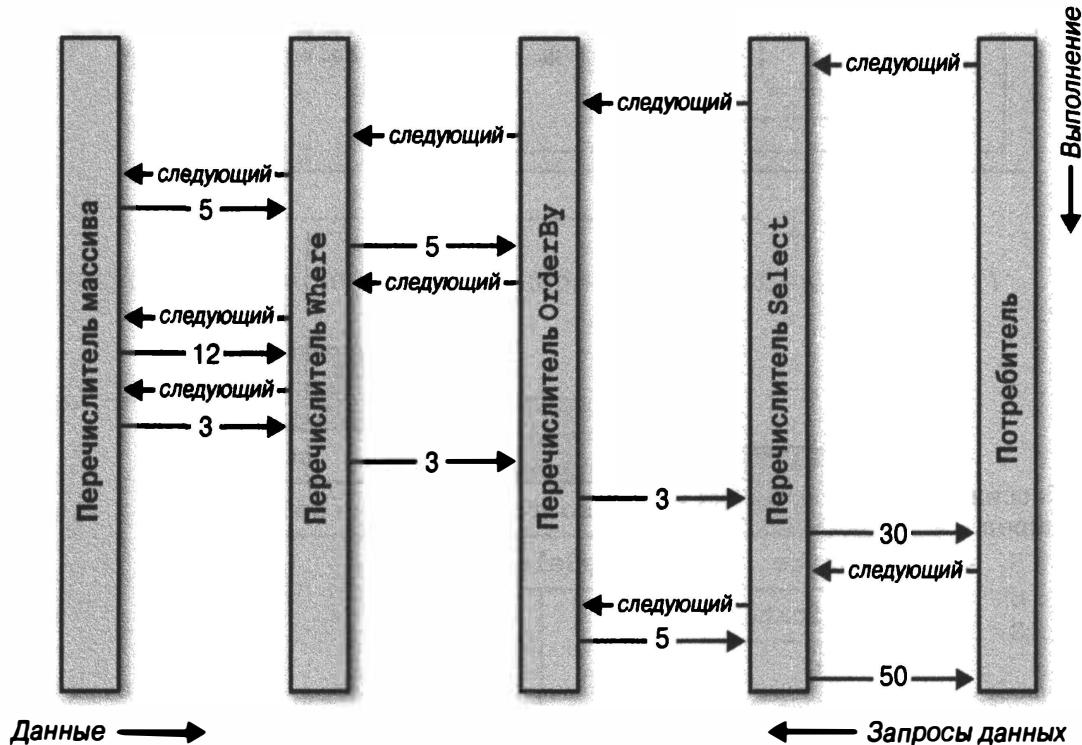


Рис. 8.6. Выполнение локального запроса

В первом разделе настоящей главы мы изображали запрос как производственную линию с конвейерными лентами. Распространяя такую аналогию дальше, можно сказать, что запрос LINQ — это “ленивая” производственная линия, в которой конвейерные ленты перемещают элементы только по требованию. Построение запроса конструирует производственную линию со всеми составными частями на своих местах, но в остановленном состоянии. Когда потребитель запрашивает элемент (выполняет перечисление запроса), активизируется самая правая конвейерная лента; такое действие в свою очередь запускает остальные конвейерные ленты — когда требуются элементы входной последовательности. Язык LINQ следует модели с пассивным источником, управляемой запросом, а не модели с активным источником, управляемой подачей. Это важный аспект, который, как будет показано далее, позволяет распространить LINQ на выдачу запросов к базам данных SQL.

Подзапросы

Подзапрос представляет собой запрос, содержащийся внутри лямбда-выражения другого запроса.

В следующем примере подзапрос применяется для сортировки музыкантов по фамилии:

```
string[] musos =
{ "David Gilmour", "Roger Waters", "Rick Wright", "Nick Mason" };
IEnumerable<string> query = musos.OrderBy (m => m.Split().Last());
```

Вызов `m.Split` преобразует каждую строку в коллекцию слов, на которой затем вызывается операция запроса `Last`. Здесь `m.Split().Last()` является подзапросом, а `query` — *внешним запросом*.

Подзапросы разрешены, т.к. с правой стороны лямбда-выражения можно помещать любое допустимое выражение C#. Подзапрос — это просто еще одно выражение C#. Таким образом, правила для подзапросов будут следствием из правил для лямбда-выражений (и общего поведения операций запросов).



В общем смысле термин “подзапрос” имеет более широкое значение. При описании LINQ мы используем данный термин только для запроса, находящегося внутри лямбда-выражения другого запроса. В выражении запроса подзапрос означает запрос, на который производится ссылка из выражения в любой конструкции кроме `from`.

Подзапрос имеет закрытую область видимости внутри включающего выражения и способен ссылаться на параметры во внешнем лямбда-выражении (или на переменные диапазона в выражении запроса).

Конструкция `m.Split().Last` — очень простой подзапрос. Следующий запрос извлекает из массива самые короткие строки:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };
IEnumerable<string> outerQuery = names
    .Where (n => n.Length == names.OrderBy (n2 => n2.Length)
        .Select (n2 => n2.Length).First());
```

ВЫВОД:

Tom, Jay

А вот как получить то же самое с помощью выражения запроса:

```
IEnumerable<string> outerQuery =
    from n in names
    where n.Length ==
        (from n2 in names orderby n2.Length select n2.Length).First()
    select n;
```

Поскольку внешняя переменная диапазона (`n`) находится в области видимости подзапроса, применять `n` в качестве переменной диапазона подзапроса нельзя.

Подзапрос выполняется каждый раз, когда вычисляется включающее его лямбда-выражение. Это значит, что подзапрос выполняется по требованию, на усмотрение внешнего запроса. Можно было бы сказать, что процесс выполнения продвигается *снаружи внутрь*. Локальные запросы следуют такой модели буквально, а интерпретируемые запросы (например, запросы к базе данных) следуют ей *концептуально*.

Подзапрос выполняется, когда это требуется для передачи данных внешнему запросу. Как иллюстрируется на рис. 8.7 и 8.8, в рассматриваемом примере подзапрос (верхняя конвейерная лента на рис. 8.7) выполняется один раз для каждой итерации внешнего цикла.

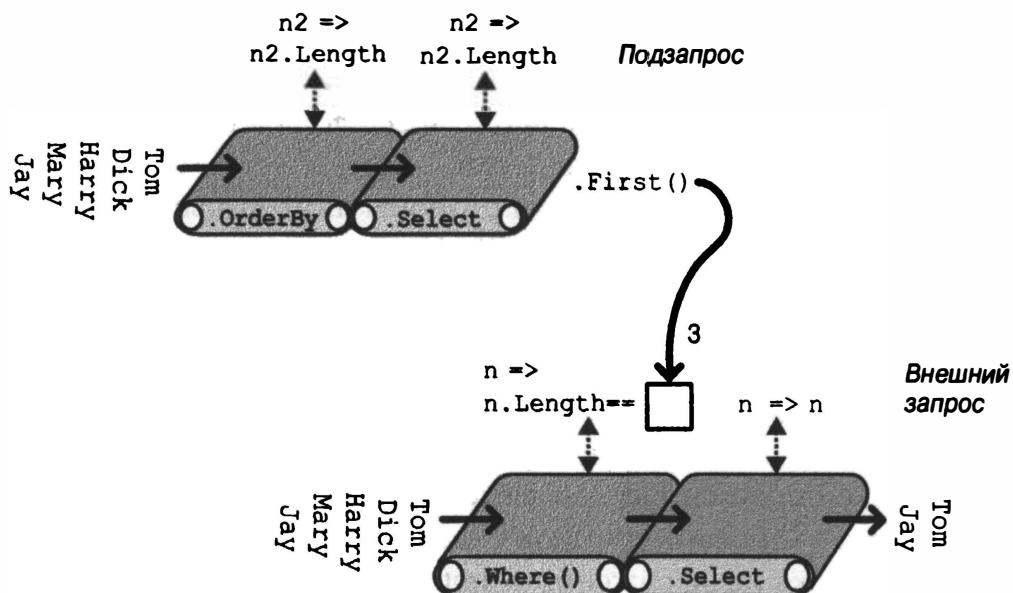


Рис. 8.7. Композиция подзапроса

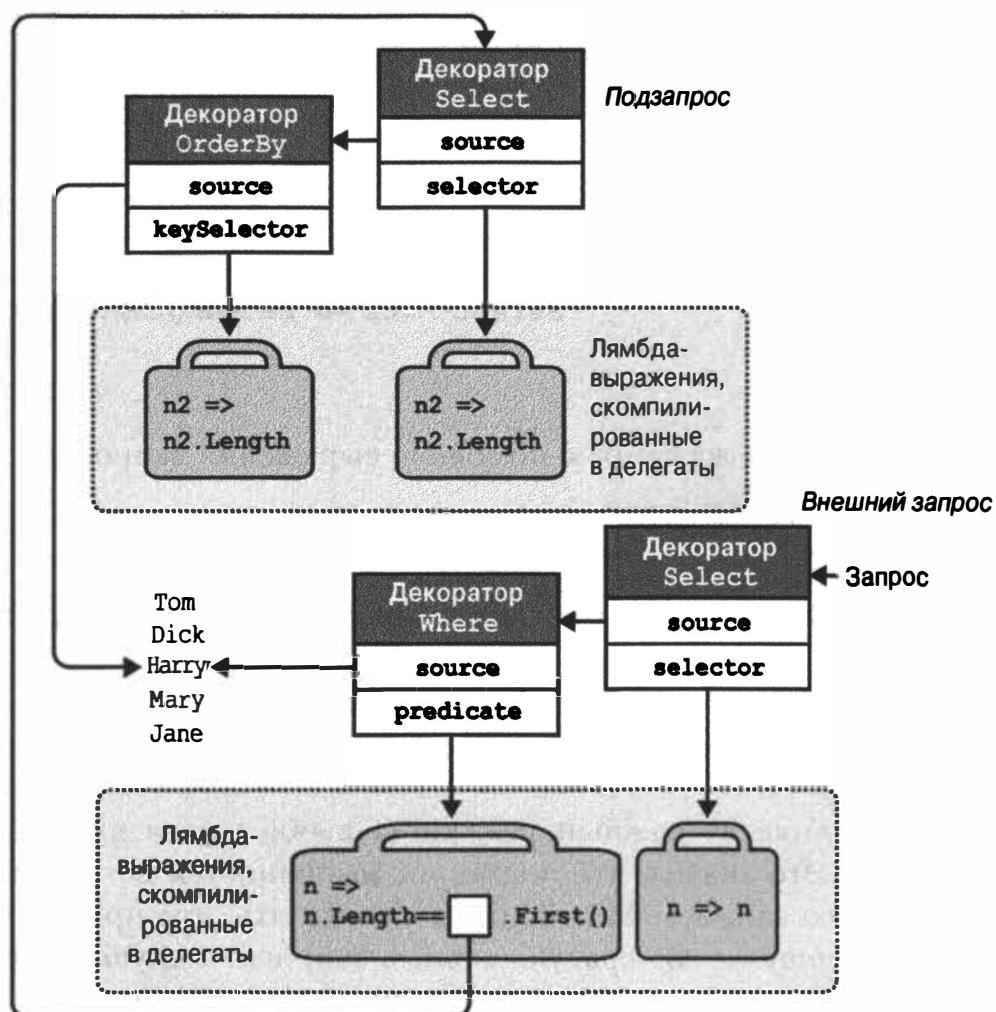


Рис. 8.8. UML-диаграмма композиции подзапроса

Предыдущий подзапрос можно выразить более лаконично:

```
IEnumerable<string> query =
    from n in names
    where n.Length == names.OrderBy (n2 => n2.Length).First().Length
    select n;
```

С помощью функции агрегирования Min запрос можно еще больше упростить:

```
IEnumerable<string> query =
    from n in names
    where n.Length == names.Min (n2 => n2.Length)
    select n;
```

В разделе “Интерпретируемые запросы” далее в главе мы покажем, каким образом отправлять запросы к удаленным источникам данных, таким как таблицы SQL. В нашем примере делается идеальный запрос к базе данных, потому что он может быть обработан как единое целое, требуя только одного обращения к серверу базы данных. Однако этот запрос неэффективен для локальной коллекции, т.к. на каждой итерации внешнего цикла подзапрос вычисляется повторно. Подобной неэффективности можно избежать, запуская подзапрос отдельно (так что он перестает быть подзапросом):

```
int shortest = names.Min (n => n.Length);
IQueryable<string> query = from n in names
                             where n.Length == shortest
                             select n;
```



Вынесение подзапросов в подобном стиле почти всегда желательно при выполнении запросов к локальным коллекциям. Исключение — ситуация, когда подзапрос является *коррелированным*, т.е. ссылается на внешнюю переменную диапазона. Коррелированные подзапросы рассматриваются в разделе “Выполнение проецирования” главы 9.

Подзапросы и отложенное выполнение

Наличие в подзапросе операции над элементами или операции агрегирования, такой как First или Count, не приводит к немедленному выполнению внешнего запроса — для внешнего запроса по-прежнему поддерживается отложенное выполнение. Причина в том, что подзапросы вызываются *косвенно* — через делегат в случае локального запроса или через дерево выражения в случае интерпретируемого запроса.

Интересная ситуация возникает при помещении подзапроса внутрь выражения Select. Для локального запроса фактически производится проецирование последовательности запросов, каждый из которых подпадает под отложенное выполнение. Результат обычно прозрачен и служит для дальнейшего улучшения эффективности. Подзапросы Select еще будут рассматриваться в главе 9.

Стратегии композиции

В настоящем разделе мы опишем три стратегии для построения более сложных запросов:

- постепенное построение запросов;
- использование ключевого слова `into`;
- упаковка запросов.

Все они являются стратегиями *выстраивания в цепочки* и во время выполнения выдают идентичные запросы.

Постепенное построение запросов

В начале главы мы демонстрировали, что текущий запрос можно было бы строить постепенно:

```
var filtered = names .Where (n => n.Contains ("a"));
var sorted = filtered .OrderBy (n => n);
var query = sorted .Select (n => n.ToUpper());
```

Из-за того, что каждая участвующая операция запроса возвращает декораторную последовательность, результирующим запросом будет та же самая цепочка либо иерархия декораторов, которая была бы получена из запроса с единственным выражением. Тем не менее, постепенное построение запросов обладает парой потенциальных преимуществ.

- Оно может упростить написание запросов.
- Операции запросов можно добавлять условно. Например, следующий прием:

```
if (includeFilter) query = query.Where (...)
```

более эффективен, чем такой вариант:

```
query = query.Where (n => !includeFilter || <выражение>)
```

поскольку позволяет избежать добавления дополнительной операции запроса, если `includeFilter` равно `false`.

Постепенный подход часто полезен в плане охвата запросов. В целях иллюстрации предположим, что нужно удалить все гласные из списка имен и затем представить в алфавитном порядке те из них, длина которых все еще превышает два символа. С помощью текущего синтаксиса мы могли бы записать такой запрос в форме единственного выражения, произведя проецирование перед фильтрацией:

```
IEnumerable<string> query = names
    .Select (n => n.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")
        .Replace ("o", "").Replace ("u", ""))
    .Where (n => n.Length > 2)
    .OrderBy (n => n);

// Dck
// Hrry
// Mry
```



Вместо того чтобы вызывать метод Replace типа string пять раз, мы могли бы удалить гласные из строки более эффективно посредством регулярного выражения:

```
n => Regex.Replace (n, "[aeiou]", "")
```

Однако метод Replace типа string обладает тем преимуществом, что работает также в запросах к базам данных.

Трансляция такого кода напрямую в выражение запроса довольно непроста, потому что конструкция select должна находиться после конструкций where и orderby. А если переупорядочить запрос так, чтобы проецирование выполнялось последним, то результат будет другим:

```
IEnumerable<string> query =
    from n in names
    where n.Length > 2
    orderby n
    select n.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")
        .Replace ("o", "").Replace ("u", "");

// Dck
// Hrry
// Jy
// Mry
// Tm
```

К счастью, существует несколько способов получить первоначальный результат с помощью синтаксиса запросов. Первый из них — постепенное формирование запроса:

```
IEnumerable<string> query =
    from n in names
    select n.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")
        .Replace ("o", "").Replace ("u", ");

query = from n in query where n.Length > 2 orderby n select n;

// Dck
// Hrry
// Mry
```

Ключевое слово `into`



В зависимости от контекста ключевое слово `into` интерпретируется выражениями запросов двумя совершенно разными путями. Его первое предназначение, которое мы опишем здесь — сигнализация о продолжении запроса (другим предназначением является сигнализация о GroupJoin).

Ключевое слово `into` позволяет “продолжить” запрос после проецирования и является сокращением для постепенного построения запросов.

Предыдущий запрос можно переписать с применением `into`:

```
IEnumerable<string> query =
    from n in names
    select n.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")
        .Replace ("o", "").Replace ("u", "")
    into noVowel
    where noVowel.Length > 2 orderby noVowel select noVowel;
```

Единственное место, где можно использовать `into` — после конструкции `select` или `group`. Ключевое слово `into` “начинает заново” запрос, позволяя вводить новые конструкции `where`, `orderby` и `select`.



Хотя с точки зрения выражения запроса ключевое слово `into` проще считать средством начать запрос заново, после трансляции в финальную текущую форму все становится *одним запросом*. Следовательно, ключевое слово `into` не привносит никаких дополнительных расходов в плане производительности. Применяя его, вы совершенно ничего не теряете!

Эквивалентом `into` в текущем синтаксисе является просто более длинная цепочка операций.

Правила области видимости

После ключевого слова `into` все переменные диапазона покидают область видимости. Следующий код не скомпилируется:

```
var query =
    from n1 in names
    select n1.ToUpper()
    into n2           // Начиная с этого места, видна только переменная n2
        where n1.Contains ("x")          // Недопустимо: n1 не находится
                                         // в области видимости
    select n2;
```

Чтобы понять причину, давайте посмотрим, как показанный код отображается на текущий синтаксис:

```
var query = names
    .Select (n1 => n1.ToUpper())
    .Where (n2 => n1.Contains ("x")); // Ошибка: переменная n1 не
                                         // находится в области видимости
```

К тому времени, когда запускается фильтр `Where`, исходная переменная (`n1`) уже утрачена. Входная последовательность `Where` содержит только имена в верхнем регистре, и ее фильтрация на основе `n1` невозможна.

Упаковка запросов

Запрос, построенный постепенно, может быть сформулирован как единственный оператор за счет упаковки одного запроса в другой.

В общем случае запрос:

```
var tempQuery = tempQueryExpr  
var finalQuery = from ... in tempQuery ...
```

можно переформулировать следующим образом:

```
var finalQuery = from ... in (tempQueryExpr)
```

Упаковка семантически идентична постепенному построению запросов либо использованию ключевого слова `into` (без промежуточной переменной). Во всех случаях конечным результатом будет линейная цепочка операций запросов. Например, рассмотрим показанный ниже запрос:

```
IEnumerable<string> query =  
    from n in names  
    select n.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")  
        .Replace ("o", "").Replace ("u", "");  
  
query = from n in query where n.Length > 2 orderby n select n;
```

Вот как он выглядит, когда переведен в упакованную форму:

```
IEnumerable<string> query =  
    from n1 in  
    (  
        from n2 in names  
        select n2.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")  
            .Replace ("o", "").Replace ("u", "")  
    )  
    where n1.Length > 2 orderby n1 select n1;
```

После преобразования в текущий синтаксис в результате получается та же самая линейная цепочка операций, что и в предшествующих примерах:

```
IEnumerable<string> query = names  
    .Select (n => n.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")  
        .Replace ("o", "").Replace ("u", ""))  
    .Where (n => n.Length > 2)  
    .OrderBy (n => n);
```

(Компилятор не выпускает финальный вызов `Select (n => n)`, т.к. он избыточен.)

Упакованные запросы могут несколько запутывать, поскольку они имеют сходство с *подзапросами*, которые рассматривались ранее. Обе разновидности поддерживают концепции внутреннего и внешнего запросов. Однако при преобразовании в текущий синтаксис можно заметить, что упаковка — это просто стратегия для последовательного выстраивания операций в цепочку. Конечный результат совершенно не похож на подзапрос, который встраивает внутренний запрос в *лямбда-выражение* другого запроса.

Возвращаясь к ранее примененной аналогии: при упаковке “внутренний” запрос имитирует *предшествующую конвейерную ленту*. И напротив, подзапрос перемещается по конвейерной ленте и активизируется по требованию посредством “лямбда-рабочего” конвейерной ленты (см. рис. 8.7).

Стратегии проецирования

Инициализаторы объектов

До сих пор все наши конструкции `select` проецировали в скалярные типы элементов. С помощью инициализаторов объектов C# можно выполнять проецирование в более сложные типы. Например, предположим, что в качестве первого шага запроса мы хотим удалить гласные из списка имен, одновременно сохраняя рядом исходные версии для последующих запросов. В помощь этому мы можем написать следующий класс:

```
class TempProjectionItem
{
    public string Original; // Исходное имя
    public string Vowelless; // Имя с удаленными гласными
}
```

Затем мы можем проецировать в него посредством инициализаторов объектов:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };
IEnumerable<TempProjectionItem> temp =
    from n in names
    select new TempProjectionItem
    {
        Original = n,
        Vowelless = n.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")
                    .Replace ("o", "").Replace ("u", "")
    };
```

Результатом будет тип `IEnumerable<TempProjectionItem>`, которому впоследствии можно отправлять запросы:

```
IEnumerable<string> query = from item in temp
                               where item.Vowelless.Length > 2
                               select item.Original;

// Dick
// Harry
// Mary
```

АНОНИМНЫЕ ТИПЫ

Анонимные типы позволяют структурировать промежуточные результаты без написания специальных классов. С помощью анонимных типов в предыдущем примере можно избавиться от класса `TempProjectionItem`:

```
var intermediate = from n in names
    select new
    {
        Original = n,
        Vowelless = n.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")
                    .Replace ("o", "").Replace ("u", "")
    };
```

```
IEnumerable<string> query = from item in intermediate
                             where item.Vowelless.Length > 2
                             select item.Original;
```

Результат будет таким же, как в предыдущем примере, но без необходимости в написании одноразового класса. Всю нужную работу проделает компилятор, сгенерировав класс с полями, которые соответствуют структуре нашей проекции. Тем не менее, это означает, что запрос `intermediate` имеет следующий тип:

```
IEnumerable<случайное-имя-сгенерированное-компилятором>
```

Единственный способ объявления переменной такого типа предусматривает использование ключевого слова `var`. В данном случае `var` является не просто средством сокращения беспорядка, а настоятельной необходимостью.

С применением ключевого слова `into` запрос можно записать более лаконично:

```
var query = from n in names
            select new
            {
                Original = n,
                Vowelless = n.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")
                            .Replace ("o", "").Replace ("u", "")
            }
            into temp
            where temp.Vowelless.Length > 2
            select temp.Original;
```

Выражения запросов предлагают сокращение для написания запросов подобного вида — ключевое слово `let`.

Ключевое слово `let`

Ключевое слово `let` вводит новую переменную параллельно переменной диапазона.

Написать запрос, извлекающий строки, длина которых после исключения гласных превышает два символа, посредством `let` можно так:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };
IQueryable<string> query =
    from n in names
    let vowelless = n.Replace ("a", "").Replace ("e", "").Replace ("i", "")
                      .Replace ("o", "").Replace ("u", "")
    where vowelless.Length > 2
    orderby vowelless
    select n;      // Благодаря let переменная n по-прежнему находится
                   // в области видимости
```

Компилятор распознает конструкцию `let` путем проецирования во временный анонимный тип, который содержит переменную диапазона и новую переменную выражения. Другими словами, компилятор транслирует этот запрос в показанный ранее пример.

Ключевое слово `let` решает две задачи:

- оно проецирует новые элементы наряду с существующими элементами;
- оно позволяет многократно использовать выражение в запросе, не записывая его каждый раз заново.

В приведенном примере подход с `let` особенно полезен, т.к. он позволяет конструкции `select` выполнять проецирование либо исходного имени (`n`), либо его версии с удаленными гласными (`vowelless`).

Можно иметь любое количество конструкций `let`, находящихся до или после `where` (см. рис. 8.2). В операторе `let` можно ссылаться на переменные, введенные в более ранних операторах `let` (в зависимости от границ, наложенных конструкцией `into`). Оператор `let` *повторно проецирует* все существующие переменные прозрачным образом.

Выражение `let` не должно вычисляться как значение скалярного типа: его иногда полезно вычислять, скажем, в подпоследовательность.

Интерпретируемые запросы

Язык LINQ параллельно поддерживает две архитектуры: *локальные* запросы для локальных коллекций объектов и *интерпретируемые* запросы для удаленных источников данных. До сих пор мы исследовали архитектуру локальных запросов, которые действуют на коллекциях, реализующих интерфейс `IEnumerable<T>`. Локальные запросы преобразуются в операции запросов из класса `Enumerable` (по умолчанию), которые в свою очередь распознаются как цепочки декораторных последовательностей. Делегаты, которые они принимают — выраженные с применением синтаксиса запросов, текущего синтаксиса или же традиционные делегаты — полностью локальны по отношению к коду на языке IL в точности как любой другой метод C#.

В противоположность этому интерпретируемые запросы являются *дескриптивными*. Они действуют на последовательностях, реализующих интерфейс `IQueryable<T>`, и преобразуются в операции запросов из класса `Queryable`, которые выпускают *деревья выражений*, интерпретируемые во время выполнения. Такие деревья выражений можно транслировать, скажем, в SQL-запросы, позволяя использовать LINQ для запрашивания базы данных.



Операции запросов в классе `Enumerable` могут в действительности работать с последовательностями `IQueryable<T>`. Сложность в том, что результирующие запросы всегда выполняются локально на стороне клиента — именно потому в классе `Queryable` предлагается второй набор операций запросов.

Для написания интерпретируемых запросов вам необходимо выбрать API-интерфейс, предоставляющий последовательности типа `IQueryable<T>`. Примером может служить инфраструктура *Entity Framework Core* (EF Core) от Microsoft, которая позволяет запрашивать разнообразные базы данных, включая *SQL Server*, *Oracle*, *MySQL*, *PostgreSQL* и *SQLite*.

Можно также сгенерировать оболочку `IQueryable<T>` для обычной перечислимой коллекции, вызвав метод `AsQueryable`. Мы опишем метод `AsQueryable` в разделе “Построение выражений запросов” далее в главе.



Интерфейс `IQueryable<T>` является расширением интерфейса `IEnumerable<T>` с дополнительными методами, предназначенными для конструирования деревьев выражений. Большую часть времени вы будете игнорировать детали, связанные с этими методами; они косвенно вызываются инфраструктурой. Интерфейс `IQueryable<T>` более подробно рассматривается в разделе “Построение выражений запросов” далее в главе.

В целях иллюстрации давайте создадим в SQL Server простую таблицу заказчиков (`Customer`) и наполним ее несколькими именами с применением следующего SQL-сценария:

```
create table Customer
(
    ID int not null primary key,
    Name varchar(30)
)
insert Customer values (1, 'Tom')
insert Customer values (2, 'Dick')
insert Customer values (3, 'Harry')
insert Customer values (4, 'Mary')
insert Customer values (5, 'Jay')
```

Располагая такой таблицей, мы можем написать на C# интерпретируемый запрос LINQ, который использует EF Core для извлечения заказчиков с именами, содержащими букву “а”:

```
using System;
using System.Linq;
using Microsoft.EntityFrameworkCore;
using var dbContext = new NutshellContext();

IQueryable<string> query = from c in dbContext.Customers
    where c.Name.Contains ("a")
    orderby c.Name.Length
    select c.Name.ToUpper();

foreach (string name in query) Console.WriteLine (name);

public class Customer
{
    public int ID { get; set; }
    public string Name { get; set; }
}

// Мы более подробно обсудим класс NutshellContext в следующем разделе
public class NutshellContext : DbContext
{
    public virtual DbSet<Customer> Customers { get; set; }
    protected override void OnConfiguring (DbContextOptionsBuilder builder)
        => builder.UseSqlServer ("...строка подключения...");
```

```
protected override void OnModelCreating (ModelBuilder modelBuilder)
    => modelBuilder.Entity<Customer>().ToTable ("Customer")
        .HasKey (c => c.ID);
}
```

Инфраструктура EF Core транслирует такой запрос в следующий SQL-оператор:

```
SELECT UPPER ([c].[Name])
FROM [Customers] AS [c]
WHERE CHARINDEX(N'a', [c].[Name]) > 0
ORDER BY CAST(LEN([c].[Name]) AS int)
```

Конечный результат выглядит так:

```
JAY
MARY
HARRY
```

Каким образом работают интерпретируемые запросы

Давайте выясним, как обрабатывается показанный ранее запрос.

Сначала компилятор преобразует синтаксис запросов в текущий синтаксис, поступая в точности так, как с локальными запросами:

```
IQueryable<string> query = dbContext.customers
    .Where (n => n.Name.Contains ("a"))
    .OrderBy (n => n.Name.Length)
    .Select (n => n.Name.ToUpper());
```

Далее компилятор распознает методы операций запросов. Здесь локальные и интерпретируемые запросы отличаются — интерпретируемые запросы преобразуются в операции запросов из класса `Queryable`, а не `Enumerable`.

Чтобы понять причину, необходимо взглянуть на переменную `dbContext.Customers`, являющуюся источником, на котором строится весь запрос. Переменная `dbContext.Customers` имеет тип `DbSet<T>`, реализующий интерфейс `IQueryable<T>` (подтип `IEnumerable<T>`). Таким образом, у компилятора есть выбор при распознавании `Where`: он может вызвать расширяющий метод в `Enumerable` или следующий расширяющий метод в `Queryable`:

```
public static IQueryable<TSource> Where<TSource> (this
    IQueryable<TSource> source, Expression <Func<TSource, bool>> predicate)
```

Компилятор выбирает метод `Queryable.Where`, потому что его сигнатура обеспечивает более специфичное соответствие.

Метод `Queryable.Where` принимает предикат, помещенный в оболочку типа `Expression<TDelegate>`. Тем самым компилятору сообщается о необходимости транслировать переданное лямбда-выражение, т.е. `n=>n.Name.Contains ("a")`, в дерево выражения, а не в компилируемый делегат. Дерево выражения — это объектная модель, основанная на типах из пространства имен `System.Linq.Expressions`, которая может инспектироваться во время выполнения (так что инфраструктура EF Core может позже транслировать ее в SQL-оператор).

Поскольку метод `Queryable.Where` также возвращает экземпляр реализации `IQueryable<T>`, для операций `OrderBy` и `Select` происходит аналогичный процесс. Конечный результат показан на рис. 8.9. В затененном прямоугольнике представлено дерево выражения, описывающее полный запрос, которое можно обходить во время выполнения.

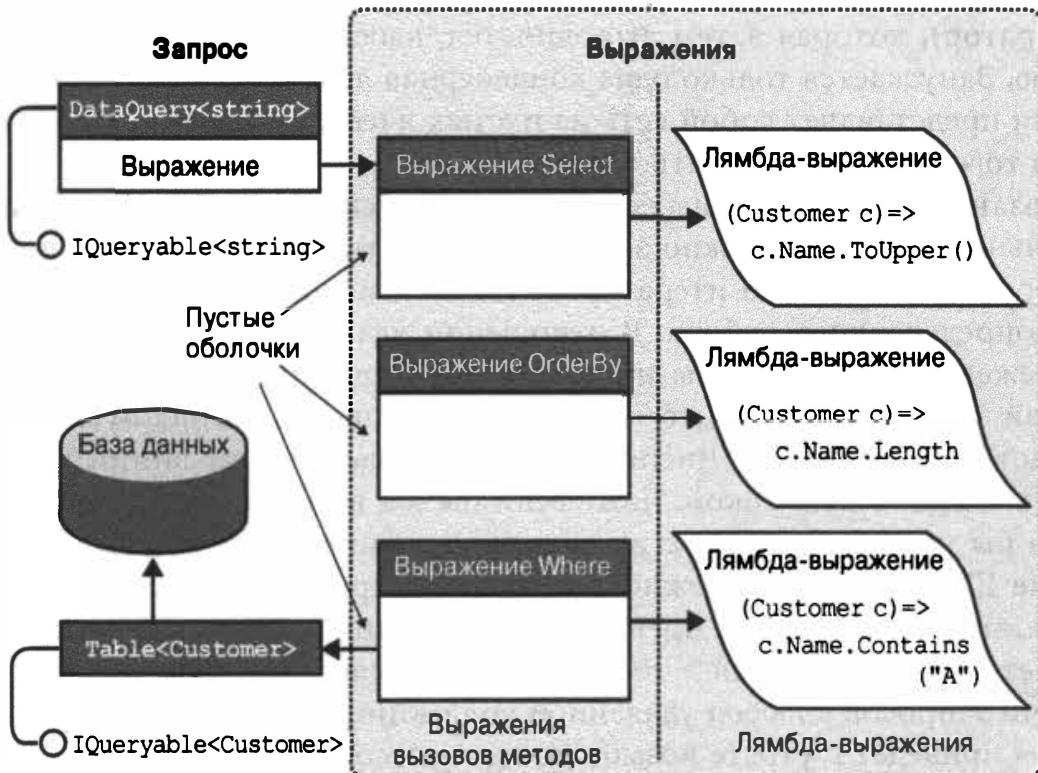


Рис. 8.9. Композиция интерпретируемого запроса

Выполнение

Интерпретируемые запросы следуют модели отложенного выполнения — подобно локальным запросам. Это означает, что SQL-оператор не генерируется вплоть до начала перечисления запроса. Кроме того, двукратное перечисление одного и того же запроса приводит к двум отправкам запроса в базу данных.

“За кулисами” интерпретируемые запросы отличаются от локальных запросов тем, каким образом они выполняются. При перечислении интерпретируемого запроса самая внешняя последовательность запускает программу, которая обходит все дерево выражения, обрабатывая его как единое целое. В нашем примере инфраструктура EF Core транслирует дерево выражения в SQL-оператор, который затем выполняется, выдавая результаты в виде последовательности.



Для работы инфраструктура EF Core должна понять схему базы данных, для чего она задействует соглашения, атрибуты кода и текущий API-интерфейс конфигурирования. Мы подробно обсудим все это позже в главе.

Ранее уже упоминалось, что запрос LINQ подобен производственной линии. Однако выполнение перечисления конвейерной ленты `IQueryable` не приводит к запуску всей производственной линии, как в случае локального запро-

са. Взамен запускается только конвейерная лента `IQueryable` со специальным перечислителем, который вызывается на диспетчере производственной линии. Диспетчер просматривает целую конвейерную ленту, которая состоит не из скомпилированного кода, а из заглушек (выражений вызовов методов) с инструкциями, вставленными в их начало (деревья выражений). Затем диспетчер обходит все выражения, в данном случае переписывая их в единую сущность (SQL-оператор), которая затем выполняется, выдавая результаты обратно потребителю. Запускается только одна конвейерная лента; остаток производственной линии представляет собой сеть из пустых ячеек, существующих только для описания того, что должно быть сделано.

Из сказанного вытекает несколько практических последствий. Например, для локальных запросов можно записывать собственные методы запросов (довольно просто с помощью итераторов) и затем использовать их для дополнения предопределенного набора. В отношении удаленных запросов это трудно и даже нежелательно. Если вы написали расширяющий метод `MyWhere`, принимающий `IQueryable<T>`, то хотели бы помещать собственную заглушку в производственную линию. Диспетчуру производственной линии неизвестно, что делать с вашей заглушкой. Даже если бы вы вмешались в данную фазу, то получили бы решение, которое жестко привязано к конкретному поставщику наподобие EF Core без возможности работы с другими реализациями интерфейса `IQueryable`. Одно из преимуществ наличия в `Queryable` стандартного набора методов заключается в том, что они определяют *стандартный словарь* для выдачи запросов к любой удаленной коллекции. Попытка расширения такого словаря приведет к утрате возможности взаимодействия.

Из модели вытекает еще одно следствие: поставщик `IQueryable` может оказаться не в состоянии справиться с некоторыми запросами — даже если вы придерживаетесь стандартных методов. Инфраструктура EF Core ограничена возможностями сервера базы данных; для некоторых запросов LINQ не предусмотрена трансляция в SQL. Если вы знакомы с языком SQL, тогда имеете об этом хорошее представление, хотя иногда приходится экспериментировать, чтобы посмотреть, что именно вызвало ошибку во время выполнения. Вас может удивить, что некоторые средства *вообще* работают!

Комбинирование интерпретируемых и локальных запросов

Запрос может включать и интерпретируемые, и локальные операции. В типичном шаблоне применяются локальные операции *снаружи* и интерпретируемые компоненты *внутри*; другими словами, интерпретируемые запросы наполняют локальные запросы. Такой шаблон хорошо работает при запрашивании базы данных.

Например, предположим, что мы написали специальный расширяющий метод для объединения в пары строк из коллекции:

```
public static IEnumerable<string> Pair (this IEnumerable<string> source)
{
    string firstHalf = null;
```

```

foreach (string element in source)
{
    if (firstHalf == null)
        firstHalf = element;
    else
    {
        yield return firstHalf + ", " + element;
        firstHalf = null;
    }
}

```

Этот расширяющий метод можно использовать в запросе со смесью операций EF Core и локальных операций:

```

using var dbContext = new NutshellContext ();
IEnumerable<string> q = dbContext.Customers
    .Select (c => c.Name.ToUpper ())
    .OrderBy (n => n)
    .Pair()           // Локальная с этого момента
    .Select ((n, i) => "Pair " + i.ToString () + " = " + n); // Отобразить пару
foreach (string element in q) Console.WriteLine (element);
// Pair 0 = DICK, HARRY
// Pair 1 = JAY, MARY

```

Поскольку dbContext.Customers имеет тип, реализующий интерфейс IQueryable<T>, операция Select преобразуется в вызов метода Queryable.Select. Данный метод возвращает выходную последовательность, также имеющую тип IQueryable<T>, поэтому операция OrderBy аналогично преобразуется в вызов метода Queryable.OrderBy. Но следующая операция запроса, Pair, не имеет перегруженной версии, которая принимала бы тип IQueryable<T> — есть только версия, принимающая менее специфичный тип IEnumerable<T>. Таким образом, она преобразуется в наш локальный метод Pair с упаковкой интерпретируемого запроса в локальный запрос. Метод Pair также возвращает реализацию интерфейса IEnumerable, а потому последующая операция Select преобразуется в еще одну локальную операцию. На стороне EF Core результирующий SQL-оператор эквивалентен такому коду:

```
SELECT UPPER([c].[Name]) FROM [Customers] AS [c] ORDER BY UPPER([c].[Name])
```

Оставшаяся часть работы выполняется локально. Фактически мы получаем локальный запрос (снаружи), источником которого является интерпретируемый запрос (внутри).

Метод AsEnumerable

Метод Enumerable.AsEnumerable — простейшая из всех операций запросов. Вот полное определение метода:

```

public static IEnumerable<TSource> AsEnumerable<TSource>
    (this IEnumerable<TSource> source)
{
    return source;
}

```

Он предназначен для приведения последовательности `IQueryable<T>` к `IEnumerable<T>`, заставляя последующие операции запросов привязываться к операциям из класса `Enumerable`, а не к операциям из класса `Queryable`. Это приводит к тому, что остаток запроса выполняется локально.

В целях иллюстрации предположим, что в базе данных SQL Server имеется таблица со статьями по медицине `MedicalArticles`, и с помощью EF Core необходимо извлечь все статьи, посвященные гриппу (`influenza`), резюме которых содержит менее 100 слов. Для последнего предиката потребуется регулярное выражение:

```
Regex wordCounter = new Regex(@"\b(\w|[-'])+\b");
using var dbContext = new NutshellContext();
var query = dbContext.MedicalArticles
    .Where(article => article.Topic == "influenza" &&
        wordCounter.Matches(article.Abstract).Count < 100);
```

Проблема в том, что база данных SQL Server не поддерживает регулярные выражения, поэтому инфраструктура EF Core будет генерировать исключение, сообщая о невозможности трансляции запроса в SQL. Мы можем решить проблему за два шага: сначала извлечь все статьи, посвященные гриппу, посредством запроса EF Core, а затем локально отфильтровать сопровождающие статьи резюме, которые содержат менее 100 слов:

```
Regex wordCounter = new Regex(@"\b(\w|[-'])+\b");
using var dbContext = new NutshellContext();
IEnumerable<MedicalArticle> efQuery = dbContext.MedicalArticles
    .Where(article => article.Topic == "influenza");
IEnumerable<MedicalArticle> localQuery = efQuery
    .Where(article => wordCounter.Matches(article.Abstract).Count < 100);
```

Так как `efQuery` имеет тип `IEnumerable<MedicalArticle>`, второй запрос привязывается к локальным операциям запросов, обеспечивая выполнение части фильтрации на стороне клиента.

С помощью `AsEnumerable` то же самое можно сделать в единственном запросе:

```
Regex wordCounter = new Regex(@"\b(\w|[-'])+\b");
using var dbContext = new NutshellContext();
var query = dbContext.MedicalArticles
    .Where(article => article.Topic == "influenza")
    .AsEnumerable()
    .Where(article => wordCounter.Matches(article.Abstract).Count < 100);
```

Альтернативой вызову `AsEnumerable` является вызов метода `ToArray` или `ToList`. Преимущество операции `AsEnumerable` в том, что она не приводит к немедленному выполнению запроса и не создает какой-либо структуры для хранения.



Перенос обработки запросов из сервера базы данных на сторону клиента может нанести ущерб производительности, особенно если обработка предусматривает извлечение дополнительных строк. Более эффективный (хотя и более сложный) способ решения предполагает применение интеграции CLR с SQL для открытия доступа к функции в базе данных, которая реализует регулярное выражение.

В главе 10 мы приведем дополнительные примеры использования комбинированных интерпретируемых и локальных запросов.

Инфраструктура EF Core

Для демонстрации интерпретируемых запросов в текущей главе и в главе 9 применяется инфраструктура EF Core. Давайте исследуем ее ключевые особенности.

Сущностные классы EF Core

Инфраструктура EF Core позволяет использовать для представления данных любой класс при условии, что он содержит открытые свойства для всех столбцов, которые планируется запрашивать.

Например, мы могли бы определить следующий сущностный класс для запрашивания и обновления таблицы Customers в базе данных:

```
public class Customer
{
    public int ID { get; set; }
    public string Name { get; set; }
}
```

Объект DbContext

После определения сущностных классов необходимо определить подкласс класса DbContext. Экземпляр этого класса представляет ваши сеансы, работающие с базой данных. Обычно подкласс DbContext будет содержать по одному свойству DbSet<T> для каждой сущности в модели:

```
public class NutshellContext : DbContext
{
    public DbSet<Customer> Customers { get; set; }
    ...свойства для остальных таблиц...
}
```

Вот за что отвечает объект DbContext.

- Он действует как фабрика для генерирования объектов DbSet<T>, которые вы можете запрашивать.
- Он отслеживает любые изменения, которые вы вносите в свои сущности, чтобы их можно было записать обратно.
- Он предоставляет виртуальные методы, которые вы можете переопределить для конфигурирования подключения и модели.

Конфигурирование подключения

За счет переопределения метода `OnConfiguring` вы можете указывать поставщик базы данных и строку подключения:

```
public class NutshellContext : DbContext
{
    ...
    protected override void OnConfiguring (DbContextOptionsBuilder
optionsBuilder) =>
    optionsBuilder.UseSqlServer
        ("Server=(local);Database=Nutshell;Trusted_Connection=True");
}
```

В этом примере строка подключения указывается в виде строкового литерала. Производственные приложения обычно будут извлекать ее из конфигурационного файла вроде `appsettings.json`.

`UseSqlServer` — расширяющий метод, определенный в сборке, которая входит в состав NuGet-пакета `Microsoft.EntityFrameworkCore.SqlServer`. Доступны пакеты и для других поставщиков баз данных, включая `Oracle`, `MySQL`, `PostgreSQL` и `SQLite`.



Если вы работаете с платформой ASP.NET, то можете разрешить ее инфраструктуре внедрения зависимостей предварительно конфигурировать `optionsBuilder`; в большинстве случаев такой прием позволяет вообще избежать переопределения метода `OnConfiguring`. Для этого определите конструктор в `DbContext` следующим образом:

```
public NutshellContext (DbContextOptions<NutshellContext>
options)
    : base(options) { }
```

Если вы решили переопределить метод `OnConfiguring` (возможно, чтобы предоставить конфигурацию, если ваш объект `DbContext` используется в другом сценарии), тогда вот как можно проверить, сконфигурированы ли параметры:

```
protected override void OnConfiguring (
    DbContextOptionsBuilder optionsBuilder)
{
    if (!optionsBuilder.IsConfigured)
    {
        ...
    }
}
```

В методе `OnConfiguring` можно включать и другие параметры, в том числе ленивую загрузку (см. раздел “Ленивая загрузка” далее в главе).

Конфигурирование модели

По умолчанию инфраструктура EF Core основана на соглашениях, т.е. она выводит схему базы данных из имен вашего класса и свойств.

Вы можете переопределить стандартные соглашения с применением текущего API-интерфейса, переопределяя метод `OnModelCreating` и вызывая расши-

ряющие методы на параметре `ModelBuilder`. Например, можно явно указать имя таблицы базы данных для сущности `Customer`:

```
protected override void OnModelCreating (ModelBuilder modelBuilder) =>
    modelBuilder.Entity<Customer>()
        .ToTable ("Customer"); // Таблица называется Customer
```

Без такого кода инфраструктура EF Core отобразила бы эту сущность на таблицу по имени “`Customers`”, а не “`Customer`” из-за наличия в `DbContext` свойства типа `DbSet<Customer>`, которое имеет имя `Customers`:

```
public DbSet<Customer> Customers { get; set; }
```



Следующий код отображает все сущности на имена таблиц, которые соответствуют именам классов сущностей (обычно имеющим форму единственного числа), а не именам свойств типа `DbSet<T>` (обычно имеющим форму множественного числа):

```
protected override void OnModelCreating (ModelBuilder modelBuilder)
{
    foreach (IMutableEntityType entityType in
        modelBuilder.Model.GetEntityTypes ())
    {
        modelBuilder.Entity (entityType.Name)
            .ToTable (entityType.ClrType.Name);
    }
}
```

Текущий API-интерфейс предлагает расширенный синтаксис для конфигурирования столбцов. В показанном ниже примере мы применяем два популярных метода:

- `HasColumnName`, который отображает свойство на по-другому именованный столбец;
- `IsRequired`, который указывает на то, что столбец не допускает значения `null`.

```
protected override void OnModelCreating (ModelBuilder modelBuilder) =>
    modelBuilder.Entity<Customer> (entity =>
    {
        entity.ToTable ("Customer");
        entity.Property (e => e.Name)
            .HasColumnName ("Full Name") // Имя столбца - Full Name
            .IsRequired(); // Столбце не допускает значения null
    });
}
```

В табл. 8.1 перечислены наиболее важные методы в текущем API-интерфейсе.



Вместо использования текущего API-интерфейса вы можете конфигурировать свою модель путем применения специальных атрибутов к сущностным классам и свойствам (“аннотаций данных”). Такой подход менее гибок в том, что конфигурация должна устанавливаться на этапе компиляции, и менее мощный в том, что некоторые параметры можно конфигурировать только через текущий API-интерфейс.

Таблица 8.1. Методы для конфигурирования модели в текущем API-интерфейсе

Метод	Назначение	Пример
ToTable	Указывает имя таблицы базы данных	builder .Entity<Customer>() .ToTable("Customer");
HasColumnName	Указывает имя столбца для заданного свойства	builder.Entity<Customer>() .Property(c => c.Name) .HasColumnName("Full Name");
HasKey	Указывает ключ (обычно это отклонение от соглашения)	builder.Entity<Customer>() .HasKey(c => c.CustomerNr);
IsRequired	Указывает на то, что свойство требует значения (не допускает null)	builder.Entity<Customer>() .Property(c => c.Name) .IsRequired();
HasMaxLength	Указывает максимальную длину типа с переменной длиной (обычно строки), чья ширина может варьироваться	builder.Entity<Customer>() .Property(c => c.Name) HasMaxLength(60);
HasColumnType	Указывает тип данных в базе данных для столбца	builder.Entity<Purchase>() .Property(p => p.Description) HasColumnType("varchar(80)");
Ignore	Игнорирует тип	builder.Ignore<Products>();
Ignore	Игнорирует свойство типа	builder.Entity<Customer>() .Ignore(c => c.ChatName);
HasIndex	Указывает свойство (или комбинацию свойств), которое должно служить индексом в базе данных	// Составной индекс: // builder.Entity<Purchase>() // .HasIndex(p => // new { p.Date, p.Price }); // Уникальный индекс // на одном свойстве: builder .Entity<MedicalArticle>() .HasIndex(a => a.Topic) .IsUnique();
HasOne	См. раздел “Навигационные свойства” далее в главе	builder.Entity<Purchase>() .HasOne(p => p.Customer) .WithMany(c => c.Purchases);
hasMany	См. раздел “Навигационные свойства” далее в главе	builder.Entity<Customer>() .HasMany(c => c.Purchases) .WithOne(p => p.Customer);

Создание базы данных

Инфраструктура EF Core поддерживает подход “сначала код”, т.е. вы можете начать с определения сущностных классов и затем предложить EF Core создать базу данных. Самый простой способ создания базы данных предусматривает вызов следующего метода на экземпляре DbContext:

```
dbContext.Database.EnsureCreated();
```

Однако более удачный подход предполагает использование функционального средства *миграций EF Core*, которое не только создает базу данных, но и конфигурирует ее так, что инфраструктура EF Core может автоматически обновлять схему в будущем, когда ваши сущностные классы изменятся. Находясь в консоли диспетчера пакетов Visual Studio, вы можете включить миграции и потребовать создание базы данных с помощью следующих команд:

```
Install-Package Microsoft.EntityFrameworkCore.Tools  
Add-Migration InitialCreate  
Update-Database
```

Первая команда устанавливает инструменты для управления инфраструктурой EF Core из среды Visual Studio. Вторая команда генерирует специальный класс C#, известный как кодовая миграция, который содержит инструкции для создания базы данных. Последняя команда запускает эти инструкции относительно строки подключения к базе данных, указанной в конфигурационном файле проекта приложения.

Использование `DbContext`

После определения сущностных классов и подкласса `DbContext` вы можете создать экземпляр `DbContext` и запрашивать базу данных:

```
using var dbContext = new NutshellContext();  
Console.WriteLine (dbContext.Customers.Count());  
// Выполняется SELECT COUNT(*) FROM [Customer] AS [c]
```

Экземпляр `DbContext` можно применять также для записи в базу данных. Следующий код вставляет строку в таблицу `Customers`:

```
using var dbContext = new NutshellContext();  
Customer cust = new Customer()  
{  
    Name = "Sara Wells"  
};  
dbContext.Customers.Add (cust);  
dbContext.SaveChanges(); // Записывает изменения обратно в базу данных
```

Показанный далее код запрашивает у базы данных только что вставленную строку с информацией о заказчике:

```
using var dbContext = new NutshellContext();  
Customer cust = dbContext.Customers  
.Single (c => c.Name == "Sara Wells")
```

Приведенный ниже код обновляет имя этого заказчика и записывает изменение в базу данных:

```
cust.Name = "Dr. Sara Wells";  
dbContext.SaveChanges();
```



Операция `Single` идеально подходит для извлечения строки по первичному ключу. В отличие от `First` в случае возвращения более одного элемента она генерирует исключение.

Отслеживание объектов

Экземпляр `DbContext` отслеживает все сущности, экземпляры которых он создает, так что при запросе тех же самых строк в таблице он может выдавать те же самые сущности. Другими словами, за время своего существования контекст никогда не выпустит две отдельных сущности, которые относятся к одной и той же строке в таблице (когда строка идентифицируется первичным ключом). Такая возможность называется *отслеживанием объектов*.

В целях иллюстрации предположим, что заказчик, имя которого является первым в алфавитном порядке, также имеет наименьший идентификатор. В следующем примере `a` и `b` будут ссылаться на один и тот же объект:

```
using var dbContext = new NutshellContext ();
Customer a = dbContext.Customers.OrderBy (c => c.Name).First();
Customer b = dbContext.Customers.OrderBy (c => c.ID).First();
```

Освобождение экземпляров `DbContext`

Несмотря на то что класс `DbContext` реализует интерфейс `IDisposable`, можно (в общем случае) обойтись без освобождения его экземпляров. Освобождение принудительно закрывает подключение контекста, но обычно поступать подобным образом вовсе не обязательно, т.к. инфраструктура EF Core закрывает подключения автоматически всякий раз, когда завершается извлечение результатов из запроса.

Преждевременное освобождение контекста может в действительности оказаться проблематичным из-за ленивого вычисления. Взгляните на следующий код:

```
IQueryable<Customer> GetCustomers (string prefix)
{
    using (var dbContext = new NutshellContext ())
        return dbContext.Customers
            .Where (c => c.Name.StartsWith (prefix));
}
...
foreach (Customer c in GetCustomers ("a"))
    Console.WriteLine (c.Name);
```

Такой код потерпит неудачу, потому что запрос вычисляется при его перечислении, которое происходит *после освобождения* связанного с ним экземпляра `DbContext`.

Тем не менее, ниже приведены некоторые предостережения, о которых следует помнить в случае, если контексты не освобождаются.

- Как правило, объект подключения должен освобождать все неуправляемые ресурсы в методе `Close`. В то время как это справедливо для класса `SqlConnection`, сторонние объекты подключений теоретически могут удерживать ресурсы открытыми, если метод `Close` вызывался, а метод `Dispose` — нет (хотя такой подход, вероятно, нарушит контракт, определенный методом `IDbConnection.Close`).

- Если вы вручную вызываете метод `GetEnumerator` на запросе (вместо применения оператора `foreach`) и затем забываете либо освободить перечислитель, либо воспользоваться последовательностью, то подключение останется открытым. Освобождение экземпляра `DbContext` предоставляет страховку для таких сценариев.
- Некоторые разработчики считают гораздо более аккуратным подходом освобождение контекстов (и всех объектов, которые реализуют интерфейс `IDisposable`).

Чтобы освободить контексты явно, потребуется передать экземпляр `DbContext` в методы вроде `GetCustomers` и избежать описанных выше проблем. В сценариях вроде ASP.NET Core MVC, где экземпляр контекста предоставляется через внедрение зависимостей (`dependency injection — DI`), временем жизни контекста будет управлять инфраструктура DI. Он будет создаваться, когда единица работы (такая как обработка HTTP-запроса в контроллере) начинается, и освобождаться, когда единица работы заканчивается.

Давайте посмотрим, что происходит, когда инфраструктура EF Core сталкивается со вторым запросом. Она начинает с отправки запроса базе данных и в ответ получает одиночную строку. Затем инфраструктура читает первичный ключ полученной строки и производит его поиск в кеше сущностей контекста. Обнаружив совпадение, она возвращает существующий объект *без обновления любых значений*. Таким образом, если другой пользователь только что обновил имя текущего заказчика в базе данных, то новое значение будет проигнорировано. Это важно для устранения нежелательных побочных эффектов (объект `Customer` может использоваться где-то в другом месте) и также для управления параллелизмом. Если вы изменили свойства объекта `Customer` и пока еще не вызвали метод `SaveChanges`, то определенно не хотите, чтобы данные были автоматически перезаписаны.



Отключить отслеживание объектов можно, присоединив к запросу расширяющий метод `AsNoTracking` или установив свойство `ChangeTracker.QueryTrackingBehavior` объекта контекста в `QueryTrackingBehavior.NoTracking`. Неотслеживаемые запросы удобны, когда данные используются только для чтения, т.к. они улучшают производительность и снижают потребление памяти.

Чтобы получить актуальную информацию из базы данных, потребуется либо создать новый экземпляр контекста, либо вызвать его метод `Reload`:

```
dbContext.Entry (myCustomer).Reload();
```

Рекомендуется применять свежий экземпляр `DbContext` на единицу работы, чтобы необходимость в ручной перезагрузке сущности возникала редко.

Отслеживание изменений

Когда вы изменяете значение свойства в сущности, загруженной через `DbContext`, инфраструктура EF Core распознает изменение и соответствующим

образом обновляет базу данных при вызове `SaveChanges`. Для этого она создает моментальный снимок состояния сущностей, загруженных посредством вашего подкласса `DbContext`, и сравнивает текущее состояние с первоначальным состоянием во время вызова метода `SaveChanges` (или, как вскоре будет показано, при ручном отслеживании изменений запросов). Вот как вы можете выполнить перечисление отслеженных изменений в `DbContext`:

```
foreach (var e in dbContext.ChangeTracker.Entries())
{
    Console.WriteLine($"{e.Entity.GetType().FullName} is {e.State}");
    foreach (var m in e.Members)
        Console.WriteLine(
            $" {m.Metadata.Name}: '{m.CurrentValue}' modified: {m.IsModified}");
}
```

В случае вызова метода `SaveChanges` инфраструктура EF Core использует информацию в `ChangeTracker` при построении SQL-операторов, которые будут обновлять базу данных для соответствия изменениям, внесенным в ваши объекты. Она выпускает операторы вставки для добавления новых строк, операторы обновления для модификации данных и операторы удаления для исключения строк, удаленных из объектного графа в подклассе `DbContext`. Принимаются во внимание любые экземпляры `TransactionScope`; если они отсутствуют, тогда все операторы помещаются в новую транзакцию.

Вы можете оптимизировать отслеживание изменений, реализовав в своих сущностных классах интерфейс `INotifyPropertyChanged` и дополнительно интерфейс `INotifyPropertyChanging`. Первый позволяет инфраструктуре EF Core избегать накладных расходов на сравнение модифицированных и первоначальных сущностей, а второй позволяет EF Core вообще не хранить первоначальные значения. После реализации упомянутых интерфейсов для активизации оптимизированного отслеживания изменений понадобится вызвать метод `HasChangeTrackingStrategy` на экземпляре `ModelBuilder` при конфигурировании модели.

Навигационные свойства

Навигационные свойства дают возможность выполнять следующие действия:

- запрашивать связанные таблицы без необходимости в ручном соединении;
- вставлять, удалять и обновлять связанные строки, не обновляя явно внешние ключи.

Например, предположим, что у заказчика может быть несколько покупок. Мы можем представить отношение “один ко многим” между `Customer` и `Purchase` с помощью таких сущностей:

```
public class Customer
{
    public int ID { get; set; }
    public string Name { get; set; }
    //Дочернее навигационное свойство, которое обязано иметь тип ICollection<T>;
    public virtual List<Purchase> Purchases { get; set; } = new List<Purchase>();
}
```

```

public class Purchase
{
    public int ID { get; set; }
    public DateTime Date { get; set; }
    public string Description { get; set; }
    public decimal Price { get; set; }
    public int CustomerID? { get; set; } // Поле внешнего ключа
    public Customer Customer { get; set; } // Родительское навигационное
                                            // свойство
}

```

На основе приведенных выше сущностей инфраструктура EF Core способна сделать вывод о том, что CustomerID является внешним ключом к таблице Customers, поскольку имя CustomerID следует популярному соглашению об именовании. Если бы мы запросили у инфраструктуры EF Core создание базы данных из таких сущностей, то она создала бы ограничение внешнего ключа между Purchase.CustomerID и Customer.ID.



Если инфраструктуре EF Core не удается вывести отношение, тогда вы можете сконфигурировать его явно в методе OnModelCreating:

```

modelBuilder.Entity<Purchase>()
    .HasOne (e => e.Customer)
    .WithMany (e => e.Purchases)
    .HasForeignKey (e => e.CustomerID);

```

После настройки этих навигационных свойств появляется возможность формулировать запросы вроде показанных ниже:

```
var customersWithPurchases = Customers.Where (c => c.Purchases.Any());
```

В главе 9 мы более подробно обсудим, как записывать запросы подобного рода.

Добавление и удаление сущностей из навигационных коллекций

Когда вы добавляете новые сущности к навигационному свойству типа коллекции, инфраструктура EF Core автоматически заполняет внешние ключи при вызове SaveChanges:

```

Customer cust = dbContext.Customers.Single (c => c.ID == 1);
Purchase p1 = new Purchase { Description="Bike", Price=500 };
Purchase p2 = new Purchase { Description="Tools", Price=100 };
cust.Purchases.Add (p1);
cust.Purchases.Add (p2);
dbContext.SaveChanges();

```

В настоящем примере инфраструктура EF Core автоматически записывает 1 в столбец CustomerID каждой новой строки с информацией о покупке и записывает идентификатор, генерируемый базой данных для каждой строки с информацией о покупке, в Purchase.ID.

Когда вы удаляете сущность из навигационного свойства типа коллекции и вызываете SaveChanges, инфраструктура EF Core либо очистит поле внешнего

ключа, либо удалит соответствующую строку из базы данных, что зависит от того, каким образом было сконфигурировано или выведено отношение. В нашем случае мы определили Purchase.CustomerID как целое число, допускающее null (с тем, чтобы можно было представлять покупки без заказчика, или денежные операции), поэтому удаление покупки у заказчика приведет к очистке ее поля внешнего ключа, а не к ее удалению из базы данных.

Загрузка навигационных свойств

Когда инфраструктура EF Core заполняет сущность, (по умолчанию) она не заполняет ее навигационные свойства:

```
using var dbContext = new NutshellContext();
var cust = dbContext.Customers.First();
Console.WriteLine (cust.Purchases.Count); // Всегда 0
```

Одно из решений предусматривает использование расширяющего метода `Include`, который инструктирует EF Core о необходимости энергичной загрузки навигационных свойств:

```
var cust = dbContext.Customers
    .Include (c => c.Purchases)
    .Where (c => c.ID == 2).First();
```

Другое решение связано с применением проецирования. Такой прием особенно удобен, если нужно работать только с некоторыми свойствами сущности, потому что он сокращает объем передаваемых данных:

```
var custInfo = dbContext.Customers
    .Where (c => c.ID == 2)
    .Select (c => new
    {
        Name = c.Name,
        Purchases = c.Purchases.Select (p => new { p.Description, p.Price })
    })
    .First();
```

Обе методики информируют инфраструктуру EF Core о том, какие данные требуются, так что они могут быть извлечены в одиночном запросе к базе данных. Также можно вручную инструктировать инфраструктуру EF Core относительно заполнения навигационного свойства по мере необходимости:

```
dbContext.Entry (cust).Collection (b => b.Purchases).Load();
// Коллекция cust.Purchases теперь заполнена.
```

Такой подход называется явной загрузкой. В отличие от предшествующих подходов он порождает дополнительное обращение к серверу базы данных.

Ленивая загрузка

Еще один подход к загрузке навигационных свойств называется ленивой загрузкой. Когда она включена, инфраструктура EF Core заполняет навигационные свойства по требованию, генерируя для каждого сущностного класса класс-посредник, который перехватывает попытки доступа к незагруженным навигационным свойствам. Чтобы это работало, каждое навигационное свойство должно

быть виртуальным, а класс, в котором оно определено, обязан быть наследуемым (не запечатанным). Кроме того, контекст не должен быть освобожден, когда происходит ленивая загрузка, чтобы можно было выполнить дополнительный запрос к базе данных.

Включить ленивую загрузку можно в методе `OnConfiguring` подкласса `DbContext`:

```
protected override void OnConfiguring (DbContextOptionsBuilder  
optionsBuilder)  
{  
    optionsBuilder  
    .UseLazyLoadingProxies ()  
    ...  
}
```

(Также понадобится добавить ссылку на NuGet-пакет `Microsoft.EntityFrameworkCore.Proxies`.)

За ленивую загрузку приходится расплачиваться тем, что инфраструктура EF Core обязана делать дополнительный запрос к базе данных при каждом обращении к незагруженному навигационному свойству. Если таких запросов много, тогда чрезмерные обращения к серверу могут привести к снижению производительности.



При включенной ленивой загрузке типом времени выполнения ваших классов будет класс-посредник, выведенный из сущностного класса; например:

```
using var dbContext = new NutshellContext ();  
var cust = dbContext.Customers.First();  
Console.WriteLine (cust.GetType());  
// Castle.Proxies.CustomerProxy
```

Отложенное выполнение

Запросы EF Core подчиняются отложенному выполнению в точности как локальные запросы. Это позволяет строить запросы постепенно. Тем не менее, существует один аспект, в котором инфраструктура EF Core поддерживает специальную семантику отложенного выполнения, и возникает он в ситуации, когда подзапрос находится внутри выражения `Select`.

В локальных запросах получается двойное отложенное выполнение, поскольку с функциональной точки зрения осуществляется выборка последовательности запросов. Таким образом, если перечислять внешнюю результирующую последовательность, но не перечислять внутренние последовательности, то подзапрос никогда не выполнится.

В EF Core подзапрос выполняется в то же самое время, когда выполняется главный внешний запрос. В итоге появляется возможность избежать излишних обращений к серверу.

Скажем, следующий запрос выполняется в одиночном обращении при достижении первого оператора `foreach`:

```

using var dbContext = new NutshellContext ();
var query = from c in dbContext.Customers
            select
                from p in c.Purchases
                select new { c.Name, p.Price };

foreach (var customerPurchaseResults in query)
    foreach (var namePrice in customerPurchaseResults)
        Console.WriteLine($"{namePrice.Name} spent {namePrice.Price}");

```

Любые навигационные свойства, которые спроектированы явно, полностью заполняются в единственном обращении к серверу:

```

var query = from c in dbContext.Customers
            select new { c.Name, c.Purchases };

foreach (var row in query)
    foreach (Purchase p in row.Purchases) // Дополнительные обращения
                                            // к серверу отсутствуют
        Console.WriteLine(row.Name + " spent " + p.Price);

```

Но если проводить перечисление навигационного свойства, предварительно не спроектировав или энергично не загрузив его, то будут применяться правила отложенного выполнения. В приведенном ниже примере инфраструктура EF Core выполняет еще один запрос свойства Purchases на каждой итерации цикла (предполагается, что ленивая загрузка включена):

```

foreach (Customer c in dbContext.Customers.ToArray())
    foreach (Purchase p in c.Purchases) // Еще одно обращение к серверу
        Console.WriteLine(c.Name + " spent " + p.Price);

```

Такая модель полезна, когда нужно выполнять внутренний цикл избирательно, основываясь на проверке, которая может быть сделана только на стороне клиента:

```

foreach (Customer c in context.Customers)
    if (myWebService.HasBadCreditHistory(c.ID))
        foreach (Purchase p in c.Purchases) // Еще одно обращение к серверу
            Console.WriteLine(...);

```



Обратите внимание на использование `ToArray` в предшествующих двух запросах. По умолчанию SQL Server не может инициировать новый запрос, пока обрабатываются результаты текущего запроса. Вызов `ToArray` материализует заказчиков, чтобы можно было выпустить дополнительные запросы с целью извлечения покупок для каждого заказчика. Имеется возможность сконфигурировать SQL Server для включения множества активных результирующих наборов (`multiple active result set — MARS`), дополнив строку подключения к базе данных конструкцией `;MultipleActiveResultSets=True`. Применяйте наборы MARS с осторожностью, т.к. они способны замаскировать многословное проектное решение базы данных, которое можно было бы улучшить за счет энергичной загрузки и/или проектирования требующихся данных.

(Подзапросы Select более детально исследуются в разделе “Выполнение проектирования” главы 9.)

Построение выражений запросов

Когда возникала необходимость в динамически сформированных запросах, ранее в главе мы условно соединяли в цепочки операции запросов. Хотя такой прием вполне адекватен для многих сценариев, иногда требуется работать на более детализированном уровне и динамически составлять лямбда-выражения, которые передаются операциям.

В настоящем разделе мы предполагаем, что класс Product определен так:

```
public class Product
{
    public int ID { get; set; }
    public string Description { get; set; }
    public bool Discontinued { get; set; }
    public DateTime LastSale { get; set; }
}
```

Сравнение делегатов и деревьев выражений

Вспомните, что:

- локальные запросы, которые используют операции Enumerable, принимают делегаты;
- интерпретируемые запросы, которые используют операции Queryable, принимают деревья выражений.

В этом легко убедиться, сравнив сигнатуры операции Where в классах Enumerable и Queryable:

```
public static IEnumerable<TSource> Where<TSource> (this
    IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, bool> predicate)
public static IQueryable<TSource> Where<TSource> (this
    IQueryable<TSource> source, Expression<Func<TSource, bool>> predicate)
```

Лямбда-выражение, внедренное в запрос, выглядит идентично вне зависимости от того, привязано оно к операциям класса Enumerable или к операциям класса Queryable:

```
IEnumerable<Product> q1 = localProducts.Where (p => !p.Discontinued);
IQueryable<Product> q2 = sqlProducts.Where (p => !p.Discontinued);
```

Однако в случае присваивания лямбда-выражения промежуточной переменной потребуется принять явное решение относительно ее преобразования в делегат (т.е. Func<>) или в дерево выражения (т.е. Expression<Func<>>). В следующем примере переменные predicate1 и predicate2 не являются взаимозаменяемыми:

```
Func <Product, bool> predicate1 = p => !p.Discontinued;
IEnumerable<Product> q1 = localProducts.Where (predicate1);

Expression <Func <Product, bool>> predicate2 = p => !p.Discontinued;
IQueryable<Product> q2 = sqlProducts.Where (predicate2);
```

Компиляция деревьев выражений

Дерево выражения можно преобразовать в делегат, вызвав метод `Compile`. Прием особенно полезен при написании методов, которые возвращают многократно применяемые выражения. В целях иллюстрации давайте добавим в класс `Product` статический метод, возвращающий предикат, который вычисляется в `true`, если товар не снят с производства и был продан на протяжении последних 30 дней:

```
public class Product
{
    public static Expression<Func<Product, bool>> IsSelling()
    {
        return p => !p.Discontinued && p.LastSale > DateTime.Now.AddDays (-30);
    }
}
```

Только что написанный метод можно использовать как в интерпретируемых, так и в локальных запросах:

```
void Test()
{
    var dbContext = new NutshellContext();
    Product[] localProducts = dbContext.Products.ToArray();

    IQueryable<Product> sqlQuery = dbContext.Products.Where(Product.IsSelling());
    IEnumerable<Product> localQuery =
        localProducts.Where (Product.IsSelling () .Compile ());
}
```



.NET не предоставляет API-интерфейса для преобразования в обратном направлении, т.е. из делегата в дерево выражения, что делает деревья выражений более универсальными.

Метод `AsQueryable`

Операция `AsQueryable` позволяет записывать целые запросы, которые могут запускаться в отношении локальных или удаленных последовательностей:

```
IQueryable<Product> FilterSortProducts (IQueryable<Product> input)
{
    return from p in input
           where ...
           order by ...
           select p;
}

void Test()
{
    var dbContext = new NutshellContext();
    Product[] localProducts = dbContext.Products.ToArray();
    var sqlQuery = FilterSortProducts (dbContext.Products);
    var localQuery = FilterSortProducts (localProducts.AsQueryable ());
    ...
}
```

Операция `AsQueryable` помещает локальную последовательность в оболочку `IQueryable<T>`, так что последующие операции запросов преобразуются в деревья выражений. Если позже выполнить перечисление результата, тогда деревья выражений неявно скомпилируются (за счет небольшого снижения производительности), и локальная последовательность будет перечисляться обычным образом.

Деревья выражений

Ранее уже упоминалось, что неявное преобразование из лямбда-выражения в класс `Expression<TDelegate>` заставляет компилятор C# генерировать код, который строит дерево выражения. Приложив небольшие усилия по программированию, то же самое можно сделать вручную во время выполнения — другими словами, динамически построить дерево выражения с нуля. Результат можно привести к типу `Expression<TDelegate>` и применять в запросах EF Core или скомпилировать в обычновенный делегат, вызвав метод `Compile`.

DOM-модель выражения

Дерево выражения — это миниатюрная кодовая DOM-модель. Каждый узел в дереве представлен типом из пространства имен `System.Linq.Expressions`, которые показаны на рис. 8.10.

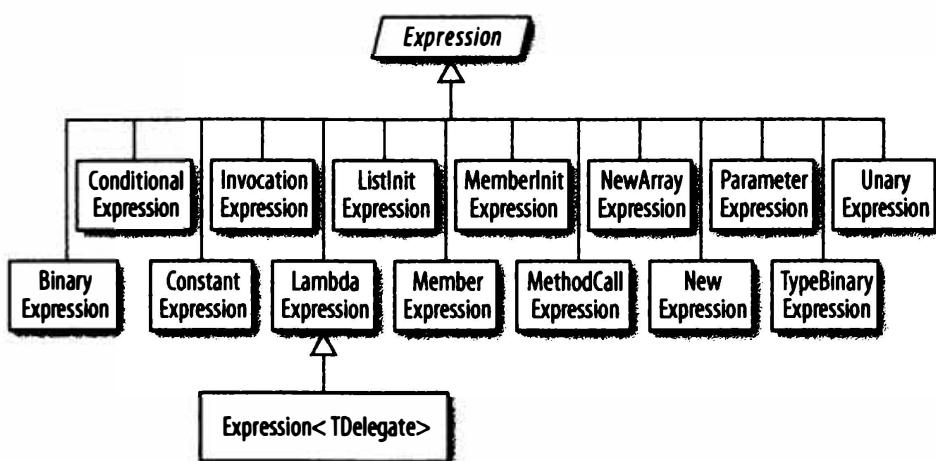


Рис. 8.10. Типы выражений

Базовым классом для всех узлов является (необщий) класс `Expression`. Обобщенный класс `Expression<TDelegate>` в действительности означает “типовизированное лямбда-выражение” и мог бы называться `LambdaExpression<TDelegate>`, если бы следующая запись не выглядела настолько неуклюжей:

```
LambdaExpression<Func<Customer, bool>> f = ...
```

Базовым типом `Expression<T>` является (необщий) класс `LambdaExpression`. Класс `LambdaExpression` обеспечивает унификацию типов для деревьев лямбда-выражений: любой типизированный экземпляр `Expression<T>` может быть приведен к типу `LambdaExpression`.

Отличие `LambdaExpression` от обычного класса `Expression` связано с тем, что лямбда-выражения имеют *параметры*.

Чтобы создать дерево выражения, не нужно создавать экземпляры типов узлов напрямую; взамен следует вызывать статические методы, предлагаемые классом `Expression`, такие как `Add`, `And`, `Call`, `Constant`, `LessThan` и т.д.

На рис. 8.11 представлено дерево выражения, которое создается в результате следующего присваивания:

```
Expression<Func<string, bool>> f = s => s.Length < 5;
```

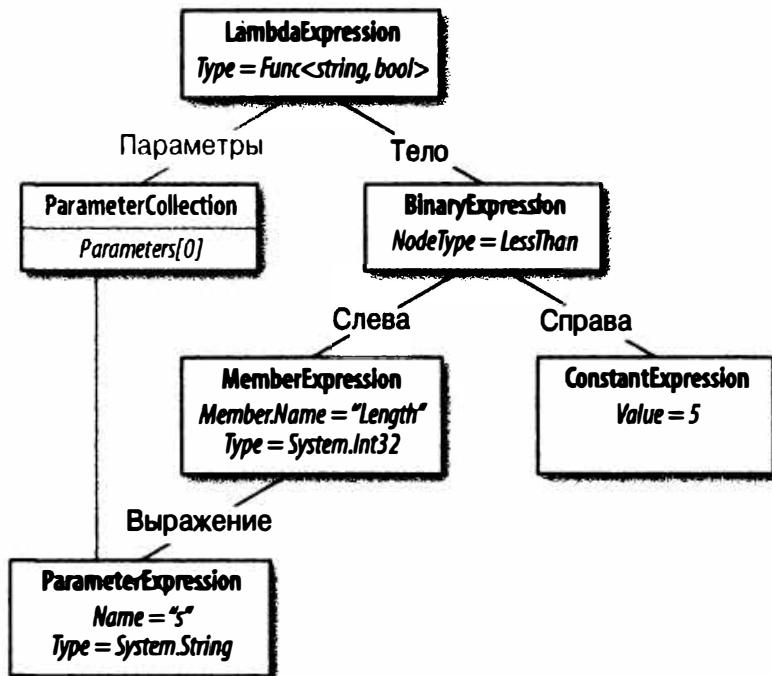


Рис. 8.11. Дерево выражения

Это можно продемонстрировать с помощью такого кода:

```
Console.WriteLine (f.Body.NodeType); // LessThan
Console.WriteLine (((BinaryExpression) f.Body).Right); // 5
```

Давайте теперь построим такое выражение с нуля. Принцип заключается в том, чтобы начать с нижней части дерева и работать, двигаясь вверх. В самой нижней части дерева находится экземпляр класса `ParameterExpression` — параметр лямбда-выражения по имени `s` типа `string`:

```
ParameterExpression p = Expression.Parameter (typeof (string), "s");
```

На следующем шаге строятся экземпляры классов `MemberExpression` и `ConstantExpression`. В первом случае необходимо получить доступ к *свойству Length* параметра `s`:

```
MemberExpression stringLength = Expression.Property (p, "Length");
ConstantExpression five = Expression.Constant (5);
```

Далее создается сравнение `LessThan` (меньше чем):

```
BinaryExpression comparison = Expression.LessThan (stringLength, five);
```

На финальном шаге конструируется лямбда-выражение, которое связывает свойство Body выражения с коллекцией параметров:

```
Expression<Func<string, bool>> lambda  
= Expression.Lambda<Func<string, bool>> (comparison, p);
```

Удобный способ тестирования построенного лямбда-выражения предусматривает его компиляцию в делегат:

```
Func<string, bool> runnable = lambda.Compile();  
Console.WriteLine (runnable ("kangaroo")); // False  
Console.WriteLine (runnable ("dog")); // True
```



Выяснить тип выражения, который должен использоваться, проще всего, просмотрев существующее лямбда-выражение в отладчике Visual Studio.

Дополнительные рассуждения по данной теме можно найти по адресу <http://www.albahari.com/expressions/>.



Операции LINQ

В настоящей главе подробно описаны все операции запросов LINQ. Для справочных целей в разделах “Выполнение проецирования” и “Выполнение соединения” далее в главе раскрывается несколько концептуально важных областей:

- проецирование иерархий объектов;
- соединение с помощью Select, SelectMany, Join и GroupJoin;
- выражения запросов с множеством переменных диапазона.

Во всех примерах главы предполагается, что массив names определен следующим образом:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };
```

В примерах, где запрашивается база данных, переменная dbContext создается так, как показано ниже:

```
var dbContext = new NutshellContext();
```

А вот определение класса NutshellContext:

```
public class NutshellContext : DbContext
{
    public DbSet<Customer> Customers { get; set; }
    public DbSet<Purchase> Purchases { get; set; }

    protected override void OnModelCreating(ModelBuilder modelBuilder)
    {
        modelBuilder.Entity<Customer>(entity =>
        {
            entity.ToTable("Customer");
            entity.Property(e => e.Name).IsRequired(); // Столбец не допускает
                                                       // значение null
        });
        modelBuilder.Entity<Purchase>(entity =>
        {
            entity.ToTable("Purchase");
            entity.Property(e => e.Date).IsRequired();
            entity.Property(e => e.Description).IsRequired();
        });
    }
}
```

```

public class Customer
{
    public int ID { get; set; }
    public string Name { get; set; }
    public virtual List<Purchase> Purchases { get; set; }
        = new List<Purchase>();
}
public class Purchase
{
    public int ID { get; set; }
    public int? CustomerID { get; set; }
    public DateTime Date { get; set; }
    public string Description { get; set; }
    public decimal Price { get; set; }
    public virtual Customer Customer { get; set; }
}

```



Все примеры, которые рассматриваются в главе, предварительно загружены в LINQPad вместе с примером базы данных, имеющей подходящую схему. Загрузить LINQPad можно на веб-сайте <http://www.linqpad.net>.

Ниже приведены соответствующие определения таблиц SQL Server:

```

CREATE TABLE Customer (
    ID int NOT NULL IDENTITY PRIMARY KEY,
    Name nvarchar(30) NOT NULL
)

CREATE TABLE Purchase (
    ID int NOT NULL IDENTITY PRIMARY KEY,
    CustomerID int NOT NULL REFERENCES Customer(ID),
    Date datetime NOT NULL,
    Description nvarchar(30) NOT NULL,
    Price decimal NOT NULL
)

```

Обзор

В этом разделе будет представлен обзор стандартных операций запросов, которые делятся на три категории:

- последовательность на входе, последовательность на выходе (последовательность → последовательность);
- последовательность на входе, одиничный элемент или скалярное значение на выходе (последовательность → элемент или значение);
- ничего на входе, последовательность на выходе (ничего → последовательность), т.е. методы генерации.

Сначала мы рассмотрим каждую из трех категорий и укажем, какие операции запросов она включает, а затем перейдем к детальному описанию индивидуальных операций.

Последовательность → последовательность

В данную категорию попадает большинство операций запросов — они принимают одну или более последовательностей на входе и выпускают одиночную выходную последовательность. На рис. 9.1 показаны операции, которые реструктурируют форму последовательностей.

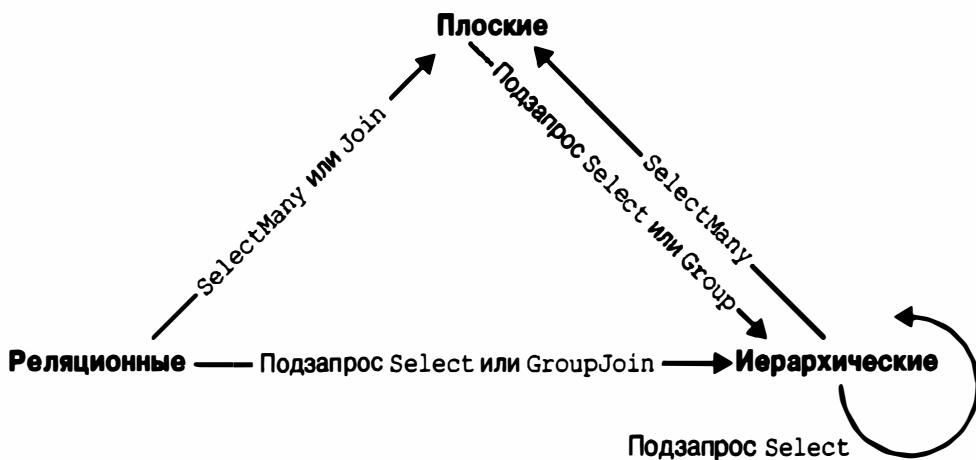


Рис. 9.1. Операции, изменяющие форму последовательностей

Фильтрация

`IEnumerable<TSource> → IEnumerable<TSource>`

Возвращает подмножество исходных элементов:

`Where, Take, TakeLast, TakeWhile, Skip, SkipLast, SkipWhile, Distinct, DistinctBy`

Проектирование

`IEnumerable<TSource> → IEnumerable<TResult>`

Трансформирует каждый элемент с помощью лямбда-функции. Операция `SelectMany` выравнивает вложенные последовательности; операции `Select` и `SelectMany` выполняют внутренние соединения, левые внешние соединения, перекрестные соединения и неэквисоединения с помощью EF Core:

`Select, SelectMany`

Соединение

`IEnumerable<TOuter>, IEnumerable<TInner> → IEnumerable<TResult>`

Объединяет элементы одной последовательности с элементами другой. Операции `Join` и `GroupJoin` спроектированы для эффективной работы с локальными запросами и поддерживают внутренние и левые внешние соединения. Операция `Zip` перечисляет две последовательности за раз, применяя функцию к каждой паре элементов. Вместо имен `TOuter` и `TInner` для аргументов типов в операции `Zip` используются имена `TFirst` и `TSecond`:

`IEnumerable<TFirst>, IEnumerable<TSecond> → IEnumerable<TResult>`
`Join, GroupJoin, Zip`

Упорядочение

`IEnumerable<TSource> → IOrderedEnumerable<TSource>`

Возвращает переупорядоченную последовательность:

`OrderBy, ThenBy, Reverse`

Группирование

`IEnumerable<TSource> → IEnumerable<IGrouping<TSource, TElement>>`

`IEnumerable<TSource> → IEnumerable<TElement[]>`

Группирует последовательность в подпоследовательности:

`GroupBy, Chunk`

Операции над множествами

`IEnumerable<TSource>, IEnumerable<TSource> → IEnumerable<TSource>`

Принимает две последовательности одного и того же типа и возвращает их общность, сумму или разницу:

`Concat, Union, UnionBy, Intersect, IntersectBy, Except, ExceptBy`

Методы преобразования: импортование

`IEnumerable → IEnumerable<TResult>`

`OfType, Cast`

Методы преобразования: экспортование

`IEnumerable<TSource> → массив, список, словарь, объект Lookup или последовательность:`

`ToArray, ToList, ToDictionary, ToLookup, AsEnumerable, AsQueryable`

Последовательность → элемент или значение

Описанные ниже операции запросов принимают входную последовательность и выдают одиночный элемент или значение.

Операции над элементами

`IEnumerable<TSource> → TSource`

Выбирает одиночный элемент из последовательности:

`First, FirstOrDefault, Last, LastOrDefault, Single, SingleOrDefault, ElementAt, ElementAtOrDefault, MinBy, MaxBy, DefaultIfEmpty`

Методы агрегирования

`IEnumerable<TSource> → скалярное значение`

Выполняет вычисление над последовательностью, возвращая скалярное значение (обычно число):

`Aggregate, Average, Count, LongCount, Sum, Max, Min`

Квантификаторы

IEnumerable<TSource> → значение bool

Агрегация, возвращающая true или false:

All, Any, Contains, SequenceEqual

Ничего → последовательность

К третьей (и последней) категории относятся операции, которые строят выходную последовательность с нуля.

Методы генерации

Ничего → IEnumerable<TResult>

Производит простую последовательность:

Empty, Range, Repeat

Выполнение фильтрации

IEnumerable<TSource> → IEnumerable<TSource>

Метод	Описание	Эквиваленты в SQL
Where	Возвращает подмножество элементов, удовлетворяющих заданному условию	WHERE
Take	Возвращает первые count элементов и отбрасывает остальные	WHERE ROW_NUMBER()... или подзапрос TOP n
Skip	Пропускает первые count элементов и возвращает остальные	WHERE ROW_NUMBER()... или NOT IN (SELECT TOP n...)
TakeLast	Возвращает только последние count элементов	Генерируется исключение
SkipLast	Пропускает последние count элементов	Генерируется исключение
TakeWhile	Выдает элементы из входной последовательности до тех пор, пока предикат не станет равным false	Генерируется исключение
SkipWhile	Пропускает элементы из входной последовательности до тех пор, пока предикат не станет равным false, после чего возвращает остальные элементы	Генерируется исключение
Distinct, DistinctBy	Возвращает последовательность, из которой исключены дубликаты	SELECT DISTINCT...



Информация в колонке “Эквиваленты в SQL” справочных таблиц в настоящей главе не обязательно соответствует тому, что будет производить реализация интерфейса `IQueryable`, такая как EF Core. Взамен в ней показано то, что обычно применяется для выполнения той же работы при написании SQL-запроса вручную. Если отсутствует простая трансляция, тогда ячейка в этой колонке остается пустой. Если же никакой трансляции вообще нет, то указывается примечание “Генерируется исключение”. Код реализации в `Enumerable`, когда он приводится, не включает проверку на предмет `null` для аргументов и предикатов индексации.

Каждый метод фильтрации всегда выдает либо такое же, либо меньшее количество элементов по сравнению с начальным их числом. Получить большее количество элементов невозможно! Кроме того, на выходе получаются идентичные элементы; они никак не трансформируются.

Where

Аргумент	Тип
Исходная последовательность	<code>IEnumerable<TSource></code>
Предикат	<code>TSource => bool</code> или <code>(TSource, int) => bool</code> *

* Запрещено в LINQ to SQL и Entity Framework.

Синтаксис запросов

`where выражение-bool`

Реализация в `Enumerable`

Если оставить в стороне проверки на равенство `null`, то внутренняя реализация операции `Enumerable.Where` функционально эквивалентна следующему коду:

```
public static IEnumerable<TSource> Where<TSource>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func <TSource, bool> predicate)
{
    foreach (TSource element in source)
        if (predicate (element))
            yield return element;
}
```

Обзор

Операция `Where` возвращает элементы входной последовательности, которые удовлетворяют заданному предикату. Например:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };
IEnumerable<string> query = names.Where (name => name.EndsWith ("y"));
// Harry
// Mary
// Jay
```

Или в синтаксисе запросов:

```
 IEnumerable<string> query = from n in names  
                               where n.EndsWith ("y")  
                               select n;
```

Конструкция `where` может встречаться в запросе более одного раза, перемежаясь с конструкциями `let`, `orderby` и `join`:

```
 from n in names  
 where n.Length > 3  
 let u = n.ToUpper()  
 where u.EndsWith ("Y")  
 select u;  
  
 // HARRY  
 // MARY
```

К таким запросам применяются стандартные правила области видимости C#. Другими словами, на переменную нельзя ссылаться до ее объявления с помощью переменной диапазона или конструкции `let`.

Индексированная фильтрация

Предикат операции `Where` дополнительно принимает второй аргумент типа `int`. В него помещается позиция каждого элемента внутри входной последовательности, позволяя предикату использовать эту информацию в своем решении по фильтрации. Например, следующий запрос обеспечивает пропуск каждого второго элемента:

```
 IEnumerable<string> query = names.Where ((n, i) => i % 2 == 0);  
  
 // Tom  
 // Harry  
 // Jay
```

Попытка применения индексированной фильтрации в EF Core приводит к генерации исключения.

Сравнения с помощью SQL-операции `LIKE` в EF Core

Следующие методы, выполняемые на типе `string`, транслируются в SQL-операцию `LIKE`:

`Contains`, `StartsWith`, `EndsWith`

Например, `c.Name.Contains ("abc")` транслируется в конструкцию `customer.Name LIKE '%abc%'` (точнее, в ее параметризованную версию).

Метод `Contains` позволяет сравнивать только с локально вычисляемым выражением; для сравнения с другим столбцом придется использовать метод `EF.Functions.Like`:

```
 ... where EF.Functions.Like (c.Description, "%" + c.Name + "%")
```

Метод `EF.Functions.Like` также позволяет выполнять более сложные сравнения (скажем, `LIKE 'abc%def%`).

Строковые сравнения < и > в EF Core

С помощью метода CompareTo типа string можно выполнять сравнение порядка для строк; он отображается на SQL-операции < и >:

```
dbContext.Purchases.Where (p => p.Description.CompareTo ("C") < 0)
```

WHERE x IN (... , ... , ...) в EF Core

В EF Core операцию Contains можно применять к локальной коллекции внутри предиката фильтра. Например:

```
string[] chosenOnes = { "Tom", "Jay" };
from c in dbContext.Customers
where chosenOnes.Contains (c.Name)
...
```

Это отображается на SQL-операцию IN, т.е.:

```
WHERE customer.Name IN ("Tom", "Jay")
```

Если локальная коллекция является массивом сущностей или элементов нескалярных типов, то EF Core может взамен выпустить конструкцию EXISTS.

Take, TakeLast, Skip, SkipLast

Аргумент	Тип
Исходная последовательность	IEnumerable<TSource>
Количество элементов, которые необходимо выдать или пропустить	int

Операция Take выдает первые *n* элементов и отбрасывает остальные; операция Skip отбрасывает первые *n* элементов и выдает остальные. Эти два метода удобно применять вместе при реализации веб-страницы, позволяющей пользователю перемещаться по крупному набору записей. Например, пусть пользователь выполняет поиск в базе данных книг термина “mercury” (ртуть) и получает 100 совпадений. Приведенный ниже запрос возвращает первые 20 найденных книг:

```
IQueryable<Book> query = dbContext.Books
    .Where (b => b.Title.Contains ("mercury"))
    .OrderBy (b => b.Title)
    .Take (20);
```

Следующий запрос возвращает книги с 21-й по 40-ю:

```
IQueryable<Book> query = dbContext.Books
    .Where (b => b.Title.Contains ("mercury"))
    .OrderBy (b => b.Title)
    .Skip (20).Take (20);
```

Инфраструктура EF Core транслирует операции Take и Skip в функцию ROW_NUMBER для SQL Server 2005 и последующих версий или в подзапрос TOP для предшествующих версий SQL Server.

Методы `TakeLast` и `SkipLast` возвращают или пропускают последние n элементов.

Начиная с версии .NET 6, метод `Take` перегружен для приема переменной типа `Range`. Эта перегруженная версия может включать в себя функциональность всех четырех методов; например, вызов `Take(5..)` эквивалентен `Skip(5)`, а вызов `Take(..^5)` эквивалентен `SkipLast(5)`.

TakeWhile и SkipWhile

Аргумент	Тип
Исходная последовательность	<code>IEnumerable<TSource></code>
Предикат	<code>TSource => bool</code> или <code>(TSource, int) => bool</code>

Операция `TakeWhile` выполняет перечисление входной последовательности, выдавая элементы до тех пор, пока заданный предикат не станет равным `false`. Оставшиеся элементы игнорируются:

```
int[] numbers      = { 3, 5, 2, 234, 4, 1 };
var takeWhileSmall = numbers.TakeWhile (n => n < 100); // { 3, 5, 2 }
```

Операция `SkipWhile` выполняет перечисление входной последовательности, пропуская элементы до тех пор, пока заданный предикат не станет равным `false`. Оставшиеся элементы выдаются:

```
int[] numbers      = { 3, 5, 2, 234, 4, 1 };
var skipWhileSmall = numbers.SkipWhile (n => n < 100); // { 234, 4, 1 }
```

Операции `TakeWhile` и `SkipWhile` не транслируются в SQL и приводят к генерации исключения, когда присутствуют в запросе EF Core.

Distinct и DistinctBy

Операция `Distinct` возвращает входную последовательность, из которой удалены дубликаты. Дополнительно можно передавать специальный компаратор эквивалентности. Следующий запрос возвращает отличающиеся буквы в строке:

```
char[] distinctLetters = "HelloWorld".Distinct().ToArray();
string s = new string (distinctLetters);           // HeloWrld
```

Методы LINQ можно вызывать прямо на строке, т.к. тип `string` реализует интерфейс `IEnumerable<char>`.

Метод `DistinctBy`, появившийся в версии .NET 6, позволяет указывать селектор ключей для применения перед выполнением сравнения эквивалентности. Результатом следующего выражения будет `{1, 2, 3}`:

```
new[] { 1.0, 1.1, 2.0, 2.1, 3.0, 3.1 }.DistinctBy (n => Math.Round (n, 0))
```

Выполнение проецирования

`IEnumerable<TSource> → IEnumerable<TResult>`

Метод	Описание	Эквиваленты в SQL
Select	Трансформирует каждый входной элемент с помощью заданного лямбда-выражения	SELECT
SelectMany	Трансформирует каждый входной элемент, а затем выравнивает и объединяет результирующие подпоследовательности	INNER JOIN, LEFT OUTER JOIN, CROSS JOIN



При запрашивании базы данных операции Select и SelectMany являются наиболее универсальными конструкциями соединения; для локальных запросов операции Join и GroupJoin будут самыми эффективными конструкциями соединения.

Select

Аргумент	Тип
Исходная последовательность	<code>IEnumerable<TSource></code>
Селектор результатов	<code>TSource => TResult</code> или <code>(TSource, int) => TResult</code> *

* Запрещено в EF Core.

Синтаксис запросов

`select выражение-проекции`

Реализация в Enumerable

```
public static IEnumerable<TResult> Select<TSource, TResult>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, TResult> selector)
{
    foreach (TSource element in source)
        yield return selector (element);
}
```

Обзор

Посредством операции Select вы всегда получаете то же самое количество элементов, с которого начинали. Однако с помощью лямбда-функции каждый элемент может быть трансформирован произвольным образом.

Следующий запрос выбирает имена всех шрифтов, установленных на компьютере (через свойство `FontFamily.Families` из пространства имен `System.Drawing`):

```
IEnumerable<string> query = from f in FontFamily.Families
                                select f.Name;

foreach (string name in query) Console.WriteLine (name);
```

В этом примере конструкция `select` преобразует объект `FontFamily` в его имя. Ниже приведен эквивалент в виде лямбда-функции:

```
IEnumerable<string> query = FontFamily.Families.Select (f => f.Name);
```

Конструкции `Select` часто используются для проецирования в анонимные типы:

```
var query =
    from f in FontFamily.Families
    select new { f.Name, LineSpacing = f.GetLineSpacing (FontStyle.Bold) };
```

Проектирование без трансформации иногда применяется в синтаксисе запросов с целью удовлетворения требования о том, что запрос должен заканчиваться конструкцией `select` или `group`. Следующий запрос извлекает шрифты, поддерживающие зачеркивание:

```
IEnumerable<FontFamily> query =
    from f in FontFamily.Families
    where f.IsStyleAvailable (FontStyle.Strikeout)
    select f;
foreach (FontFamily ff in query) Console.WriteLine (ff.Name);
```

В таких случаях при переводе в текущий синтаксис компилятор опускает проектирование.

Индексированное проектирование

Выражение селектора может дополнительно принимать целочисленный аргумент, который действует в качестве индексатора, предоставляя выражение с позицией каждого элемента во входной последовательности. Прием работает только с локальными запросами:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };
IQueryable<string> query = names
    .Select ((s,i) => i + "=" + s); // { "0=Tom", "1=Dick", ... }
```

Подзапросы `Select` и иерархии объектов

Для построения иерархии объектов подзапрос можно вкладывать внутрь конструкции `select`. В следующем примере возвращается коллекция, которая описывает каждый каталог в `Path.GetTempPath()`, с внутренней коллекцией файлов, хранящихся в каждом каталоге:

```
string tempPath = Path.GetTempPath();
DirectoryInfo[] dirs = new DirectoryInfo (tempPath).GetDirectories();
var query =
    from d in dirs
    where (d.Attributes & FileAttributes.System) == 0
    select new
    {
       DirectoryName = d.FullName,
        Created = d.CreationTime,
        Files = from f in d.GetFiles()
                where (f.Attributes & FileAttributes.Hidden) == 0
                select new { FileName = f.Name, f.Length, }
    };
};
```

```
foreach (var dirFiles in query)
{
    Console.WriteLine ("Directory: " + dirFiles.DirectoryName);
    foreach (var file in dirFiles.Files)
        Console.WriteLine (" " + file.FileName + " Len: " + file.Length);
}
```

Внутреннюю часть запроса можно назвать *коррелированным подзапросом*. Подзапрос является коррелированным, если он ссылается на объект во внешнем запросе; в данном случае это `d` — каталог, содержимое которого перечисляется.



Подзапрос внутри `Select` позволяет отображать одну иерархию объектов на другую или отображать реляционную объектную модель на иерархическую объектную модель.

В локальных запросах подзапрос внутри `Select` приводит к дважды отложеному выполнению. В приведенном выше примере файлы не будут фильтроваться или проецироваться до тех пор, пока внутренний цикл `foreach` не начнет перечисление.

Подзапросы и соединения в EF Core

Проекции подзапросов эффективно функционируют в EF Core и могут использоваться для выполнения работы соединений в стиле SQL. Ниже показано, как извлечь для каждого заказчика имя и его долгостоящие покупки:

```
var query =
    from c in dbContext.Customers
    select new {
        c.Name,
        Purchases = (from p in dbContext.Purchases
                     where p.CustomerID == c.ID && p.Price > 1000
                     select new { p.Description, p.Price })
                    .ToList()
    };
foreach (var namePurchases in query)
{
    Console.WriteLine ("Customer: " + namePurchases.Name);
    foreach (var purchaseDetail in namePurchases.Purchases)
        Console.WriteLine (" - $$$: " + purchaseDetail.Price);
}
```



Обратите внимание на использование `ToList` в подзапросе. Инфраструктура EF Core 3 не может создавать реализации `IQueryable` из результата подзапроса, когда этот подзапрос ссылается на `DbContext`. Проблема отслеживается командой разработчиков EF Core и в будущем выпуске может быть решена.



Такой стиль запроса идеально подходит для интерпретируемых запросов. Внешний запрос и подзапрос обрабатываются как единое целое, что позволяет предотвратить излишние обращения к серверу. Однако в случае локальных запросов это неэффективно, т.к. для получения нескольких соответствующих комбинаций потребуется выполнить перечисление каждой комбинации внешнего и внутреннего элементов. Более удачное решение для локальных запросов обеспечивают операции Join и GroupJoin, которые описаны в последующих разделах.

Приведенный выше запрос сопоставляет объекты из двух разных коллекций, и его можно считать “соединением”. Отличие между ним и обычным соединением базы данных (или подзапросом) заключается в том, что вывод не выравнивается в одиничный двумерный результирующий набор. Мы отображаем реляционные данные на иерархические, а не на плоские данные.

Вот как выглядит тот же самый запрос, упрощенный за счет применения навигационного свойства Purchases типа коллекции из сущностного класса Customer:

```
from c in dbContext.Customers
select new
{
    c.Name,
    Purchases = from p in c.Purchases           // Purchases имеет
                                                       // тип List<Purchase>
        where p.Price > 1000
        select new { p.Description, p.Price }
};
```

(При выполнении подзапроса с навигационным свойством в EF Core 3 вызов `ToList` не требуется.)

Оба запроса аналогичны левому внешнему соединению в SQL в том смысле, что при внешнем перечислении мы получаем всех заказчиков независимо от того, связаны с ними какие-либо покупки. Для эмуляции внутреннего соединения, посредством которого исключаются заказчики, не совершившие дорогостоящих покупок, необходимо добавить к коллекции покупок условие фильтрации:

```
from c in dbContext.Customers
where c.Purchases.Any (p => p.Price > 1000)
select new {
    c.Name,
    Purchases = from p in c.Purchases
        where p.Price > 1000
        select new { p.Description, p.Price }
};
```

Запрос выглядит слегка неаккуратно из-за того, что один и тот же предикат (`Price > 1000`) записан дважды. Избежать подобного дублирования можно посредством конструкции `let`:

```
from c in dbContext.Customers
let highValueP = from p in c.Purchases
    where p.Price > 1000
    select new { p.Description, p.Price }
where highValueP.Any()
select new { c.Name, Purchases = highValueP };
```

Представленный стиль запроса отличается определенной гибкостью. Например, изменив Any на Count, мы можем модифицировать запрос с целью извлечения только заказчиков, совершивших, по меньшей мере, две дорогостоящие покупки:

```
...
where highValueP.Count() >= 2
select new { c.Name, Purchases = highValueP };
```

Проектирование в конкретные типы

В приводимых до сих пор примерах мы создавали экземпляры анонимных типов в выходных данных. Кроме того, иногда удобно создавать экземпляры (обыкновенных) именованных классов, которые заполняются с помощью инициализаторов объектов. Такие классы могут включать специальную логику и передаваться между методами и сборками без использования информации о типах.

Типичным примером является специальная бизнес-сущность. Специальная бизнес-сущность — это просто разрабатываемый вами класс, который содержит ряд свойств, но спроектирован для скрытия низкоуровневых деталей (касающихся базы данных). Скажем, из классов бизнес-сущностей могут быть исключены поля внешних ключей. Предполагая, что специальные сущностные классы CustomerEntity и PurchaseEntity уже написаны, ниже показано, как можно было бы выполнить проектирование в них:

```
IQueryable<CustomerEntity> query =
    from c in dbContext.Customers
    select new CustomerEntity
    {
        Name = c.Name,
        Purchases =
            (from p in c.Purchases
            where p.Price > 1000
            select new PurchaseEntity {
                Description = p.Description,
                Value = p.Price
            })
        .ToList()
    };
// Обеспечить выполнение запроса, преобразовав вывод в более удобный список:
List<CustomerEntity> result = query.ToList();
```



Когда классы специальных бизнес-сущностей создаются для передачи данных между слоями в программе или между отдельными системами, они часто называются объектами передачи данных (data transfer object — DTO). Объекты передачи данных не содержат бизнес-логику.

Обратите внимание, что до сих пор мы не обязаны были применять операции Join или SelectMany. Причина в том, что мы поддерживали иерархическую форму данных, как показано на рис. 9.2. В LINQ часто удается избежать традиционного подхода SQL, при котором таблицы выравниваются в двухмерный результирующий набор.

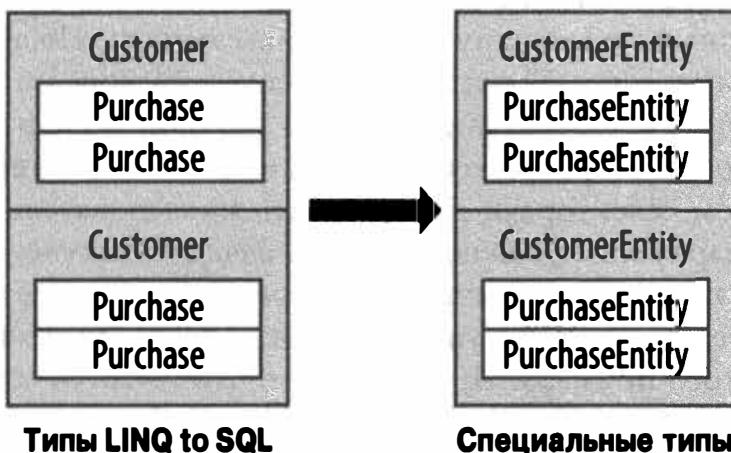


Рис. 9.2. Проектирование иерархии объектов

SelectMany

Аргумент	Тип
Исходная последовательность	IEnumerable<TSource>
Селектор результатов	TSource => IEnumerable<TResult> или (TSource, int) => IEnumerable<TResult> *

* Запрещено в EF Core.

Синтаксис запросов

```
from идентификатор1 in перечислимое-выражение1
from идентификатор2 in перечислимое-выражение2
...

```

Реализация в Enumerable

```
public static IEnumerable<TResult> SelectMany<TSource, TResult>
    (IEnumerable<TSource> source,
     Func <TSource, IEnumerable<TResult>> selector)
{
    foreach (TSource element in source)
        foreach (TResult subElement in selector (element))
            yield return subElement;
}
```

Обзор

Операция SelectMany объединяет подпоследовательности в единую выходную последовательность.

Вспомните, что для каждого входного элемента операция Select выдает в точности один выходной элемент. Напротив, операция SelectMany выдает 0..n выходных элементов. Элементы 0..n берутся из подпоследовательности или до-черней последовательности, которую должно выпускать лямбда-выражение.

Операция SelectMany может использоваться для расширения дочерних последовательностей, выравнивания вложенных последовательностей и соединения двух коллекций в плоскую выходную последовательность. По аналогии с конвейерными лентами операция SelectMany помещает свежий материал на конвейерную ленту. Благодаря SelectMany каждый входной элемент является спусковым механизмом для подачи свежего материала. Свежий материал выпускается лямбда-выражением селектора и должен быть последовательностью. Другими словами, лямбда-выражение должно выдавать *дочернюю последовательность* для каждого входного элемента. Окончательным результатом будет объединение дочерних последовательностей, выпущенных для всех входных элементов.

Начнем с простого примера. Предположим, что имеется массив имен следующего вида:

```
string[] fullNames = { "Anne Williams", "John Fred Smith", "Sue Green" };
```

который необходимо преобразовать в одиночную плоскую коллекцию слов:

```
"Anne", "Williams", "John", "Fred", "Smith", "Sue", "Green"
```

Для решения задачи идеально подходит операция SelectMany, т.к. мы сопоставляем каждый входной элемент с переменным количеством выходных элементов. Все, что потребуется сделать — построить выражение селектора, которое преобразует каждый входной элемент в дочернюю последовательность. Для этого используется метод string.Split, который берет строку и разбивает ее на слова, выпуская результат в виде массива:

```
string testInputElement = "Anne Williams";
string[] childSequence = testInputElement.Split();
// childSequence содержит { "Anne", "Williams" };
```

Итак, ниже приведен запрос SelectMany и результат:

```
IEnumerable<string> query = fullNames.SelectMany (name => name.Split());
foreach (string name in query)
    Console.Write (name + "|"); // Anne|Williams|John|Fred|Smith|Sue|Green|
```



Если заменить SelectMany операцией Select, то будет получен тот же самый результат, но в иерархической форме. Следующий запрос выдает последовательность строковых массивов, которая для своего перечисления требует вложенных операторов foreach:

```
IEnumerable<string[]> query =
    fullNames.Select (name => name.Split());
foreach (string[] stringArray in query)
    foreach (string name in stringArray)
        Console.Write (name + "|");
```

Преимущество SelectMany в том, что выдается одиночная *плоская* результирующая последовательность.

Операция `SelectMany` поддерживается в синтаксисе запросов и вызывается с помощью *дополнительного генератора* — другими словами, дополнительной конструкции `from` в запросе. В синтаксисе запросов ключевое слово `from` исполняет две разных роли. В начале запроса оно вводит исходную переменную диапазона и входную последовательность. В *любом другом месте* запроса оно транслируется в операцию `SelectMany`. Ниже показан наш запрос, представленный в синтаксисе запросов:

```
IEnumerable<string> query =  
    from fullName in fullNames  
    from name in fullName.Split() // Транслируется в операцию SelectMany  
    select name;
```

Обратите внимание, что дополнительный генератор вводит новую переменную диапазона — в данном случае `name`. Тем не менее, старая переменная диапазона остается в области видимости, и мы можем работать с обеими переменными.

Множество переменных диапазона

В предыдущем примере переменные `name` и `fullName` остаются в области видимости до тех пор, пока не завершится запрос или не будет достигнута конструкция `into`. Расширенная область видимости упомянутых переменных представляет собой сценарий, в котором синтаксис запросов выигрывает у текущего синтаксиса.

Чтобы проиллюстрировать сказанное, мы можем взять предыдущий пример и включить `fullName` в финальную проекцию:

```
IEnumerable<string> query =  
    from fullName in fullNames  
    from name in fullName.Split()  
    select name + " came from " + fullName;  
  
// Anne came from Anne Williams  
// Williams came from Anne Williams  
// John came from John Fred Smith  
// ...
```

“За кулисами” компилятор должен предпринять ряд трюков, чтобы обеспечить доступ к обеим переменным. Хороший способ оценить ситуацию — попытаться написать тот же запрос в текущем синтаксисе. Это сложно! Задача еще более усложнится, если перед проецированием поместить конструкцию `where` или `orderby`:

```
from fullName in fullNames  
from name in fullName.Split()  
orderby fullName, name  
select name + " came from " + fullName;
```

Проблема в том, что операция `SelectMany` выдает плоскую последовательность дочерних элементов — в данном случае плоскую коллекцию слов. Исходный “внешний” элемент, из которого она поступает (`fullName`), утерян. Решение заключается в том, чтобы “передавать” внешний элемент с каждым дочерним элементом во временном анонимном типе:

```
from fullName in fullNames
from x in fullName.Split().Select (name => new { name, fullName } )
orderby x.fullName, x.name
select x.name + " came from " + x.fullName;
```

Единственное изменение здесь заключается в том, что каждый дочерний элемент (name) помещается в оболочку анонимного типа, который также содержит его fullName. Это похоже на то, как распознается конструкция let. Ниже показано финальное преобразование в текущий синтаксис:

```
IEnumerable<string> query = fullNames
    .SelectMany (fName => fName.Split()
                    .Select (name => new { name, fName } ))
    .OrderBy (x => x.fName)
    .ThenBy (x => x.name)
    .Select (x => x.name + " came from " + x.fName);
```

Мышление в терминах синтаксиса запросов

Как мы только что продемонстрировали, существуют веские причины применять синтаксис запросов, когда нужно работать с несколькими переменными диапазона. В таких случаях полезно не только использовать этот синтаксис, но также и думать непосредственно в его терминах.

При написании дополнительных генераторов применяются два базовых шаблона. Первый из них — *расширение и выравнивание подпоследовательностей*. Для этого в дополнительном генераторе производится обращение к свойству или методу с существующей переменной диапазона. Мы поступали так в предыдущем примере:

```
from fullName in fullNames
from name in fullName.Split()
```

Здесь мы расширили перечисление фамилий до перечисления слов. Аналогичный запрос EF Core производится, когда необходимо развернуть навигационные свойства типа коллекций. Следующий запрос выводит список всех заказчиков вместе с их покупками:

```
IEnumerable<string> query = from c in dbContext.Customers
                                from p in c.Purchases
                                select c.Name + " bought a " + p.Description;

// Tom bought a Bike
// Tom bought a Holiday
// Dick bought a Phone
// Harry bought a Car
// ...
```

Здесь мы расширили каждого заказчика в подпоследовательность покупок.

Второй шаблон предусматривает выполнение *декартова произведения*, или *перекрестного соединения*, при котором каждый элемент одной последовательности сопоставляется с каждым элементом другой последовательности. Чтобы сделать это, потребуется ввести генератор, выражение селектора которого возвращает последовательность, не связанную с какой-то переменной диапазона:

```
int[] numbers = { 1, 2, 3 }; string[] letters = { "a", "b" };
IQueryable<string> query = from n in numbers
    from l in letters
    select n.ToString() + l;
// Результат: { "1a", "1b", "2a", "2b", "3a", "3b" }
```

Такой стиль запроса является основой соединений в стиле **SelectMany**.

Выполнение соединений с помощью **SelectMany**

Операцию **SelectMany** можно использовать для соединения двух последовательностей, просто отфильтровывая результаты векторного произведения. Например, предположим, что необходимо сопоставить игроков друг с другом в игре. Мы можем начать следующим образом:

```
string[] players = { "Tom", "Jay", "Mary" };
IQueryable<string> query = from name1 in players
    from name2 in players
    select name1 + " vs " + name2;
// Результат: { "Tom vs Tom", "Tom vs Jay", "Tom vs Mary",
//               "Jay vs Tom", "Jay vs Jay", "Jay vs Mary",
//               "Mary vs Tom", "Mary vs Jay", "Mary vs Mary" }
```

Запрос читается так: “Для любого игрока выполнить итерацию по каждому игроку, выбирая игрока 1 против игрока 2”. Хотя мы получаем то, что запросили (перекрестное соединение), результаты бесполезны до тех пор, пока не будет добавлен фильтр:

```
IEnumerable<string> query = from name1 in players
    from name2 in players
    where name1.CompareTo(name2) < 0
    orderby name1, name2
    select name1 + " vs " + name2;
// Результат: { "Jay vs Mary", "Jay vs Tom", "Mary vs Tom" }
```

Предикат фильтра образует условие соединения. Наш запрос можно назвать **неэкви соединением**, потому что в условии соединения операция эквивалентности не применяется.

SelectMany в EF Core

Операция **SelectMany** в EF Core может выполнять перекрестные соединения, неэкви соединения, внутренние соединения и левые внешние соединения. Как и **Select**, ее можно применять с предопределенными ассоциациями и произвольными отношениями. Отличие в том, что операция **SelectMany** возвращает плоский, а не иерархический результирующий набор.

Перекрестное соединение EF Core записывается точно так же, как в предыдущем разделе. Следующий запрос сопоставляет каждого заказчика с каждой покупкой (перекрестное соединение):

```
var query = from c in dbContext.Customers
    from p in dbContext.Purchases
    where c.ID == p.CustomerID
    select c.Name + " bought a " + p.Description;
```

Однако более типичной ситуацией является сопоставление заказчиков только с их собственными покупками. Это достигается добавлением конструкции `where` с предикатом соединения. В результате получается стандартное эквисоединение в стиле SQL:

```
var query = from c in dataContext.Customers
             from p in dataContext.Purchases
             where c.ID == p.CustomerID
             select c.Name + " bought a " + p.Description;
```



Такой запрос хорошо транслируется в SQL. В следующем разделе будет показано, как его расширить для поддержки внешних соединений. Переписывание запросов подобного рода с использованием LINQ-операции `Join` в действительности делает их *менее* расширяемыми — в таком смысле язык LINQ противоположен SQL.

При наличии в сущностях навигационных свойств типа коллекций тот же самый запрос можно выразить путем развертывания подколлекции вместо фильтрации результатов векторного произведения:

```
from c in dbContext.Customers
from p in c.Purchases
select new { c.Name, p.Description };
```

Преимущество заключается в том, что мы устранием предикат соединения. Мы перешли от фильтрации векторного произведения к развертыванию и выравниванию.

Для дополнительной фильтрации к такому запросу можно добавлять конструкции `where`. Например, если нужны только заказчики, имена которых начинаются на “Т”, фильтрацию можно производить так:

```
from c in dbContext.Customers
where c.Name.StartsWith ("T")
from p in c.Purchases
select new { c.Name, p.Description };
```

Приведенный запрос EF Core будет работать в равной степени хорошо, если переместить конструкцию `where` на одну строку ниже. Однако если это локальный запрос, то перемещение конструкции `where` вниз может сделать его менее эффективным. Для локальных запросов фильтрация должна выполняться *перед* соединением.

С помощью дополнительных конструкций `from` в полученную смесь можно вводить новые таблицы. Например, если каждая запись о покупке имеет дочерние строки деталей, то можно было бы построить плоский результирующий набор заказчиков с их покупками и деталями по каждой покупке:

```
from c in dbContext.Customers
from p in c.Purchases
from pi in p.PurchaseItems
select new { c.Name, p.Description, pi.Detail };
```

Каждая конструкция `from` вводит новую *дочернюю* таблицу. Чтобы включить данные из *родительской* таблицы (через навигационное свойство), не нужно добавлять конструкцию `from` — необходимо лишь перейти на это свойство. Скажем, если с каждым заказчиком связан продавец, имя которого требуется запросить, можно поступить следующим образом:

```
from c in dbContext.Customers  
select new { Name = c.Name, SalesPerson = c.SalesPerson.Name };
```

В данном случае операция `SelectMany` не используется, т.к. отсутствуют подколлекции, подлежащие выравниванию. Родительское навигационное свойство возвращает одиночный элемент.

Выполнение внешних соединений с помощью `SelectMany`

Как было показано ранее, подзапрос `Select` выдает результат, аналогичный левому внешнему соединению:

```
from c in dbContext.Customers  
select new {  
    c.Name,  
    Purchases = from p in c.Purchases  
                where p.Price > 1000  
                select new { p.Description, p.Price }  
};
```

В приведенном примере каждый внешний элемент (заказчик) включается независимо от того, совершились ли им какие-то покупки. Но предположим, что запрос переписан с применением операции `SelectMany`, а потому вместо иерархического результирующего набора можно получить одиночную плоскую коллекцию:

```
from c in dbContext.Customers  
from p in c.Purchases  
where p.Price > 1000  
select new { c.Name, p.Description, p.Price };
```

В процессе выравнивания запроса мы перешли на внутреннее соединение: теперь включаются только такие заказчики, которые имеют одну или более дорогостоящих покупок. Чтобы получить левое внешнее соединение с плоским результирующим набором, мы должны применить к внутренней последовательности операцию запроса `DefaultIfEmpty`. Этот метод возвращает последовательность с единственным элементом `null`, когда входная последовательность не содержит элементов. Ниже показан такой запрос с опущенным предикатом цены:

```
from c in dbContext.Customers  
from p in c.Purchases.DefaultIfEmpty()  
select new { c.Name, p.Description, Price = (decimal?) p.Price };
```

Данный запрос успешно работает с EF Core, возвращая всех заказчиков, даже если они вообще не совершали покупок. Но в случае его запуска как локального запроса произойдет аварийный отказ, потому что когда `p` равно `null`, обращения `p.Description` и `p.Price` генерируют исключение `NullReferenceException`. Мы можем сделать наш запрос надежным в обоих сценариях следующим образом:

```

from c in dbContext.Customers
from p in c.Purchases.DefaultIfEmpty()
select new {
    c.Name,
    Description = p == null ? null : p.Description,
    Price = p == null ? (decimal?) null : p.Price
};

```

Теперь давайте займемся фильтром цены. Использовать конструкцию `where`, как мы поступали ранее, не получится, поскольку она выполняется *после* `DefaultIfEmpty`:

```

from c in dbContext.Customers
from p in c.Purchases.DefaultIfEmpty()
where p.Price > 1000...

```

Корректное решение предусматривает сращивание конструкции `Where` *перед* `DefaultIfEmpty` с подзапросом:

```

from c in dataContext.Customers
from p in c.Purchases.Where (p => p.Price > 1000).DefaultIfEmpty()
select new {
    c.Name,
    Description = p == null ? null : p.Description,
    Price = p == null ? (decimal?) null : p.Price
};

```

Инфраструктура EF Core транслирует такой запрос в левое внешнее соединение. Это эффективный шаблон для написания запросов подобного рода.



Если вы привыкли к написанию внешних соединений на языке SQL, то можете не заметить более простой вариант с подзапросом `Select` для такого стиля запросов, а отдать предпочтение неудобному, но знакомому подходу, ориентированному на SQL, с плоским результирующим набором. Иерархический результирующий набор из подзапроса `Select` часто лучше подходит для запросов с внешними соединениями, потому что в таком случае отсутствуют дополнительные значения `null`, с которыми пришлось бы иметь дело.

Выполнение соединения

Метод	Описание	Эквиваленты в SQL
Join	Применяет стратегию поиска для сопоставления элементов из двух коллекций, выпуская плоский результирующий набор	INNER JOIN
GroupJoin	Похож на <code>Join</code> , но выпускает иерархический результирующий набор	INNER JOIN, LEFT OUTER JOIN
Zip	Перечисляет две последовательности за раз (подобно застежке-молнии (<code>zipper</code>)), применяя функцию к каждой паре элементов	Генерируется исключение

Join и GroupJoin

IEnumerable<TOuter>, IEnumerable<TInner> → IEnumerable<TResult>

Аргументы Join

Аргумент	Тип
Внешняя последовательность	IEnumerable<TOuter>
Внутренняя последовательность	IEnumerable<TInner>
Внешний селектор ключей	TOuter => TKey
Внутренний селектор ключей	TInner => TKey
Селектор результатов	(TOuter, TInner) => TResult

Аргументы GroupJoin

Аргумент	Тип
Внешняя последовательность	IEnumerable<TOuter>
Внутренняя последовательность	IEnumerable<TInner>
Внешний селектор ключей	TOuter => TKey
Внутренний селектор ключей	TInner => TKey
Селектор результатов	(TOuter, IEnumerable<TInner>) => TResult

Синтаксис запросов

```
from внешняя-переменная in внешнее-перечисление
join внутренняя-переменная in внутреннее-перечисление
    on внешнее-выражение-ключей equals внутреннее-выражение-ключей
    [ into идентификатор ]
```

Обзор

Операции Join и GroupJoin объединяют две входные последовательности в единственную выходную последовательность. Операция Join выпускает плоский вывод, а GroupJoin — иерархический.

Операции Join и GroupJoin поддерживают стратегию, альтернативную операциям Select и SelectMany. Преимущество Join и GroupJoin связано с эффективным выполнением на локальных коллекциях в памяти, т.к. они сначала загружают внутреннюю последовательность в объект Lookup с ключами, устранив необходимость в повторяющемся перечислении по всем внутренним элементам. Их недостаток в том, что они предлагают эквивалент только для внутренних и левых внешних соединений; перекрестные соединения и неэквисоединения по-прежнему должны делаться с помощью Select/SelectMany. В запросах EF Core операции Join и GroupJoin не имеют реальных преимуществ перед Select и SelectMany.

В табл. 9.1 приведена сводка по отличиям между стратегиями соединения.

Таблица 9.1. Стратегии соединения

Стратегия	Форма ре-зультатов	Эффективность локальных запросов	Внутрен-ние сое-динения	Левые внешние соединения	Перекрест-ные соеди-нения	Незэки-соедине-ния
Select + SelectMany	Плоская	Низкая	Да	Да	Да	Да
Select + Select	Вложенная	Низкая	Да	Да	Да	Да
Join	Плоская	Хорошая	Да	-	-	-
GroupJoin	Вложенная	Хорошая	Да	Да	-	-
GroupJoin + SelectMany	Плоская	Хорошая	Да	Да	-	-

Join

Операция Join выполняет внутреннее соединение, выпуская плоскую выходную последовательность.

Следующий запрос выводит список всех заказчиков вместе с их покупками, не используя навигационное свойство:

```
IQueryable<string> query =  
    from c in dbContext.Customers  
    join p in dbContext.Purchases on c.ID equals p.CustomerID  
    select c.Name + " bought a " + p.Description;
```

Результаты совпадают с теми, которые были бы получены из запроса в стиле SelectMany:

```
Tom bought a Bike  
Tom bought a Holiday  
Dick bought a Phone  
Harry bought a Car
```

Чтобы увидеть преимущество операции Join перед SelectMany, мы должны преобразовать запрос в локальный. В целях демонстрации мы сначала скопируем всех заказчиков и покупки в массивы, после чего выполним запросы к этим массивам:

```
Customer[] customers = dbContext.Customers.ToArray();  
Purchase[] purchases = dbContext.Purchases.ToArray();  
var slowQuery = from c in customers  
                 from p in purchases where c.ID == p.CustomerID  
                 select c.Name + " bought a " + p.Description;  
  
var fastQuery = from c in customers  
                 join p in purchases on c.ID equals p.CustomerID  
                 select c.Name + " bought a " + p.Description;
```

Хотя оба запроса выдают одинаковые результаты, запрос Join заметно быстрее, потому что его реализация в классе Enumerable предварительно загружает внутреннюю коллекцию (`purchases`) в объект Lookup с ключами.

Синтаксис запросов для конструкции `join` может быть записан в общем случае так:

```
join внутренняя-переменная in внутренняя-последовательность  
    on внешнее-выражение-ключей equals внутреннее-выражение-ключей
```

Операции соединений в LINQ проводят различие между *внутренней последовательностью* и *внешней последовательностью*. Вот что они означают с точки зрения синтаксиса.

- *Внешняя последовательность* — это входная последовательность (в данном случае `customers`).
- *Внутренняя последовательность* — это введенная вами новая коллекция (в данном случае `purchases`).

Операция `Join` выполняет внутренние соединения, а значит заказчики, не имеющие связанных с ними покупок, из вывода исключаются. При внутренних соединениях внутреннюю и внешнюю последовательности в запросе можно менять местами и по-прежнему получать те же самые результаты:

```
from p in purchases          // p теперь внешняя последовательность  
join c in customers on p.CustomerID equals c.ID // c теперь внутренняя  
                                                // последовательность
```

...

В запрос можно добавлять дополнительные конструкции `join`. Если, например, каждая запись о покупке имеет один или более элементов, тогда выполнить соединение элементов покупок можно следующим образом:

```
from c in customers  
join p in purchases on c.ID equals p.CustomerID      // первое соединение  
join pi in purchaseItems on p.ID equals pi.PurchaseID // второе  
                                                       // соединение
```

...

Здесь `purchases` действует в качестве *внутренней* последовательности в первом соединении и в качестве *внешней* — во втором. Получить те же самые результаты (неэффективным способом) можно с применением вложенных операторов `foreach`:

```
foreach (Customer c in customers)  
    foreach (Purchase p in purchases)  
        if (c.ID == p.CustomerID)  
            foreach (PurchaseItem pi in purchaseItems)  
                if (p.ID == pi.PurchaseID)  
                    Console.WriteLine (c.Name + "," + p.Price + "," + pi.Detail);
```

В синтаксисе запросов переменные из более ранних соединений остаются в области видимости — точно так происходит и в запросах стиля `SelectMany`. Кроме того, между конструкциями `join` разрешено вставлять конструкции `where` и `let`.

Выполнение соединений по нескольким ключам

Можно выполнять соединение по нескольким ключам с помощью анонимных типов:

```
from x in sequenceX
join y in sequenceY on new { K1 = x.Prop1, K2 = x.Prop2 }
                           equals new { K1 = y.Prop3, K2 = y.Prop4 }
...
```

Чтобы прием работал, два анонимных типа должны быть идентично структурированными. Компилятор затем реализует каждый из них с помощью одного и того же внутреннего типа, делая соединяемые ключи совместимыми.

Выполнение соединений в текущем синтаксисе

Показанное ниже соединение в синтаксисе запросов:

```
from c in customers
join p in purchases on c.ID equals p.CustomerID
select new { c.Name, p.Description, p.Price };
```

можно выразить с помощью текущего синтаксиса:

```
customers.Join (
    purchases,                      // внешняя коллекция
    c => c.ID,                      // внутренняя коллекция
    p => p.CustomerID,             // внешний селектор ключей
    (c, p) => new                  // внутренний селектор ключей
        { c.Name, p.Description, p.Price } // селектор результатов
);
```

Выражение селектора результатов в конце создает каждый элемент в выходной последовательности. Если перед проецированием присутствуют дополнительные конструкции, такие как `orderby` в данном примере:

```
from c in customers
join p in purchases on c.ID equals p.CustomerID
orderby p.Price
select c.Name + " bought a " + p.Description;
```

тогда для представления запроса в текущем синтаксисе потребуется создать временный анонимный тип внутри селектора результатов. Такой прием сохраняет `c` и `p` в области видимости, следуя соединению:

```
customers.Join (
    purchases,                      // внешняя коллекция
    c => c.ID,                      // внутренняя коллекция
    p => p.CustomerID,             // внешний селектор ключей
    (c, p) => new { c, p } )      // внутренний селектор ключей
    .OrderBy (x => x.p.Price)
    .Select (x => x.c.Name + " bought a " + x.p.Description);
```

При выполнении соединений синтаксис запросов обычно предпочтительнее; он требует менее кропотливой работы.

GroupJoin

Операция GroupJoin делает то же самое, что и Join, но вместо плоского результата выдает иерархический результат, сгруппированный по каждому внешнему элементу. Она также позволяет выполнять левые внешние соединения. В настоящее время операция GroupJoin в EF Core не поддерживается.

Синтаксис запросов для GroupJoin такой же, как и для Join, но за ним следует ключевое слово `into`.

Вот простейший пример, в котором используется локальный запрос:

```
Customer[] customers = dbContext.Customers.ToArray();
Purchase[] purchases = dbContext.Purchases.ToArray();

IQueryable<IQueryable<Purchase>> query =
    from c in customers
    join p in purchases on c.ID equals p.CustomerID
    into custPurchases
    select custPurchases; // custPurchases является последовательностью
```



Конструкция `into` транслируется в операцию GroupJoin, только когда она появляется непосредственно после конструкции `join`. После конструкции `select` или `group` она означает *продолжение запроса*. Указанные два сценария использования ключевого слова `into` значительно отличаются, хотя и обладают одной общей характеристикой: в обоих случаях вводится новая переменная диапазона.

Результатом будет последовательность последовательностей, для которой можно выполнить перечисление:

```
foreach (IQueryable<Purchase> purchaseSequence in query)
    foreach (Purchase p in purchaseSequence)
        Console.WriteLine (p.Description);
```

Тем не менее, это не особенно полезно, т.к. `purchaseSequence` не имеет ссылок на заказчика. Чаще всего следует поступать так:

```
from c in customers
join p in purchases on c.ID equals p.CustomerID
into custPurchases
select new { CustName = c.Name, custPurchases };
```

Результаты будут такими же, как у приведенного ниже (неэффективного) подзапроса `Select`:

```
from c in customers
select new
{
    CustName = c.Name,
    custPurchases = purchases.Where (p => c.ID == p.CustomerID)
};
```

По умолчанию операция GroupJoin является эквивалентом левого внешнего соединения. Чтобы получить внутреннее соединение, посредством которого исключаются заказчики без покупок, понадобится реализовать фильтрацию по `custPurchases`:

```
from c in customers join p in purchases on c.ID equals p.CustomerID  
into custPurchases  
where custPurchases.Any()  
select ...
```

Конструкции после `into` в `GroupJoin` оперируют на *подпоследовательностях* внутренних дочерних элементов, а не на *индивидуальных* дочерних элементах. Это значит, что для фильтрации отдельных покупок необходимо вызвать операцию `Where` *перед* соединением:

```
from c in customers  
join p in purchases.Where (p2 => p2.Price > 1000)  
    on c.ID equals p.CustomerID  
into custPurchases ...
```

С помощью операции `GroupJoin` можно конструировать лямбда-выражения, как это делается посредством `Join`.

Плоские внешние соединения

Когда требуется и внешнее соединение, и плоский результирующий набор, возникает дилемма. Операция `GroupJoin` обеспечивает внешнее соединение, а `Join` дает плоский результирующий набор. Решение заключается в том, чтобы сначала вызвать `GroupJoin`, затем метод `DefaultIfEmpty` на каждой дочерней последовательности и, наконец, метод `SelectMany` на результате:

```
from c in customers  
join p in purchases on c.ID equals p.CustomerID into custPurchases  
from cp in custPurchases.DefaultIfEmpty()  
select new  
{  
    CustName = c.Name,  
    Price = cp == null ? (decimal?) null : cp.Price  
};
```

Метод `DefaultIfEmpty` возвращает последовательность с единственным значением `null`, если подпоследовательность покупок пуста. Вторая конструкция `from` транслируется в вызов метода `SelectMany`. В такой роли она *развертывает и выравнивает* все подпоследовательности покупок, объединяя их в единую последовательность *элементов покупок*.

Выполнение соединений с помощью объектов `Lookup`

Методы `Join` и `GroupJoin` в `Enumerable` работают в два этапа. Во-первых, они загружают внутреннюю последовательность в объект `Lookup`. Во-вторых, они запрашивают внешнюю последовательность в комбинации с объектом `Lookup`.

Объект `Lookup` — это последовательность групп, в которую можно получать доступ напрямую по ключу. По-другому его следует воспринимать как словарь последовательностей — словарь, который способен принимать множество элементов для каждого ключа (иногда его называют *мультисловарем*). Объекты `Lookup` предназначены только для чтения и определены в соответствии со следующим интерфейсом:

```
public interface ILookup<TKey,TElement> :  
    IEnumerable<IGrouping<TKey,TElement>>, IEnumerable  
{  
    int Count { get; }  
    bool Contains ( TKey key );  
    IEnumerable<TElement> this [ TKey key ] { get; }  
}
```



Операции соединений (как и все остальные операции, выдающие последовательности) поддерживают семантику отложенного или ленивого выполнения. Это значит, что объект Lookup не будет создан до тех пор, пока вы не начнете перечисление выходной последовательности (и тогда сразу же строится целый объект Lookup).

Имея дело с локальными коллекциями, в качестве альтернативы применению операций соединения объекты Lookup можно создавать и запрашивать вручную. Такой подход обладает парой преимуществ:

- один и тот же объект Lookup можно многократно использовать во множестве запросов — равно как и в обычном императивном коде;
- выдача запросов к объекту Lookup — отличный способ понять, каким образом работают операции Join и GroupJoin.

Объект Lookup создается с помощью расширяющего метода ToLookup. Следующий код загружает все покупки в объект Lookup — с ключами в виде их идентификаторов CustomerID:

```
ILookup<int?, Purchase> purchLookup =  
    purchases.ToLookup ( p => p.CustomerID, p => p );
```

Первый аргумент выбирает ключ, а второй — объекты, которые должны загружаться в качестве значений в Lookup.

Чтение объекта Lookup довольно похоже на чтение словаря за исключением того, что индексатор возвращает последовательность соответствующих элементов, а не одиночный элемент. Приведенный ниже код перечисляет все покупки, совершенные заказчиком с идентификатором 1:

```
foreach ( Purchase p in purchLookup [ 1 ] )  
    Console.WriteLine ( p.Description );
```

При наличии объекта Lookup можно написать запросы SelectMany/Select, которые выполняются настолько же эффективно, как запросы Join/GroupJoin. Операция Join эквивалентна применению метода SelectMany на объекте Lookup:

```
from c in customers  
from p in purchLookup [ c.ID ]  
select new { c.Name, p.Description, p.Price };  
  
// Tom Bike 500  
// Tom Holiday 2000  
// Dick Bike 600  
// Dick Phone 300  
// ...
```

Добавление вызова метода DefaultIfEmpty делает этот запрос внутренним соединением:

```
from c in customers
from p in purchLookup [c.ID].DefaultIfEmpty()
select new {
    c.Name,
    Description = p == null ? null : p.Description,
    Price = p == null ? (decimal?) null : p.Price
};
```

Использование GroupJoin эквивалентно чтению объекта Lookup внутри проекции:

```
from c in customers
select new {
    CustName = c.Name,
    CustPurchases = purchLookup [c.ID]
};
```

Реализация в Enumerable

Ниже представлена простейшая допустимая реализация Enumerable.Join, не включающая проверку на предмет равенства null:

```
public static IEnumerable <TResult> Join
    <TOuter, TInner, TKey, TResult> (
        this IEnumerable <TOuter> outer,
        IEnumerable <TInner> inner,
        Func <TOuter, TKey> outerKeySelector,
        Func <TInner, TKey> innerKeySelector,
        Func <TOuter, TInner, TResult> resultSelector)
{
    ILookup < TKey, TInner > lookup = inner.ToLookup (innerKeySelector);
    return
        from outerItem in outer
        from innerItem in lookup [outerKeySelector (outerItem)]
        select resultSelector (outerItem, innerItem);
}
```

Реализация GroupJoin похожа на реализацию Join, но только проще:

```
public static IEnumerable <TResult> GroupJoin
    <TOuter, TInner, TKey, TResult> (
        this IEnumerable <TOuter> outer,
        IEnumerable <TInner> inner,
        Func <TOuter, TKey> outerKeySelector,
        Func <TInner, TKey> innerKeySelector,
        Func <TOuter, IEnumerable<TInner>, TResult> resultSelector)
{
    ILookup < TKey, TInner > lookup = inner.ToLookup (innerKeySelector);
    return
        from outerItem in outer
        select resultSelector
            (outerItem, lookup [outerKeySelector (outerItem)]);
}
```

Операция Zip

IEnumerable<TFirst>, IEnumerable<TSecond> → IEnumerable<TResult>

Операция Zip выполняет перечисление двух последовательностей за раз (подобно застежке-молнии (zipper)) и возвращает последовательность, основанную на применении некоторой функции к каждой паре элементов. Например, следующий код:

```
int[] numbers = { 3, 5, 7 };
string[] words = { "three", "five", "seven", "ignored" };
IEnumerable<string> zip = numbers.Zip (words, (n, w) => n + "=" + w);
```

выдает последовательность с такими элементами:

```
3=three
5=five
7=seven
```

Избыточные элементы в любой из входных последовательностей игнорируются. Операция Zip не поддерживается инфраструктурой EF Core.

Упорядочение

IEnumerable<TSource> → IOrderedEnumerable<TSource>

Метод	Описание	Эквиваленты в SQL
OrderBy, ThenBy	Сортируют последовательность в возрастающем порядке	ORDER BY...
OrderByDescending, ThenByDescending	Сортируют последовательность в убывающем порядке	ORDER BY... DESC
Reverse	Возвращает последовательность в обратном порядке	Генерируется исключение

Операции упорядочения возвращают те же самые элементы, но в другом порядке.

OrderBy, OrderByDescending, ThenBy, ThenByDescending

Аргументы OrderBy и OrderByDescending

Аргумент	Тип
Входная последовательность	IEnumerable<TSource>
Селектор ключей	TSource => TKey

Возвращаемый тип: IOrderedEnumerable<TSource>

Аргументы `ThenBy` и `ThenByDescending`

Аргумент	Тип
Входная последовательность	IOrderedEnumerable<TSource>
Селектор ключей	TSource => TKey

Синтаксис запросов

```
orderby выражение1 [descending] [, выражение2 [descending] ... ]
```

Обзор

Операция `OrderBy` возвращает отсортированную версию входной последовательности, используя выражение `keySelector` для выполнения сравнений. Следующий запрос выдает последовательность имен в алфавитном порядке:

```
IEnumerable<string> query = names.OrderBy (s => s);
```

А здесь имена сортируются по их длине:

```
IEnumerable<string> query = names.OrderBy (s => s.Length);
```

```
// Результат: { "Jay", "Tom", "Mary", "Dick", "Harry" };
```

Относительный порядок элементов с одинаковыми ключами сортировки (в данном случае Jay/Tom и Mary/Dick) не определен, если только не добавить операцию `ThenBy`:

```
IEnumerable<string> query = names.OrderBy (s => s.Length).ThenBy (s => s);
```

```
// Результат: { "Jay", "Tom", "Dick", "Mary", "Harry" };
```

Операция `ThenBy` переупорядочивает лишь элементы, которые имеют один и тот же ключ сортировки из предшествующей сортировки. Допускается выстраивать в цепочку любое количество операций `ThenBy`. Следующий запрос сортирует сначала по длине, затем по второму символу и, наконец, по первому символу:

```
names.OrderBy (s => s.Length).ThenBy (s => s[1]).ThenBy (s => s[0]);
```

Ниже показан эквивалент в синтаксисе запросов:

```
from s in names
orderby s.Length, s[1], s[0]
select s;
```



Приведенная далее вариация *некорректна* — в действительности она будет упорядочивать сначала по `s[1]` и затем по `s.Length` (в случае запроса к базе данных она будет упорядочивать *только* по `s[1]` и отбрасывать первое упорядочение):

```
from s in names
orderby s.Length
orderby s[1]
...
...
```

Язык LINQ также предлагает операции `OrderByDescending` и `ThenByDescending`, которые делают то же самое, выдавая результаты в обратном порядке. Следующий запрос EF Core извлекает покупки в убывающем порядке цен, выстраивая покупки с одинаковой ценой в алфавитном порядке:

```
dbContext.Purchases.OrderByDescending (p => p.Price)
    .ThenBy (p => p.Description);
```

А вот он в синтаксисе запросов:

```
from p in dbContext.Purchases
orderby p.Price descending, p.Description
select p;
```

Компараторы и сопоставления

В локальном запросе объекты селекторов ключей самостоятельно определяют алгоритм упорядочения через свою стандартную реализацию интерфейса `IComparable` (см. главу 7). Переопределить алгоритм сортировки можно путем передачи объекта реализации `IComparer`. Показанный ниже запрос выполняет сортировку, нечувствительную к регистру:

```
names.OrderBy (n => n, StringComparer.CurrentCultureIgnoreCase);
```

Передача компаратора не поддерживается ни в синтаксисе запросов, ни в EF Core. При запросе базы данных алгоритм сравнения определяется сопоставлением участующего столбца. Если сопоставление чувствительно к регистру, то нечувствительную к регистру сортировку можно затребовать вызовом метода `ToUpper` в селекторе ключей:

```
from p in dbContext.Purchases
orderby p.Description.ToUpper()
select p;
```

IOrderedEnumerable и IOrderedQueryable

Операции упорядочения возвращают специальные подтипы `IEnumerable<T>`. Операции упорядочения в классе `Enumerable` возвращают тип `IOrderedEnumerable<TSource>`, а операции упорядочения в классе `Queryable` — тип `IOrderedQueryable<TSource>`. Упомянутые подтипы позволяют с помощью последующей операции `ThenBy` уточнять, а не заменять существующее упорядочение.

Дополнительные члены, которые эти подтипы определяют, не открыты публично, так что они представляются как обычные последовательности. Тот факт, что они являются разными типами, вступает в игру при постепенном построении запросов:

```
IOrderedEnumerable<string> query1 = names.OrderBy (s => s.Length);
IOrderedEnumerable<string> query2 = query1.ThenBy (s => s);
```

Если взамен объявить переменную `query1` как имеющую тип `IEnumerable<string>`, тогда вторая строка не скомпилируется — операция `ThenBy` требует на входе тип `IOrderedEnumerable<string>`. Чтобы не переживать по такому поводу, переменные диапазона можно типизировать неявно:

```
var query1 = names.OrderBy (s => s.Length);
var query2 = query1.ThenBy (s => s);
```

Однако неявная типизация и сама может создать проблемы. Следующий код не скомпилируется:

```
var query = names.OrderBy (s => s.Length);
query = query.Where (n => n.Length > 3); // Ошибка на этапе компиляции
```

В качестве типа переменной query компилятор выводит `IOrderedEnumerable<string>`, основываясь на типе выходной последовательности операции `OrderBy`. Тем не менее, операция `Where` в следующей строке возвращает обычную реализацию `IEnumerable<string>`, которая не может быть присвоена query. Обойти проблему можно либо за счет явной типизации, либо путем вызова метода `AsEnumerable` после `OrderBy`:

```
var query = names.OrderBy (s => s.Length).AsEnumerable();
query = query.Where (n => n.Length > 3); // Компилируется
```

Эквивалентом `AsEnumerable` в интерпретируемых запросах является метод `AsQueryable`.

Группирование

`IEnumerable<TSource> → IEnumerable<IGrouping< TKey, TElement >>`

Метод	Описание	Эквиваленты в SQL
<code>GroupBy</code>	Группирует последовательность в подпоследовательности	<code>GROUP BY</code>
<code>Chunk</code>	Группирует последовательность в массивы фиксированного размера	

GroupBy

Аргумент	Тип
Входная последовательность	<code>IEnumerable<TSource></code>
Селектор ключей	<code>TSource => TKey</code>
Селектор элементов (необязательный)	<code>TSource => TElement</code>
Компаратор (необязательный)	<code>IEqualityComparer< TKey ></code>

Синтаксис запросов

`group выражение-элементов by выражение-ключей`

Обзор

Операция `GroupBy` организует плоскую входную последовательность в последовательность *групп*. Например, приведенный ниже код организует все файлы в каталоге `Path.GetTempPath()` по их расширениям:

```
string[] files = Directory.GetFiles ("c:\\temp");
IQueryable<IGrouping<string, string>> query =
    files.GroupBy (file => Path.GetExtension (file));
```

Если неявная типизация удобнее, то можно записать так:

```
var query = files.GroupBy (file => Path.GetExtension (file));
```

А вот как выполнить перечисление результата:

```
foreach (IGrouping<string, string> grouping in query)
{
    Console.WriteLine ("Extension: " + grouping.Key);
    foreach (string filename in grouping)
        Console.WriteLine (" -- " + filename);
}

// Extension: .pdf
//   -- chapter03.pdf
//   -- chapter04.pdf
// Extension: .doc
//   -- todo.doc
//   -- menu.doc
//   -- Copy of menu.doc
// ...
```

Метод `Enumerable.GroupBy` работает путем чтения входных элементов во временный словарь списков, так что все элементы с одинаковыми ключами попадают в один и тот же подсписок. Затем выдается последовательность *групп*. Группа — это последовательность со свойством `Key`:

```
public interface IGrouping <TKey, TElement> : IEnumerable<TElement>,
    IEnumerable
{
    TKey Key { get; } // Ключ применяется к подпоследовательности
                     // как к единому целому
}
```

По умолчанию элементы в каждой группе являются нетрансформированными входными элементами, если только не указан аргумент `elementSelector`. Следующий код проецирует каждый входной элемент в верхний регистр:

```
files.GroupBy (file => Path.GetExtension (file), file => file.ToUpper());
```

Аргумент `elementSelector` не зависит от `keySelector`. В данном случае это означает, что ключ каждой группы по-прежнему представлен в первоначальном регистре:

```
Extension: .pdf
-- CHAPTER03.PDF
-- CHAPTER04.PDF
Extension: .doc
-- TODO.DOC
```

Обратите внимание, что подколлекции не выдаются в алфавитном порядке ключей. Операция `GroupBy` просто группирует; она не выполняет *сортировку*. В действительности она предохраняет исходное упорядочение.

Для сортировки потребуется добавить операцию OrderBy:

```
files.GroupBy (file => Path.GetExtension (file), file => file.ToUpper())
    .OrderBy (grouping => grouping.Key);
```

Операция GroupBy имеет простую и прямую трансляцию в синтаксис запросов:

```
group выражение-элементов by выражение-ключей
```

Ниже приведен наш пример, представленный в синтаксисе запросов:

```
from file in files
group file.ToUpper() by Path.GetExtension (file);
```

Как и select, конструкция group “заканчивает” запрос — если только не была добавлена конструкция продолжения запроса:

```
from file in files
group file.ToUpper() by Path.GetExtension (file) into grouping
orderby grouping.Key
select grouping;
```

Продолжения запросов часто удобны в запросах group by. Следующий запрос отфильтровывает группы, которые содержат менее пяти файлов:

```
from file in files
group file.ToUpper() by Path.GetExtension (file) into grouping
where grouping.Count () >= 5
select grouping;
```



Конструкция where после group by является эквивалентом конструкции HAVING в SQL. Она применяется к каждой подпоследовательности или группе как к единому целому, а не к ее индивидуальным элементам.

Иногда интересует только результат агрегирования на группах, а потому подпоследовательности можно отбросить:

```
string[] votes = { "Dogs", "Cats", "Cats", "Dogs", "Dogs" };
IEnumerable<string> query = from vote in votes
                                group vote by vote into g
                                orderby g.Count() descending
                                select g.Key;
string winner = query.First(); // Dogs
```

GroupBy в EF Core

При запрашивании базы данных группирование работает аналогичным образом. Однако если есть настроенные навигационные свойства, то вы обнаружите, что потребность в группировании возникает менее часто, чем при работе со стандартным языком SQL. Например, для выборки заказчиков с не менее чем двумя покупками группирование не понадобится; запрос может быть записан так:

```
from c in dbContext.Customers
where c.Purchases.Count >= 2
select c.Name + " has made " + c.Purchases.Count + " purchases";
```

Примером, когда может использоваться группирование, служит вывод списка итоговых продаж по годам:

```
from p in dbContext.Purchases
group p.Price by p.Date.Year into salesByYear
select new {
    Year      = salesByYear.Key,
    TotalValue = salesByYear.Sum()
};
```

По сравнению с конструкцией GROUP BY в SQL группирование в LINQ отличается большей мощностью — вы можете извлечь все строки с деталями покупок безо всякого агрегирования:

```
from p in dbContext.Purchases
group p by p.Date.Year
```

Однако в EF Core такой прием не работает. Проблему легко обойти за счет вызова метода AsEnumerable прямо перед группированием, чтобы группирование происходило на стороне клиента. Это будет не менее эффективным до тех пор, пока любая фильтрация выполняется *перед* группированием, так что из сервера извлекаются только те данные, которые необходимы.

Еще одно отклонение от традиционного языка SQL связано с отсутствием обязательного проектирования переменных или выражений, участвующих в группировании или сортировке.

Группирование по нескольким ключам

Можно группировать по составному ключу с применением анонимного типа:

```
from n in names
group n by new { FirstLetter = n[0], Length = n.Length };
```

Специальные компараторы эквивалентности

В локальном запросе для изменения алгоритма сравнения ключей методу GroupBy можно передавать специальный компаратор эквивалентности. Однако такое действие требуется редко, потому что модификации выражения селектора ключей обычно вполне достаточно. Например, следующий запрос создает группирование, нечувствительное к регистру:

```
group n by n.ToUpper()
```

Chunk

IEnumerable<TSource> → IEnumerable<TElement[]>

Аргумент	Тип
Входная последовательность	IEnumerable<TSource>
Размер	int

Появившаяся в версии .NET 6 операция `Chunk` группирует последовательность в порции заданного размера (или меньше, если элементов не хватает):

```
foreach (int[] chunk in new[] { 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 }.Chunk (3))
    Console.WriteLine (string.Join (" ", chunk));
```

Вывод:

```
1, 2, 3
4, 5, 6
7, 8
```

Операции над множествами

`IEnumerable<TSource>, IEnumerable<TSource> → IEnumerable<TSource>`

Метод	Описание	Эквиваленты в SQL
<code>Concat</code>	Возвращает результат конкатенации элементов в каждой из двух последовательностей	<code>UNION ALL</code>
<code>Union,</code> <code>UnionBy</code>	Возвращают результат конкатенации элементов в каждой из двух последовательностей, исключая дубликаты	<code>UNION</code>
<code>Intersect,</code> <code>IntersectBy</code>	Возвращают элементы, присутствующие в обеих последовательностях	<code>WHERE ... IN (...)</code>
<code>Except,</code> <code>ExceptBy</code>	Возвращают элементы, присутствующие в первой, но не во второй последовательности	<code>EXCEPT или WHERE... NOT IN (...)</code>

`Concat, Union, UnionBy`

Операция `Concat` возвращает все элементы из первой последовательности, за которыми следуют все элементы из второй последовательности. Операция `Union` делает то же самое, но удаляет любые дубликаты:

```
int[] seq1 = { 1, 2, 3 }, seq2 = { 3, 4, 5 };

IEnumerable<int>
concat = seq1.Concat (seq2),           // { 1, 2, 3, 3, 4, 5 }
union = seq1.Union (seq2);           // { 1, 2, 3, 4, 5 }
```

Явное указание аргумента типа удобно, когда последовательности типизированы по-разному, но элементы имеют общий базовый тип. Например, благодаря API-интерфейсу рефлексии (глава 18) методы и свойства представлены с помощью классов `MethodInfo` и `PropertyInfo`, которые имеют общий базовый класс по имени `MemberInfo`. Мы можем выполнить конкатенацию методов и свойств, явно указывая базовый класс при вызове `Concat`:

```
MethodInfo[] methods = typeof (string).GetMethods();
 PropertyInfo[] props = typeof (string).GetProperties();
 IEnumerable<MemberInfo> both = methods.Concat<MemberInfo> (props);
```

В следующем примере мы фильтруем методы перед конкатенацией:

```
var methods = typeof (string).GetMethods().Where (m => !m.IsSpecialName);
var props = typeof (string).GetProperties();
var both = methods.Concat<MethodInfo> (props);
```

Данный пример полагается на варианность параметров типа в интерфейсе: `methods` относится к типу `IEnumerable<MethodInfo>`, который требует ковариантного преобразования в тип `IEnumerable<MemberInfo>`. Пример является хорошей иллюстрацией того, как варианность делает поведение типов более похожим на то, что ожидается.

Метод `UnionBy` (появившийся в .NET 6) принимает селектор ключей, который используется для определения того, является ли элемент дубликатом. В следующем примере выполняется объединение, нечувствительное к регистру символов:

```
string[] seq1 = { "A", "b", "C" };
string[] seq2 = { "a", "B", "c" };
var union = seq1.UnionBy (seq2, x => x.ToUpperInvariant ());
// объединение: { "A", "b", "C" }
```

В данном случае того же самого результата можно добиться с помощью метода `Union`, если предоставить ему компаратор эквивалентности:

```
var union = seq1.Union (seq2, StringComparer.InvariantCultureIgnoreCase);
```

Intersect, IntersectBy, Except, ExceptBy

Операция `Intersect` возвращает элементы, имеющиеся в двух последовательностях. Операция `Except` возвращает элементы из первой последовательности, которые *не* присутствуют во второй последовательности:

```
int[] seq1 = { 1, 2, 3 }, seq2 = { 3, 4, 5 };
IQueryable<int>
    commonality = seq1.Intersect (seq2),           // { 3 }
    difference1 = seq1.Except     (seq2),           // { 1, 2 }
    difference2 = seq2.Except     (seq1);           // { 4, 5 }
```

Внутренне метод `Enumerable.Except` загружает все элементы первой последовательности в словарь и затем удаляет из словаря элементы, присутствующие во второй последовательности. Эквивалентом такой операции в SQL является подзапрос `NOT EXISTS` или `NOT IN`:

```
SELECT number FROM numbers1Table
WHERE number NOT IN (SELECT number FROM numbers2Table)
```

Методы `IntersectBy` и `ExceptBy` (появившиеся в .NET 6) позволяют указывать селектор ключей, которые применяется перед выполнением сравнения эквивалентности (см. обсуждение `UnionBy` в предыдущем разделе).

Методы преобразования

Язык LINQ в основном имеет дело с последовательностями — другими словами, с коллекциями типа `IEnumerable<T>`. Методы преобразования преобразуют коллекции `IEnumerable<T>` в коллекции других типов и наоборот.

Метод	Описание
OfType	Преобразует <code>IEnumerable</code> в <code>IEnumerable<T></code> , отбрасывая некорректно типизированные элементы
Cast	Преобразует <code>IEnumerable</code> в <code>IEnumerable<T></code> , генерируя исключение при наличии некорректно типизированных элементов
ToArray	Преобразует <code>IEnumerable<T></code> в <code>T[]</code>
ToList	Преобразует <code>IEnumerable<T></code> в <code>List<T></code>
ToDictionary	Преобразует <code>IEnumerable<T></code> в <code>Dictionary< TKey, TValue ></code>
ToLookup	Преобразует <code>IEnumerable<T></code> в <code>ILookup< TKey, TElement ></code>
AsEnumerable	Приводит вверх к <code>IEnumerable<T></code>
AsQueryable	Приводит или преобразует в <code>IQueryable<T></code>

OfType и Cast

Методы `OfType` и `Cast` принимают необобщенную коллекцию `IEnumerable` и выдают обобщенную последовательность `IEnumerable<T>`, которую впоследствии можно запрашивать:

```
ArrayList classicList = new ArrayList();      // из System.Collections
classicList.AddRange ( new int[] { 3, 4, 5 } );
IEnumerable<int> sequence1 = classicList.Cast<int>();
```

Когда методы `Cast` и `OfType` встречают входной элемент, который имеет несовместимый тип, их поведение отличается. Метод `Cast` генерирует исключение, а `OfType` игнорирует такой элемент. Продолжим предыдущий пример:

```
DateTime offender = DateTime.Now;
classicList.Add (offender);
IEnumerable<int>
sequence2 = classicList.OfType<int>(),      // Нормально - проблемный
// элемент DateTime игнорируется
sequence3 = classicList.Cast<int>();          // Генерируется исключение
```

Правила совместимости элементов точно соответствуют правилам для операции `is` в языке C# и, следовательно, предусматривают только ссылочные и распаковывающие преобразования. Мы можем увидеть это, взглянув на внутреннюю реализацию `OfType`:

```
public static IEnumerable<TSource> OfType <TSource> (IEnumerable source)
{
    foreach (object element in source)
        if (element is TSource)
            yield return (TSource)element;
}
```

Метод `Cast` имеет идентичную реализацию за исключением того, что опускает проверку на предмет совместимости типов:

```
public static IEnumerable<TSource> Cast <TSource> (IEnumerable source)
{
    foreach (object element in source)
        yield return (TSource)element;
}
```

Из реализаций следует, что использовать Cast для выполнения числовых или специальных преобразований нельзя (взамен для них придется выполнять операцию Select). Другими словами, операция Cast не настолько гибкая, как операция приведения C#:

```
int i = 3;
long l = i;           // Неявное числовое преобразование int в long
int i2 = (int) l;     // Явное числовое преобразование long в int
```

Продемонстрировать сказанное можно, попробовав применить операции OfType или Cast для преобразования последовательности значений int в последовательность значений long:

```
int[] integers = { 1, 2, 3 };
IEnumerable<long> test1 = integers.OfType<long>();
IEnumerable<long> test2 = integers.Cast<long>();
```

При перечислении test1 выдает ноль элементов, а test2 генерирует исключение. Просмотр реализации метода OfType четко проясняет причину. После подстановки TSource мы получаем следующее выражение:

```
(element is long)
```

которое возвращает false, когда element имеет тип int, из-за отсутствия отношения наследования.



Причина того, что test2 генерирует исключение при перечислении, несколько тоньше. В реализации метода Cast обратите внимание на то, что element имеет тип object. Когда TSource является типом значения, среда CLR предполагает, что это *распаковывающее преобразование*, и синтезирует метод, который воспроизводит сценарий, описанный в разделе “Упаковка и распаковка” главы 3:

```
int value = 123;
object element = value;
long result = (long) element; // Генерируется исключение
```

Поскольку переменная element объявлена с типом object, выполняется приведение object к long (распаковка), а не числовое преобразование int в long. Распаковывающие операции требуют точного соответствия типов, поэтому распаковка object в long терпит неудачу, когда элемент является int.

Как предполагалось ранее, решение предусматривает использование обычной операции Select:

```
IEnumerable<long> castLong = integers.Select (s => (long) s);
```

Операции `OfType` и `Cast` также удобны для приведения вниз элементов в обобщенной входной коллекции. Например, если имеется входная коллекция типа `IEnumerable<Fruit>` (фрукты), то `OfType<Apple>` (яблоки) возвратит только яблоки. Это особенно полезно в LINQ to XML (глава 10).

Операция `Cast` поддерживается в синтаксисе запросов: понадобится лишь предварить переменную диапазона нужным типом:

```
from TreeNode node in myTreeView.Nodes  
...
```

ToArray, ToList, ToDictionary, ToHashSet, ToLookup

Операции `ToArray`, `ToList` и `ToHashSet` выдают результаты в массив, `List<T>` или `HashSet<T>`. При выполнении они вызывают немедленное перечисление входной последовательности. За примерами обращайтесь в раздел “Отложенное выполнение” главы 8.

Операции `ToDictionary` и `ToLookup` принимают описанные ниже аргументы.

Аргумент	Тип
Входная последовательность	<code>IEnumerable<TSource></code>
Селектор ключей	<code>TSource => TKey</code>
Селектор элементов (необязательный)	<code>TSource => TElement</code>
Компаратор (необязательный)	<code>IEqualityComparer<TKey></code>

Операция `ToDictionary` также приводит к немедленному перечислению последовательности с записью результатов в обобщенный словарь `Dictionary`. Представляемое выражение селектора ключей (`keySelector`) должно вычисляться как уникальное значение для каждого элемента во входной последовательности; в противном случае генерируется исключение. Напротив, операция `ToLookup` позволяет множеству элементов иметь один и тот же ключ. Объекты `Lookup` рассматривались в разделе “Выполнение соединений с помощью объектов `Lookup`” ранее в главе.

AsEnumerable и AsQueryable

Операция `AsEnumerable` выполняет приведение вверх последовательности к типу `IEnumerable<T>`, заставляя компилятор привязывать последующие операции запросов к методам из класса `Enumerable`, а не `Queryable`. За примером обращайтесь в раздел “Комбинирование интерпретируемых и локальных запросов” главы 8.

Операция `AsQueryable` выполняет приведение вниз последовательности к типу `IQueryable<T>`, если последовательность реализует этот интерфейс. В противном случае операция создает оболочку `IQueryable<T>` вокруг локального запроса.

Операции над элементами

IEnumerable<TSource> → TSource

Метод	Описание	Эквиваленты в SQL
First, FirstOrDefault	Возвращают первый элемент в последовательности, необязательно удовлетворяющий предикату	SELECT TOP 1... ORDER BY...
Last, LastOrDefault	Возвращают последний элемент в последовательности, необязательно удовлетворяющий предикату	SELECT TOP 1... ORDER BY...DESC
Single, SingleOrDefault	Эквивалентны операциям First/ FirstOrDefault, но генерируют исключение, если обнаружено более одного совпадения	
ElementAt, ElementAtOrDefault	Возвращают элемент в указанной позиции	Генерируется исключение
MinBy, MaxBy	Возвращают элемент с наименьшим или наибольшим значением	Генерируется исключение
DefaultIfEmpty	Возвращает одноэлементную последовательность, значением которой является default(TSource), если последовательность не содержит элементов	OUTER JOIN

Методы с именами, завершающимися на OrDefault, вместо генерации исключения возвращают default(TSource), если входная последовательность является пустой или отсутствуют элементы соответствующие заданному предикату.

Значение default(TSource) равно null для элементов ссылочных типов, false для элементов типа bool и 0 для элементов числовых типов.

First, Last, Single

Аргумент	Тип
Входная последовательность	IEnumerable<TSource>
Предикат (необязательный)	TSource => bool

В следующем примере демонстрируется работа операций First и Last:

```
int[] numbers = { 1, 2, 3, 4, 5 };

int first      = numbers.First();           // 1
int last       = numbers.Last();            // 5
int firstEven  = numbers.First (n => n % 2 == 0); // 2
int lastEven   = numbers.Last  (n => n % 2 == 0); // 4
```

Ниже проиллюстрирована работа операций First и FirstOrDefault:

```
int firstBigError = numbers.First (n => n > 10); // Генерируется исключение  
int firstBigNumber = numbers.FirstOrDefault (n => n > 10); // 0
```

Чтобы не генерировалось исключение, операция Single требует наличия в точности одного совпадающего элемента, а SingleOrDefault — одного или нуля совпадающих элементов:

```
int onlyDivBy3 = numbers.Single (n => n % 3 == 0); // 3  
int divBy2Err = numbers.Single (n => n % 2 == 0); // Ошибка: совпадение  
// дают 2 и 4  
int singleError = numbers.Single (n => n > 10); // Ошибка  
int noMatches = numbers.SingleOrDefault (n => n > 10); // 0  
int divBy2Error = numbers.SingleOrDefault (n => n % 2 == 0); // Ошибка
```

В данном семействе операций над элементами Single является самой “придирчивой”. С другой стороны, операции FirstOrDefault и LastOrDefault наиболее толерантны.

В EF Core операция Single часто используется для извлечения строки из таблицы по первичному ключу:

```
Customer cust = dataContext.Customers.Single (c => c.ID == 3);
```

ElementAt

Аргумент	Тип
Входная последовательность	IEnumerable<TSource>
Индекс элемента для возврата	int

Операция ElementAt извлекает *n*-ный элемент из последовательности:

```
int[] numbers = { 1, 2, 3, 4, 5 };  
int third = numbers.ElementAt (2); // 3  
int tenthError = numbers.ElementAt (9); // Генерируется исключение  
int tenth = numbers.ElementAtOrDefault (9); // 0
```

Метод Enumerable.ElementAt написан так, что если входная последовательность реализует интерфейс `IList<T>`, тогда он вызывает индексатор, определенный в `IList<T>`. В противном случае он выполняет перечисление *n* раз и затем возвращает следующий элемент. Операция ElementAt в EF Core не поддерживается.

MinBy И MaxBy

Операции MinBy и MaxBy (появившиеся в .NET 6) возвращают элемент с наименьшим или наибольшим значением, как определено селектором ключей:

```
string[] names = { "Tom", "Dick", "Harry", "Mary", "Jay" };  
Console.WriteLine (names.MaxBy (n => n.Length)); // Harry
```

Напротив, операции Min и Max (которые рассматриваются в следующем разделе) сами возвращают наименьшее или наибольшее значение:

```
Console.WriteLine (names.Max (n => n.Length)); // 5
```

Если два или большее количество элементов имеют одинаковое минимальное или максимальное значение, тогда MinBy или MaxBy возвращает первое:

```
Console.WriteLine (names.MinBy (n => n.Length)); // Tom
```

Если входная последовательность пуста, то операции MinBy и MaxBy возвращают null, если тип элемента допускает значение null (или генерирует исключение, если тип элемента не допускает null).

DefaultIfEmpty

Операция DefaultIfEmpty возвращает последовательность с единственным элементом, значением которого будет default(TSource), если входная последовательность не содержит элементов. В противном случае она возвращает неизмененную входную последовательность. Операция DefaultIfEmpty применяется при написании плоских внутренних соединений: за деталями обращайтесь в разделы “Выполнение внешних соединений с помощью SelectMany” и “Плоские внешние соединения” ранее в главе.

Методы агрегирования

IEnumerable<TSource> → скаляр

Метод	Описание	Эквиваленты в SQL
Count, LongCount	Возвращают количество элементов во входной последовательности, необязательно удовлетворяющих предикату	COUNT (...)
Min, Max	Возвращают наименьший или наибольший элемент в последовательности	MIN (...), MAX (...)
Sum, Average	Подсчитывают числовую сумму или среднее значение для элементов в последовательности	SUM (...), AVG (...)
Aggregate	Выполняет специальное агрегирование	Генерируется исключение

Count и LongCount

Аргумент	Тип
Входная последовательность	IEnumerable<TSource>
Предикат (необязательный)	TSource => bool

Операция Count просто выполняет перечисление последовательности, возвращая количество элементов:

```
int fullCount = new int[] { 5, 6, 7 }.Count(); // 3
```

Внутренняя реализация метода Enumerable.Count проверяет входную последовательность на предмет реализации ею интерфейса ICollection<T>. Если он реализован, тогда просто производится обращение к свойству

`ICollection<T>.Count`. В противном случае осуществляется перечисление по элементам последовательности с инкрементированием счетчика.

Можно дополнительно указать предикат:

```
int digitCount = "pa55w0rd".Count (c => char.IsDigit (c)); // 3
```

Операция `LongCount` делает ту же работу, что и `Count`, но возвращает 64-битное целочисленное значение, позволяя последовательностям содержать более двух миллиардов элементов.

Min И Max

Аргумент	Тип
Входная последовательность	<code>IEnumerable<TSource></code>
Селектор результатов (необязательный)	<code>TSource => TResult</code>

Операции `Min` и `Max` возвращают наименьший или наибольший элемент из последовательности:

```
int[] numbers = { 28, 32, 14 };
int smallest = numbers.Min(); // 14;
int largest = numbers.Max(); // 32;
```

Если указано выражение селектора, тогда каждый элемент сначала проецируется:

```
int smallest = numbers.Max (n => n % 10); // 8;
```

Выражение селектора будет обязательным, если элементы сами по себе не являются внутренне сопоставимыми — другими словами, если они не реализуют интерфейс `IComparable<T>`:

```
Purchase runtimeError = dbContext.Purchases.Min (); // Ошибка
decimal? lowestPrice = dbContext.Purchases.Min (p => p.Price); // Нормально
```

Выражение селектора определяет не только то, как элементы сравниваются, но также и финальный результат. В предыдущем примере финальным результатом оказывается десятичное значение, а не объект покупки. Для получения самой дешевой покупки понадобится подзапрос:

```
Purchase cheapest = dbContext.Purchases
    .Where (p => p.Price == dbContext.Purchases.Min (p2 => p2.Price))
    .FirstOrDefault();
```

В данном случае можно было бы сформулировать запрос без агрегации за счет использования операции `OrderBy` и затем `FirstOrDefault`.

Sum И Average

Аргумент	Тип
Входная последовательность	<code>IEnumerable<TSource></code>
Селектор результатов (необязательный)	<code>TSource => TResult</code>

`Sum` и `Average` представляют собой операции агрегирования, которые применяются подобно `Min` и `Max`:

```
decimal[] numbers = { 3, 4, 8 };
decimal sumTotal = numbers.Sum(); // 15
decimal average = numbers.Average(); // 5 (среднее значение)
```

Следующий запрос возвращает общую длину всех строк в массиве `names`:

```
int combinedLength = names.Sum (s => s.Length); // 19
```

Операции `Sum` и `Average` довольно ограничены в своей типизации. Их определения жестко привязаны к каждому числовому типу (`int`, `long`, `float`, `double`, `decimal`, а также версии этих типов, допускающие `null`). Напротив, операции `Min` и `Max` могут напрямую оперировать на всех типах, которые реализуют интерфейс `IComparable<T>` — например, `string`.

Более того, операция `Average` всегда возвращает либо тип `decimal`, либо тип `double` в соответствии со следующей таблицей.

Тип селектора	Тип результата
<code>decimal</code>	<code>decimal</code>
<code>float</code>	<code>float</code>
<code>int, long, double</code>	<code>double</code>

Это значит, что показанный ниже код не скомпилируется (будет выдано сообщение о невозможности преобразования `double` в `int`):

```
int avg = new int[] { 3, 4 }.Average();
```

Но следующий код скомпилируется:

```
double avg = new int[] { 3, 4 }.Average(); // 3.5
```

Операция `Average` неявно повышает входные значения, чтобы избежать потери точности. Выше в примере мы усредняем целочисленные значения и получаем 3.5 без необходимости в приведении входного элемента:

```
double avg = numbers.Average (n => (double) n);
```

При запрашивании базы данных операции `Sum` и `Average` транслируются в стандартные агрегации SQL. Представленный далее запрос возвращает заказчиков, у которых средняя покупка превышает сумму \$500:

```
from c in dbContext.Customers
where c.Purchases.Average (p => p.Price) > 500
select c.Name;
```

Aggregate

Операция `Aggregate` позволяет указывать специальный алгоритм накопления для реализации необычных агрегаций. Операция `Aggregate` в EF Core не поддерживается, а сценарии ее использования стоят несколько особняком. Ниже показано, как с помощью `Aggregate` выполнить работу операции `Sum`:

```
int[] numbers = { 1, 2, 3 };
int sum = numbers.Aggregate (0, (total, n) => total + n); // 6
```

Первым аргументом операции `Aggregate` является *начальное значение*, с которого стартует накопление. Второй аргумент — выражение для обновления накопленного значения заданным новым элементом. Можно дополнительно предоставить третий аргумент, предназначенный для проецирования финального результирующего значения из накопленного значения.



Большинство задач, для которых была спроектирована операция `Aggregate`, можно легко решить с помощью цикла `foreach` — к тому же с применением более знакомого синтаксиса. Преимущество использования `Aggregate` заключается в том, что построение крупных или сложных агрегаций может быть автоматически распараллелено посредством PLINQ (см. главу 22).

Агрегации без начального значения

При вызове операции `Aggregate` начальное значение может быть опущено; тогда первый элемент становится *неявным начальным значением* и агрегация продолжается со второго элемента. Ниже приведен предыдущий пример *без использования начального значения*:

```
int[] numbers = { 1, 2, 3 };
int sum = numbers.Aggregate ((total, n) => total + n); // 6
```

Он дает тот же результат, что и ранее, но здесь выполняется *другое вычисление*. В предшествующем примере мы вычисляли $0+1+2+3$, а теперь вычисляем $1+2+3$. Лучше проиллюстрировать отличие поможет указание умножения вместо сложения:

```
int[] numbers = { 1, 2, 3 };
int x = numbers.Aggregate (0, (prod, n) => prod * n); // 0*1*2*3 = 0
int y = numbers.Aggregate ( (prod, n) => prod * n); // 1*2*3 = 6
```

Как будет показано в главе 22, агрегации без начального значения обладают преимуществом параллелизма, не требуя применения специальных перегруженных версий. Тем не менее, с такими агрегациями связан ряд проблем.

Проблемы с агрегациями без начального значения

Методы агрегации без начального значения рассчитаны на использование с делегатами, которые являются *коммутативными* и *ассоциативными*. В случае их применения по-другому результат будет либо *непонятным* (в обычных запросах), либо *недетерминированным* (при распараллеливании запроса с помощью PLINQ). Например, рассмотрим следующую функцию:

```
(total, n) => total + n * n
```

Она не коммутативна и не ассоциативна. (Скажем, $1 + 2 * 2 \neq 2 + 1 * 1$). Давайте посмотрим, что произойдет, если мы воспользуемся ею для суммирования квадратов чисел 2, 3 и 4:

```
int[] numbers = { 2, 3, 4 };
int sum = numbers.Aggregate ((total, n) => total + n * n); // 27
```

Вместо вычисления:

```
2*2 + 3*3 + 4*4 // 29
```

она вычисляет вот что:

```
2 + 3*3 + 4*4 // 27
```

Исправить ее можно несколькими способами. Для начала мы могли бы включить 0 в качестве первого элемента:

```
int[] numbers = { 0, 2, 3, 4 };
```

Это не только лишено элегантности, но будет еще и давать некорректные результаты при распараллеливании, поскольку PLINQ рассчитывает на ассоциативность функции, выбирая *несколько* элементов в качестве начальных. Чтобы проиллюстрировать сказанное, определим функцию агрегирования следующим образом:

```
f(total, n) => total + n * n
```

Вот как ее вычислит инфраструктура LINQ to Objects:

```
f(f(f(0, 2), 3), 4)
```

В то же время PLINQ может делать такое:

```
f(f(0, 2), f(3, 4))
```

с приведенным ниже результатом:

Первая часть:	a = 0 + 2*2 (= 4)
Вторая часть:	b = 3 + 4*4 (= 19)
Финальный результат:	a + b*b (= 365)
ИЛИ ДАЖЕ ТАК:	b + a*a (= 35)

Существуют два надежных решения. Первое — превратить функцию в агрегацию с нулевым начальным значением. Единственная сложность в том, что для PLINQ потребовалось бы использовать специальную перегруженную версию функции, чтобы запрос не выполнялся последовательно (как объясняется в разделе “Оптимизация PLINQ” главы 22).

Второе решение предусматривает реструктуризацию запроса, так что функция агрегации становится коммутативной и ассоциативной:

```
int sum = numbers.Select (n => n * n).Aggregate ((total, n) => total + n);
```



Разумеется, в таких простых сценариях вы можете (и должны) применять операцию Sum вместо Aggregate:

```
int sum = numbers.Sum (n => n * n);
```

На самом деле с помощью только операций Sum и Average можно добиться довольно много. Например, Average можно использовать для вычисления среднеквадратического значения:

```
Math.Sqrt (numbers.Average (n => n * n))
```

и даже стандартного отклонения:

```

double mean = numbers.Average();
double sdev = Math.Sqrt (numbers.Average (n =>
{
    double dif = n - mean;
    return dif * dif;
}));
```

Оба примера безопасны, эффективны и поддаются распараллеливанию. В главе 22 мы приведем практический пример специальной агрегации, которая не может быть сведена к Sum или Average.

Квантификаторы

`IEnumerable<TSource> → значение bool`

Метод	Описание	Эквиваленты в SQL
Contains	Возвращает true, если входная последовательность содержит заданный элемент	WHERE ... IN (...)
Any	Возвращает true, если любой элемент удовлетворяет заданному предикату	WHERE ... IN (...)
All	Возвращает true, если все элементы удовлетворяют заданному предикату	WHERE (...)
SequenceEqual	Возвращает true, если вторая последовательность содержит элементы, идентичные элементам в первой последовательности	.

Contains и Any

Метод Contains принимает аргумент типа `TSource`, а Any — необязательный предикат.

Операция Contains возвращает true, если заданный элемент присутствует в последовательности:

```
bool hasAThree = new int[] { 2, 3, 4 }.Contains (3); // true
```

Операция Any возвращает true, если указанное выражение дает значение true хотя бы для одного элемента. Предшествующий пример можно переписать с применением операции Any:

```
bool hasAThree = new int[] { 2, 3, 4 }.Any (n => n == 3); // true
```

Операция Any может делать все, что делает Contains, и даже больше:

```
bool hasABigNumber = new int[] { 2, 3, 4 }.Any (n => n > 10); // false
```

Вызов метода Any без предиката приводит к возвращению true, если последовательность содержит один или большее число элементов. Ниже показан другой способ записи предыдущего запроса:

```
bool hasABigNumber = new int[] { 2, 3, 4 }.Where (n => n > 10).Any();
```

Операция Any особенно удобна в подзапросах и часто используется при за-прашивании баз данных, например:

```
from c in dbContext.Customers
where c.Purchases.Any (p => p.Price > 1000)
select c
```

All и SequenceEqual

Операция All возвращает true, если все элементы удовлетворяют предикату. Следующий запрос возвращает заказчиков с покупками на сумму меньше \$100:

```
dbContext.Customers.Where (c => c.Purchases.All (p => p.Price < 100));
```

Операция SequenceEqual сравнивает две последовательности. Для возвращения true обе последовательности должны иметь идентичные элементы, расположенные в одинаковом порядке. Можно дополнительно указать компаратор эквивалентности; по умолчанию применяется EqualityComparer<T>.Default.

Методы генерации

Ничего на входе → IEnumerable<TResult>

Метод	Описание
Empty	Создает пустую последовательность
Repeat	Создает последовательность повторяющихся элементов
Range	Создает последовательность целочисленных значений

Empty, Repeat и Range являются статическими (не расширяющими) методами, которые создают простые локальные последовательности.

Empty

Метод Empty создает пустую последовательность и требует только аргумента типа:

```
foreach (string s in Enumerable.Empty<string>())
    Console.WriteLine(s); // <ничего>
```

В сочетании с операцией ?? метод Empty выполняет действие, противоположное действию метода DefaultIfEmpty. Например, предположим, что имеется зубчатый массив целых чисел, и требуется получить все целые числа в виде единственного плоского списка. Следующий запрос SelectMany терпит неудачу, если любой из внутренних массивов оказывается null:

```
int[][] numbers =
{
    new int[] { 1, 2, 3 },
    new int[] { 4, 5, 6 },
    null           // Это значение null приводит к отказу запроса
};
IEnumerable<int> flat = numbers.SelectMany (innerArray => innerArray);
```

Проблема решается за счет использования комбинации метода `Empty` с операцией `??`:

```
IEnumerable<int> flat = numbers
    .SelectMany (innerArray => innerArray ?? Enumerable.Empty <int>());
foreach (int i in flat)
    Console.Write (i + " ");      // 1 2 3 4 5 6
```

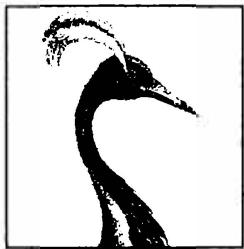
Range и Repeat

Метод `Range` принимает начальный индекс и счетчик (оба значения являются целочисленными):

```
foreach (int i in Enumerable.Range (5, 3))
    Console.Write (i + " ");      // 5 6 7
```

Метод `Repeat` принимает элемент, подлежащий повторению, и количество повторений:

```
foreach (bool x in Enumerable.Repeat (true, 3))
    Console.Write (x + " ");      // True True True
```



10

LINQ to XML

Платформа .NET предоставляет несколько API-интерфейсов для работы с XML-данными. Основным выбором для универсальной обработки XML-документов является инфраструктура LINQ to XML, которая состоит из легковесной, дружественной к LINQ объектной модели XML-документа и набора дополнительных операций запросов.

В настоящей главе мы сосредоточим внимание целиком на LINQ to XML. В главе 11 мы раскроем однонаправленные средства чтения/записи XML, а в дополнительных материалах, доступных на веб-сайте издательства, обсудим типы для работы со схемами и таблицами стилей. Кроме того, платформа .NET включает унаследованную объектную модель документа (*document object model — DOM*), основанную на классе `XmlDocument`, которая здесь не рассматривается.



DOM-модель LINQ to XML исключительно хорошо спроектирована и отличается высокой производительностью. Даже без LINQ эта модель полезна в качестве легковесного фасада для низкоуровневых классов `XmlReader` и `XmlWriter`.

Все типы LINQ to XML определены в пространстве имен `System.Xml.Linq`.

Обзор архитектуры

Раздел начинается с очень краткого введения в концепции DOM-модели и продолжается объяснением логических обоснований, лежащих в основе DOM-модели LINQ to XML.

Что собой представляет DOM-модель

Рассмотрим следующее содержимое XML-файла:

```
<?xml version=1.0 encoding=utf-8?>
<customer id=123 status=archived>
  <firstname>Joe</firstname>
  <lastname>Bloggs</lastname>
</customer>
```

Как и все XML-файлы, он начинается с объявления, после которого следует корневой элемент по имени `customer`. Элемент `customer` имеет два атрибута, с каждым из которых связано имя (`id` и `status`) и значение ("123" и "archived"). Внутри `customer` присутствуют два дочерних элемента, `firstname` и `lastname`, каждый из которых имеет простое текстовое содержимое ("Joe" и "Bloggs").

Каждая из упомянутых выше конструкций — объявление, элемент, атрибут, значение и текстовое содержимое — может быть представлена с помощью класса. А если такие классы имеют свойства коллекций для хранения дочернего содержимого, то для полного описания документа мы можем построить дерево объектов. Это и называется объектной моделью документа, или DOM-моделью.

DOM-модель LINQ to XML

Инфраструктура LINQ to XML состоит из двух частей:

- DOM-модель XML, которую мы называем X-DOM;
- набор из примерно десятка дополнительных операций запросов.

Как и можно было ожидать, модель X-DOM состоит из таких типов, как `XDocument`, `XElement` и `XAttribute`. Интересно отметить, что типы X-DOM не привязаны к LINQ — модель X-DOM можно загружать, создавать ее экземпляры, обновлять и сохранять вообще без написания каких-либо запросов LINQ.

И наоборот, LINQ можно использовать для выдачи запросов к DOM-модели, созданной старыми типами, совместимыми с W3C. Однако такой подход утомителен и обладает ограниченными возможностями. Отличительной особенностью модели X-DOM является дружественность к LINQ, что означает следующее:

- она имеет методы, выпускающие удобные последовательности `IEnumerable`, которые можно запрашивать;
- ее конструкторы спроектированы так, что дерево X-DOM можно построить посредством проецирования LINQ.

Обзор модели X-DOM

На рис. 10.1 показаны основные типы модели X-DOM. Самым часто применяемым типом является `XElement`. Тип `XObject` представляет собой корень иерархии наследования, а типы `XElement` и `XDocument` — корни иерархии включения. На рис. 10.2 изображено дерево X-DOM, созданное из приведенного ниже кода:

```
string xml = @<customer id='123' status='archived'>
    <firstname>Joe</firstname>
    <lastname>Bloggs<!--nice name--></lastname>
</customer>;
XElement customer = XElement.Parse (xml);
```

Тип `XObject` является абстрактным базовым классом для всего XML-содержимого. Он определяет ссылку на элемент `Parent` в контейнерном дереве, а также необязательный объект `XDocument`.

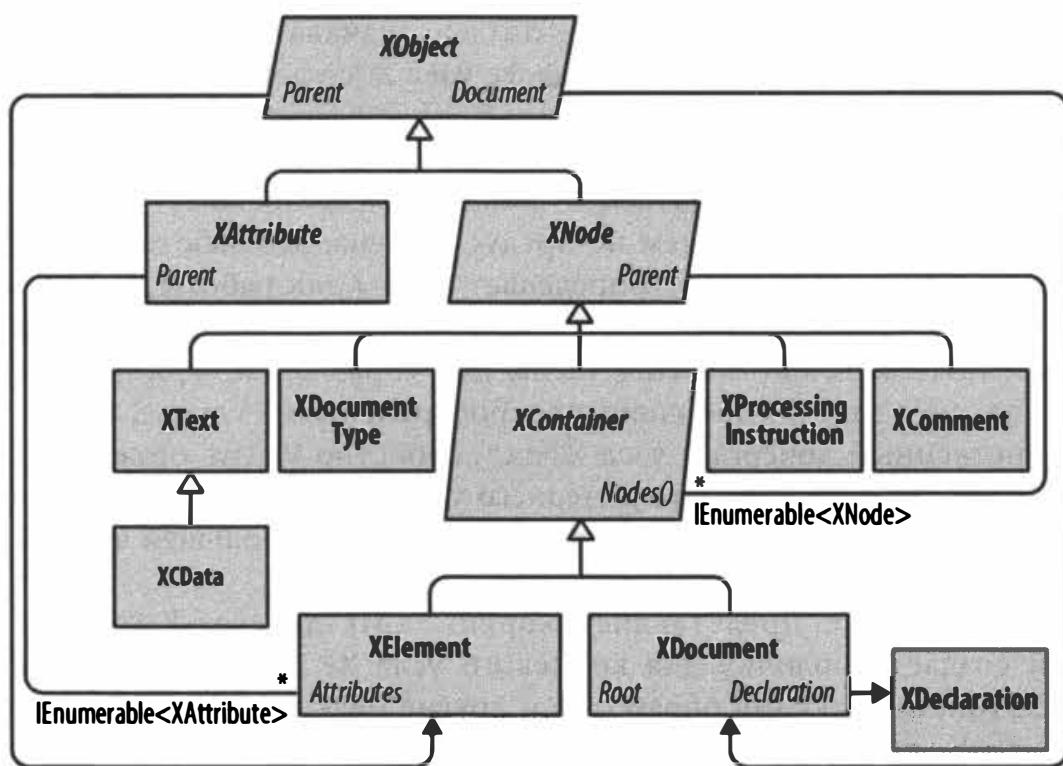


Рис. 10.1. Основные типы X-DOM

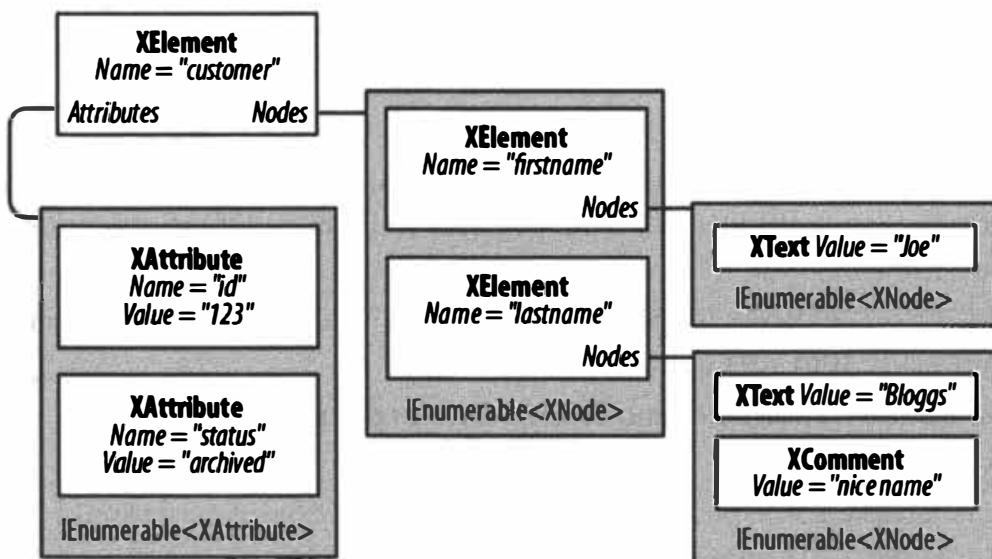


Рис. 10.2. Простое дерево X-DOM

Тип **XNode** — базовый класс для большей части XML-содержимого, исключая атрибуты. Отличительная особенность объекта **XNode** в том, что он может находиться в упорядоченной коллекции смешанных типов **XNode**. Например, взгляните на такой XML-код:

```

<data>
  Hello world
  <subelement1/>
  <!--comment-->
  <subelement2/>
</data>
    
```

Внутри родительского элемента `<data>` сначала определен узел `XText` (`Hello world`), затем узел `XElement`, далее узел `XComment` и, наконец, еще один узел `XElement`. Напротив, объект `XAttribute` будет допускать в качестве равноправных узлов только другие объекты `XAttribute`.

Хотя `XNode` может обращаться к своему родительскому узлу `XElement`, концепция дочерних узлов в нем не предусмотрена: это забота его подклассов `XContainer`. Класс `XContainer` определяет члены для работы с дочерними узлами и является абстрактным базовым классом для `XElement` и `XDocument`.

В классе `XElement` определены члены для управления атрибутами, а также члены `Name` и `Value`. В (довольно распространенном) случае, когда элемент имеет единственный дочерний узел `XText`, свойство `Value` объекта `XElement` инкапсулирует содержимое этого дочернего узла для операций `get` и `set`, устраняя излишнюю навигацию. Благодаря `Value` можно по большей части избежать прямого взаимодействия с узлами `XText`.

Класс `XDocument` представляет корень XML-дерева. Выражаясь более точно, он создает оболочку для корневого узла `XElement`, добавляя объект `XDeclaration`, инструкции обработки и другие мелкие детали корневого уровня. В отличие от DOM-модели W3C использовать класс `XDocument` необязательно: вы можете загружать, манипулировать и сохранять модель X-DOM, даже не создавая объект `XDocument`! Необходимость `XDocument` также означает возможность эффективного и легкого перемещения поддерева узла в другую иерархию X-DOM.

Загрузка и разбор

Классы `XElement` и `XDocument` предоставляют статические методы `Load` и `Parse`, предназначенные для построения дерева X-DOM из существующего источника:

- метод `Load` строит дерево X-DOM из файла, URI, объекта `Stream`, `TextReader` или `XmlReader`;
- метод `Parse` строит дерево X-DOM из строки.

Например:

```
XDocument fromWeb = XDocument.Load ("http://albahari.com/sample.xml");
 XElement fromFile = XElement.Load (@e:\media\somefile.xml);
 XElement config = XElement.Parse (
 @"<configuration>
    <client enabled='true'>
        <timeout>30</timeout>
    </client>
</configuration>");
```

В последующих разделах мы покажем, каким образом выполнять обход и обновление дерева X-DOM. В качестве краткого обзора взгляните, как манипулировать только что наполненным элементом `config`:

```
foreach ( XElement child in config.Elements())
    Console.WriteLine (child.Name); // client
 XElement client = config.Element ("client");
```

```
bool enabled = (bool) client.Attribute ("enabled"); // Прочитать атрибут
Console.WriteLine (enabled); // True
client.Attribute ("enabled").SetValue (!enabled); // Обновить атрибут
int timeout = (int) client.Element ("timeout"); // Прочитать элемент
Console.WriteLine (timeout); // 30
client.Element ("timeout").SetValue (timeout * 2); // Обновить элемент
client.Add (new XElement ("retries", 3)); // Добавить новый элемент
Console.WriteLine (config); // Неявно вызвать метод config.ToString
```

Ниже показан результат последнего вызова `Console.WriteLine`:

```
<configuration>
  <client enabled=false>
    <timeout>60</timeout>
    <retries>3</retries>
  </client>
</configuration>
```



Класс `XNode` также предоставляет статический метод `ReadFrom`, который создает экземпляр любого типа узла и наполняет его из `XmlReader`. В отличие от `Load` он останавливается после чтения одного (полного) узла, так что затем можно вручную продолжить чтение из `XmlReader`.

Можно также делать обратное действие и применять `XmlReader` или `XmlWriter` для чтения или записи `XNode` через методы `CreateReader` и `CreateWriter`.

Мы опишем средства чтения и записи XML и объясним, как ими пользоваться, в главе 11.

Сохранение и сериализация

Вызов метода `ToString` на любом узле преобразует его содержимое в XML-строку, сформированную с разрывами и отступами, как только что было показано. (Разрывы строки и отступы можно запретить, указав `SaveOptions.DisableFormatting` при вызове `ToString`.)

Классы `XElement` и `XDocument` также предлагают метод `Save`, который записывает модель X-DOM в файл, объект `Stream`, `TextWriter` или `XmlWriter`. Если указан файл, то автоматически записывается и XML-объявление. В классе `XNode` также определен метод `WriteTo`, который принимает объект `XmlWriter`.

Мы более подробно опишем обработку XML-объявлений при сохранении в разделе “Документы и объявления” далее в главе.

Создание экземпляра X-DOM

Вместо применения метода `Load` или `Parse` дерево X-DOM можно построить, вручную создавая объекты и добавляя их к родительскому узлу посредством метода `Add` класса `XContainer`.

Чтобы сконструировать объект `XElement` и `XAttribute`, нужно просто предоставить имя и значение:

```

XElement lastName = new XElement ("lastname", "Bloggs");
lastName.Add (new XComment ("nice name"));
XElement customer = new XElement ("customer");
customer.Add (new XAttribute ("id", 123));
customer.Add (new XElement ("firstname", "Joe"));
customer.Add (lastName);
Console.WriteLine (customer.ToString ());

```

Вот результат:

```

<customer id=123>
  <firstname>Joe</firstname>
  <lastname>Bloggs<!--nice name--></lastname>
</customer>

```

При конструировании объекта `XElement` указывать значение необязательно — можно задать только имя элемента, а содержимое добавить позже. Обратите внимание, что когда предоставляется значение, простой строки вполне достаточно — в явном создании и добавлении дочернего узла `XText` нет необходимости. Модель X-DOM выполняет эту работу автоматически, так что приходится иметь дело только со значениями.

Функциональное построение

В предыдущем примере получить представление об XML-структуре на основании кода довольно-таки нелегко. Модель X-DOM поддерживает другой режим создания объектов, который называется функциональным построением (понятие, взятое из функционального программирования). При функциональном построении в единственном выражении строится целое дерево:

```

 XElement customer =
    new XElement ("customer", new XAttribute ("id", 123),
      new XElement ("firstname", "joe"),
      new XElement ("lastname", "bloggs",
        new XComment ("nice name")
      )
    );

```

Такой подход обладает двумя преимуществами. Во-первых, код имеет сходство по форме с результирующим кодом XML. Во-вторых, он может быть включен в конструкцию `select` запроса LINQ. Например, следующий запрос выполняет проекцию из сущностного класса EF Core в модель X-DOM:

```

 XElement query =
  new XElement ("customers",
    from c in dbContext.Customers.AsEnumerable()
    select
      new XElement ("customer", new XAttribute ("id", c.ID),
        new XElement ("firstname", c.FirstName),
        new XElement ("lastname", c.LastName,
          new XComment ("nice name")
        )
      )
  );

```

Более подробно об этом пойдет речь в разделе “Проектирование в модель X-DOM” далее в главе.

Указание содержимого

Функциональное построение возможно из-за того, что конструкторы для XElement (и XDocument) перегружены с целью принятия массива типа object [] по имени params:

```
public XElement (XName name, params object[] content)
```

То же самое справедливо и в отношении метода Add в классе XContainer:

```
public void Add (params object[] content)
```

Таким образом, при построении или дополнении дерева X-DOM можно указывать любое количество дочерних объектов любых типов. Это работает, т.к. законным содержимым считается все, что угодно. Чтобы удостовериться в сказанном, необходимо посмотреть, как внутренне обрабатывается каждый объект содержимого. Ниже перечислены решения, которые по очереди принимает XContainer.

1. Если объект является null, то он игнорируется.
2. Если объект основан на XNode или XStreamingElement, тогда он добавляется в коллекцию Nodes в том виде, как есть.
3. Если объект является XAttribute, то он добавляется в коллекцию Attributes.
4. Если объект является строкой, тогда он помещается в узел XText и добавляется в коллекцию Nodes¹.
5. Если объект реализует интерфейс IEnumerable, то производится его перечисление с применением к каждому элементу тех же самых правил.
6. В противном случае объект преобразуется в строку, помещается в узел XText и затем добавляется в коллекцию Nodes².

В итоге все объекты попадают в одну из двух коллекций: Nodes или Attributes. Более того, любой объект является допустимым содержимым, потому что в конечном итоге на нем всегда можно вызывать метод ToString и трактовать его как узел XText.



Перед вызовом метода ToString на произвольном типе реализации XContainer сначала проверяет, не относится ли он к одному из следующих типов:

```
float, double, decimal, bool,  
DateTime, DateTimeOffset, TimeSpan
```

Если относится, тогда XContainer вызывает надлежащим образом типизированный метод ToString на вспомогательном классе XmlConvert вместо вызова ToString на самом объекте. Это гарантирует, что данные поддерживают обмен и совместимы со стандартными правилами форматирования XML.

¹ В действительности модель X-DOM внутренне оптимизирует данный шаг, храня простое текстовое содержимое в строке. Узел XText фактически не создается вплоть до вызова метода Nodes на XContainer.

² См. сноску 1.

Автоматическое глубокое копирование

Когда к элементу добавляется узел или атрибут (с помощью функционального построения либо посредством метода Add), ссылка на данный элемент присваивается свойству Parent добавляемого узла или атрибута. Узел может иметь только один родительский элемент: если вы добавляете узел, уже имеющий родительский элемент, ко второму родительскому элементу, то этот узел автоматически подвергается глубокому копированию. В следующем примере каждый заказчик имеет отдельную копию address:

```
var address = new XElement ("address",
    new XElement ("street", "Lawley St"),
    new XElement ("town", "North Beach")
);
var customer1 = new XElement ("customer1", address);
var customer2 = new XElement ("customer2", address);
customer1.Element ("address").Element ("street").Value = "Another St";
Console.WriteLine (
    customer2.Element ("address").Element ("street").Value); // Lawley St
```

Такое автоматическое дублирование сохраняет создание объектов модели X-DOM свободным от побочных эффектов — еще один признак функционального программирования.

Навигация и запросы

Как и можно было ожидать, в классах XNode и XContainer определены методы и свойства, предназначенные для обхода дерева X-DOM. Тем не менее, в отличие от обычной модели DOM такие методы и свойства не возвращают коллекцию, которая реализует интерфейс `IList<T>`. Взамен они возвращают либо одиночное значение, либо последовательность, реализующую интерфейс `IEnumerable<T>`, в отношении которой затем планируется выполнить запрос LINQ (или провести перечисление с помощью `foreach`). В результате появляется возможность запускать сложные запросы, а также решать простые задачи навигации с использованием знакомого синтаксиса запросов LINQ.



Имена элементов и атрибутов в X-DOM чувствительны к регистру — точно как в языке XML.

Навигация по дочерним узлам



Функции, помеченные звездочкой (*) в третьей колонке таблицы, также оперируют на *последовательностях* того же самого типа. Например, метод `Nodes` можно вызывать либо на объекте `XContainer`, либо на последовательности объектов `XContainer`. Такая возможность доступна благодаря расширяющим методам, которые определены в пространстве имен `System.Xml.Linq` — дополнительным операциям запросов, упомянутым в начале главы.

Возвращаемый тип	Члены	С чем работают
XNode	FirstNode { get; } LastNode { get; }	XContainer XContainer
IEnumerable<XNode>	Nodes() DescendantNodes() DescendantNodesAndSelf()	XContainer* XContainer* XElement*
XElement	Element(XName)	XContainer
IEnumerable< XElement >	Elements() Elements(XName) Descendants() Descendants(XName) DescendantsAndSelf() DescendantsAndSelf(XName)	XContainer* XContainer* XContainer* XContainer* XElement* XElement*
bool	HasElements { get; }	XElement

FirstNode, LastNode, Nodes

Свойства FirstNode и LastNode предоставляют прямой доступ к первому и последнему дочернему узлу; метод Nodes возвращает все дочерние узлы в виде последовательности. Все три функции принимают во внимание только непосредственных потомков. Например:

```
var bench = new XElement ("bench",
    new XElement ("toolbox",
        new XElement ("handtool", "Hammer"),
        new XElement ("handtool", "Rasp")
    ),
    new XElement ("toolbox",
        new XElement ("handtool", "Saw"),
        new XElement ("powertool", "Nailgun")
    ),
    new XComment ("Be careful with the nailgun")
);
foreach (XNode node in bench.Nodes())
    Console.WriteLine (node.ToString (SaveOptions.DisableFormatting) + ".");
```

Ниже показан вывод:

```
<toolbox><handtool>Hammer</handtool><handtool>Rasp</handtool></toolbox>.
<toolbox><handtool>Saw</handtool><powertool>Nailgun</powertool></toolbox>.
<!--Be careful with the nailgun-->.
```

Извлечение элементов

Метод Elements возвращает только дочерние узлы типа XElement:

```
foreach ( XElement e in bench.Elements())
    Console.WriteLine (e.Name + "=" + e.Value); // toolbox=HammerRasp
                                                // toolbox=SawNailgun
```

Следующий запрос LINQ находит ящик с пневматическим молотком (nail gun):

```
IEnumerable<string> query =
    from toolbox in bench.Elements()
    where toolbox.Elements().Any (tool => tool.Value == "Nailgun")
    select toolbox.Value;
```

Вот результат:

```
{ "SawNailgun" }
```

В приведенном далее примере запрос SelectMany применяется для извлечения ручных инструментов (hand tool) из всех ящиков:

```
IEnumerable<string> query =
    from toolbox in bench.Elements()
    from tool in toolbox.Elements()
    where tool.Name == "handtool"
    select tool.Value;
```

Вот результат:

```
{ "Hammer", "Rasp", "Saw" }
```



Сам по себе метод Elements является эквивалентом запроса LINQ в отношении Nodes. Предыдущий запрос можно было бы начать следующим образом:

```
from toolbox in bench.Nodes() .OfType< XElement >()
where ...
```

Метод Elements может также возвращать только элементы с заданным именем:

```
int x = bench.Elements ("toolbox") .Count(); // 2
```

Данный код эквивалентен такому коду:

```
int x = bench.Elements() .Where (e => e.Name == "toolbox") .Count(); // 2
```

Кроме того, Elements определен как расширяющий метод, который принимает реализацию интерфейса IEnumerable<XContainer> или точнее аргумент следующего типа:

```
IEnumerable<T> where T : XContainer
```

Это позволяет ему работать также и с последовательностями элементов. С использованием метода Elements запрос, который ищет ручные инструменты во всех ящиках, можно записать так:

```
from tool in bench.Elements ("toolbox") .Elements ("handtool")
select tool.Value;
```

Первый вызов Elements привязывается к методу экземпляра XContainer, а второй вызов Elements — к расширяющему методу.

Извлечение одиночного элемента

Метод Element (с именем в форме единственного числа) возвращает первый совпадающий элемент с заданным именем. Метод Element удобен для простой навигации вроде продемонстрированной ниже:

```
XElement settings = XElement.Load ("databaseSettings.xml");
string cx = settings.Element ("database") .Element ("connectString") .Value;
```

Вызов `Element` эквивалентен вызову метода `Elements` с последующим применением операции запроса `FirstOrDefault` языка LINQ с предикатом сопоставления по имени. Метод `Element` возвращает `null`, если запрошенный элемент не существует.



Вызов `Element("xyz").Value` сгенерирует исключение `NullReferenceException`, когда элемент `xyz` не существует. Если вместо исключения предпочтительнее получить значение `null`, тогда вместо обращения к свойству `Value` необходимо либо использовать null-условную операцию (`Element("xyz")?.Value`), либо привести `XElement` к типу `string`. Другими словами:

```
string xyz = (string) settings.Element("xyz");
```

Прием работает из-за того, что в классе `XElement` определено явное преобразование в `string`, предназначенное как раз для такой цели!

Извлечение потомков

Класс `XContainer` также предлагает методы `Descendants` и `DescendantNodes`, которые возвращают дочерние элементы либо узлы вместе со всеми их дочерними элементами и т.д. (целое дерево). Метод `Descendants` принимает необязательное имя элемента. Возвращаясь к ранее рассмотренному примеру, вот как применить метод `Descendants` для поиска ручных инструментов:

```
Console.WriteLine(bench.Descendants("handtool").Count()); // 3
```

Ниже продемонстрировано, что включаются и родительские, и листовые узлы:

```
foreach (XNode node in bench.DescendantNodes())
    Console.WriteLine(node.ToString(SaveOptions.DisableFormatting));
```

Вывод выглядит так:

```
<toolbox><handtool>Hammer</handtool><handtool>Rasp</handtool></toolbox>
<handtool>Hammer</handtool>
Hammer
<handtool>Rasp</handtool>
Rasp
<toolbox><handtool>Saw</handtool><powertool>Nailgun</powertool></toolbox>
<handtool>Saw</handtool>
Saw
<powertool>Nailgun</powertool>
Nailgun
<!--Be careful with the nailgun-->
```

Следующий запрос извлекает из дерева X-DOM все комментарии, которые содержат слово “careful”:

```
IEnumerable<string> query =
    from c in bench.DescendantNodes().OfType<XComment>()
    where c.Value.Contains("careful")
    orderby c.Value
    select c.Value;
```

Навигация по родительским узлам

Все классы XNode имеют свойство Parent и методы AncestorXXX, предназначенные для навигации по родительским узлам. Родительский узел всегда представляет собой объект XElement.

Возвращаемый тип	Члены	С чем работают
XElement	Parent { get; }	XNode
Enumerable<XElement>	Ancestors() Ancestors(XName) AncestorsAndSelf() AncestorsAndSelf(XName)	XNode XNode XElement XElement

Если x является XElement, тогда следующий код всегда выводит true:

```
foreach (XNode child in x.Nodes())
    Console.WriteLine (child.Parent == x);
```

Однако в случае, когда x представляет собой XDocument, все будет по-другому. Элемент XDocument особенный: он может иметь дочерние узлы, но никогда не может выступать родителем в отношении чего бы то ни было! Для доступа к XDocument должно использоваться свойство Document — оно работает на любом объекте в дереве X-DOM.

Метод Ancestors возвращает последовательность, первым элементом которой является Parent, следующим элементом — Parent.Parent и т.д. вплоть до корневого элемента.



Перейти к корневому элементу можно с помощью LINQ-запроса AncestorsAndSelf().Last().

Другой способ достигнуть того же результата предусматривает обращение к свойству Document.Root, хотя такой прием работает только при наличии XDocument.

Навигация по равноправным узлам

Возвращаемый тип	Члены	Определены в
bool	IsBefore(XNode node) IsAfter(XNode node)	XNode XNode
XNode	PreviousNode{ get; } NextNode{ get; }	XNode XNode
IEnumerable<XNode>	NodesBeforeSelf() NodesAfterSelf()	XNode XNode
IEnumerable< XElement >	ElementsBeforeSelf() ElementsBeforeSelf(XName name) ElementsAfterSelf() ElementsAfterSelf(XName name)	XNode XNode XNode XNode

С помощью свойств `PreviousNode` и `NextNode` (а также `FirstNode`/`LastNode`) узлы можно обходить с ощущением работы со связным списком. И это не случайно: внутренне узлы хранятся именно в связном списке.



Класс `XNode` внутренне применяет *односвязный* список, так что свойство `PreviousNode` не функционально.

Навигация по атрибутам

Возвращаемый тип	Члены	Определены в
<code>bool</code>	<code>HasAttributes { get; }</code>	<code>XElement</code>
<code>XAttribute</code>	<code>Attribute (XName name)</code> <code>FirstAttribute { get; }</code> <code>LastAttribute { get; }</code>	<code>XElement</code>
<code>IEnumerable<XAttribute></code>	<code>Attributes ()</code> <code>Attributes (XName name)</code>	<code>XElement</code> <code>XElement</code>

В добавок в `XAttribute` определены свойства `PreviousAttribute` и `NextAttribute`, а также `Parent`.

Метод `Attributes`, который принимает имя, возвращает последовательность с нулем или одним элементом; в XML элемент не может иметь дублированные имена атрибутов.

Обновление модели X-DOM

Обновлять элементы и атрибуты можно следующими способами:

- вызвать метод `SetValue` или переустановить свойство `Value`;
- вызвать метод `SetElementValue` или `SetAttributeValue`;
- вызвать один из методов `RemoveXXX`;
- вызвать один из методов `AddXXX` или `ReplaceXXX`, указав новое содержимое.

Можно также переустанавливать свойство `Name` объектов `XElement`.

Обновление простых значений

Члены	С чем работают
<code>SetValue (object value)</code>	<code>XElement, XAttribute</code>
<code>Value { get; set }</code>	<code>XElement, XAttribute</code>

Метод `SetValue` заменяет содержимое элемента или атрибута простым значением. Установка свойства `Value` делает то же самое, но принимает только строковые данные. Мы подробно опишем эти функции в разделе “Работа со значениями” далее в главе.

Эффект от вызова метода `SetValue` (или переустановки свойства `Value`) заключается в замене всех дочерних узлов:

```
XElement settings = new XElement ("settings",
    new XElement ("timeout", 30)
);
settings.SetValue ("blah");
Console.WriteLine (settings.ToString()); // <settings>blah</settings>
```

Обновление дочерних узлов и атрибутов

Категория	Члены	С чем работают
Добавление	Add (params object[] content) AddFirst (params object[] content)	XContainer XContainer
Удаление	RemoveNodes() RemoveAttributes() RemoveAll()	XContainer XElement XElement
Обновление	ReplaceNodes (params object[] content) ReplaceAttributes (params object[] content) ReplaceAll (params object[] content) SetElementValue (XName name, object value) SetAttributeValue (XName name, object value)	XContainer XElement XElement XElement XElement

Наиболее удобными методами в данной группе являются последние два: `SetElementValue` и `SetAttributeValue`. Они служат сокращениями для создания экземпляра `XElement` либо `XAttribute` и затем его добавления посредством `Add` к родительскому узлу с заменой любого существующего элемента или атрибута, имеющего такое же имя:

```
XElement settings = new XElement ("settings");
settings.SetElementValue ("timeout", 30); // Добавляет дочерний узел
settings.SetElementValue ("timeout", 60); // Обновляет его значением 60
```

Метод `Add` добавляет дочерний узел к элементу или документу. Метод `AddFirst` делает то же самое, но вставляет узел в начало коллекции, а не в ее конец. С помощью метода `RemoveNodes` или `RemoveAttributes` можно удалить все дочерние узлы или атрибуты за один раз. Метод `RemoveAll` представляет собой эквивалент вызова обоих указанных методов.

Методы `ReplaceXXX` являются эквивалентами вызова сначала `RemoveXXX`, а затем `AddXXX`. Они получают копию входных данных, так что `e.ReplaceNodes (e.Nodes ())` работает ожидаемым образом.

Обновление через родительский элемент

Члены	С чем работают
AddBeforeSelf (params object[] content)	XNode
AddAfterSelf (params object[] content)	XNode
Remove()	XNode, XAttribute
ReplaceWith (params object[] content)	XNode

Методы AddBeforeSelf, AddAfterSelf, Remove и ReplaceWith не оперируют на дочерних узлах заданного узла. Взамен они работают с коллекцией, в которой находится сам узел. Это требует, чтобы узел имел родительский элемент — иначе генерируется исключение. Методы AddBeforeSelf и AddAfterSelf удобны для вставки узла в произвольную позицию:

```
XElement items = new XElement ("items",
    new XElement ("one"),
    new XElement ("three")
);
items.FirstNode.AddAfterSelf (new XElement ("two"));
```

Ниже показан результат:

```
<items><one /><two /><three /></items>
```

Вставка в произвольную позицию внутри длинной последовательности элементов на самом деле довольно эффективна, поскольку внутренне узлы хранятся в связном списке.

Метод Remove удаляет текущий узел из его родительского узла. Метод ReplaceWith делает то же самое, но затем вставляет в ту же самую позицию другое содержимое. Например:

```
XElement items = XElement.Parse ("<items><one/><two/><three/></items>");
items.FirstNode.ReplaceWith (new XComment ("one was here"));
```

Вот результат:

```
<items><!--one was here--><two /><three /></items>
```

Удаление последовательности узлов или атрибутов

Благодаря расширяющим методам из пространства имен System.Xml.Linq метод Remove можно также вызывать на последовательности узлов или атрибутов. Взгляните на следующую модель X-DOM:

```
XElement contacts = XElement.Parse (
@<contacts>
<customer name='Mary' />
<customer name='Chris' archived='true' />
<supplier name='Susan'>
    <phone archived='true'>012345678<!--confidential--></phone>
</supplier>
</contacts>");
```

Приведенный ниже вызов удаляет всех заказчиков:

```
contacts.Elements ("customer").Remove();
```

Следующий оператор удаляет все архивные (“archived”) контакты (так что запись для Chris больше не будет видна):

```
contacts.Elements ().Where (e => (bool?) e.Attribute ("archived") == true)
    .Remove();
```

Если мы заменим вызов метода Elements вызовом Descendants, то все архивные элементы в DOM-модели больше не будут видны, и результат окажется следующим:

```
<contacts>
  <customer name=Mary />
  <supplier name=Susan />
</contacts>
```

В показанном ниже примере удаляются все контакты, которые имеют комментарий “*confidential*” (конфиденциально) в любом месте своего дерева:

```
contacts.Elements().Where (e => e.DescendantNodes()
                            .OfType<XComment>()
                            .Any (c => c.Value == "confidential")
                           ).Remove();
```

Результат будет таким:

```
<contacts>
  <customer name=Mary />
  <customer name=Chris archived=true />
</contacts>
```

Сравните это со следующим более простым запросом, который удаляет все узлы комментариев из дерева:

```
contacts.DescendantNodes().OfType<XComment>().Remove();
```



Внутренне метод Remove сначала читает все совпадающие элементы во временный список, после чего организует его перечисление, чтобы выполнить удаление. Такой подход позволяет избежать ошибок, которые могут в противном случае возникнуть из-за удаления и запрашивания в один и тот же момент.

Работа со значениями

В классах XElement и XAttribute определено свойство Value типа string. Если элемент имеет единственный дочерний узел XText, тогда свойство Value класса XElement действует в качестве удобного сокращения для доступа к содержащему такого узла. В случае класса XAttribute свойство Value — это просто значение атрибута.

Несмотря на отличия в хранении, модель X-DOM предоставляет согласованный набор операций для работы со значениями элементов и атрибутов.

Установка значений

Существуют два способа присваивания значения: вызов метода SetValue или установка свойства Value. Метод SetValue гибче, т.к. он принимает не только строки, но и другие простые типы данных:

```
var e = new XElement ("date", DateTime.Now);
e.SetValue (DateTime.Now.AddDays(1));
Console.WriteLine (e.Value); // 2019-10-02T16:39:10.734375+09:00
```

Мы могли бы взамен просто установить свойство Value элемента, но тогда пришлось бы вручную преобразовывать значение DateTime в строку. Такое дей-

ствие сложнее обычного вызова метода `ToString`, потому что требует использования класса `XmlConvert` для получения результата, совместимого с XML.

Когда конструктору класса `XElement` или `XAttribute` передается значение, то же самое автоматическое преобразование выполняется для нестроковых типов. В результате гарантируется корректность форматирования значений `DateTime`; значение `true` записывается в нижнем регистре, а `double.NegativeInfinity` записывается в виде `-INF`.

Получение значений

Чтобы пойти другим путем и разобрать значение `Value` обратно в базовый тип, необходимо лишь привести `XElement` или `XAttribute` к желаемому типу. Прием выглядит так, как будто он не должен работать — но он работает! Например:

```
XElement e = new XElement ("now", DateTime.Now);
DateTime dt = (DateTime) e;

XAttribute a = new XAttribute ("resolution", 1.234);
double res = (double) a;
```

Элемент или атрибут не хранит значения `DateTime` или числа в их естественной форме — они всегда хранятся в виде текста и при необходимости разбираются. Кроме того, исходный тип не запоминается, поэтому приводить нужно корректно, чтобы избежать ошибки во время выполнения. Для повышения надежности кода приведение можно поместить в блок `try/catch`, перехватывающий исключение `FormatException`.

Явные приведения `XElement` и `XAttribute` могут обеспечить разбор в следующие типы:

- все стандартные числовые типы;
- типы `string`, `bool`, `DateTime`, `DateTimeOffset`, `TimeSpan` и `Guid`;
- версии `Nullable<T>` вышеупомянутых типов значений.

Приведение к типу, допускающему `null`, удобно применять в сочетании с методами `Element` и `Attribute`, т.к. даже если запрошенное имя не существует, то приведение все равно работает. Например, если `x` не имеет элемента `timeout`, тогда первая строка генерирует ошибку во время выполнения, а вторая — нет:

```
int timeout = (int) x.Element ("timeout"); // Ошибка
int? timeout = (int?) x.Element ("timeout"); // Нормально; timeout равно null
```

С помощью операции `??` в финальном результате можно избавиться от типа, допускающего `null`. Если атрибут `resolution` не существует, то переменная `resolution` получит значение `1.0`:

```
double resolution = (double?) x.Attribute ("resolution") ?? 1.0;
```

Тем не менее, приведение к типу, допускающему `null`, не избавит от неприятностей, если элемент или атрибут существует и имеет пустое (либо неправильно сформированное) значение. Для этого придется перехватывать исключение `FormatException`.

Приведения можно также использовать в запросах LINQ. Представленный ниже запрос возвращает John:

```
var data = XElement.Parse (   
    @<data>  
        <customer id='1' name='Mary' credit='100' />  
        <customer id='2' name='John' credit='150' />  
        <customer id='3' name='Anne' />  
    </data>);  
  
IEnumerable<string> query = from cust in data.Elements()  
                           where (int?) cust.Attribute ("credit") > 100  
                           select cust.Attribute ("name").Value;
```

Приведение к типу int, допускающему null, позволяет избежать исключения NullReferenceException для заказчика Anne, у которого отсутствует атрибут credit. Другое решение могло бы предусматривать добавление предиката в конструкцию where:

```
where cust.Attributes ("credit").Any() && (int) cust.Attribute...
```

Те же самые принципы применяются при запрашивании значений элементов.

Значения и узлы со смешанным содержимым

Имея доступ к значению Value, может возникнуть вопрос о том, нужно ли вообще работать напрямую с узлами XText? Да, если они имеют смешанное содержимое. Например:

```
<summary>An XAttribute is <b>not</b> an XNode</summary>
```

Простого свойства Value для захвата содержимого summary недостаточно. В элементе summary присутствуют три дочерних узла: XText, XElement и XText. Вот как их сконструировать:

```
XElement summary = new XElement ("summary",  
    new XText ("An XAttribute is "),  
    new XElement ("bold", "not"),  
    new XText (" an XNode"));
```

Интересно отметить, что мы по-прежнему можем обращаться к свойству Value элемента summary без генерации исключения. Взамен мы получаем конкатенацию значений всех дочерних узлов:

```
An XAttribute is not an XNode
```

Также разрешено переустанавливать свойство Value элемента summary ценой замены всех предыдущих дочерних узлов единственным новым узлом XText.

Автоматическая конкатенация XText

При добавлении простого содержимого в XElement модель X-DOM дополняет существующий дочерний узел XText, а не создает новый. В следующих примерах e1 и e2 получают только один дочерний элемент XText со значением HelloWorld:

```
var e1 = new XElement ("test", "Hello"); e1.Add ("World");
var e2 = new XElement ("test", "Hello", "World");
```

Однако если узлы XText создаются специально, тогда дочерних элементов будет несколько:

```
var e = new XElement ("test", new XText ("Hello"), new XText ("World"));
Console.WriteLine (e.Value);                                // HelloWorld
Console.WriteLine (e.Nodes ().Count());                     // 2
```

Объект XElement не выполняет конкатенацию двух узлов XText, поэтому идентичности объектов узлов предохраняются.

Документы и объявления

XDocument

Как упоминалось ранее, объект XDocument является оболочкой для корневого элемента XElement и позволяет добавлять элемент XDeclaration, инструкции обработки, тип документа и комментарии корневого уровня. Объект XDocument не является обязательным и может быть проигнорирован или опущен: в отличие от DOM-модели W3C он не служит средством объединения всего вместе.

Класс XDocument предлагает те же самые функциональные конструкторы, что и класс XElement. И поскольку он основан на XContainer, в нем также поддерживаются методы AddXXX, RemoveXXX и ReplaceXXX. Тем не менее, в отличие от XElement класс XDocument может принимать только ограниченное содержимое:

- единственный объект XElement (“корень”);
- единственный объект XDeclaration;
- единственный объект XDocumentType (для ссылки на DTD (Document Type Definition — определение типа документа));
- любое количество объектов XProcessingInstruction;
- любое количество объектов XComment.



Для получения допустимого объекта XDocument из всего перечисленного обязательным считается только корневой объект XElement. Объект XDeclaration необязателен — при его отсутствии во время сериализации применяются стандартные настройки.

Простейший допустимый XDocument имеет только корневой элемент:

```
var doc = new XDocument (
    new XElement ("test", "data")
);
```

Обратите внимание, что мы не включили объект XDeclaration. Однако файл, созданный в результате вызова метода doc.Save, будет по-прежнему содержать XML-объявление, потому что оно генерируется по умолчанию.

В следующем примере создается простой, но корректный XHTML-файл, иллюстрирующий все конструкции, которые может принимать XDocument:

```
var styleInstruction = new XProcessingInstruction (
    "xml-stylesheet", "href='styles.css' type='text/css'");
var docType = new XDocumentType ("html",
    "-//W3C//DTD XHTML 1.0 Strict//EN",
    "http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-strict.dtd", null);
XNamespace ns = "http://www.w3.org/1999/xhtml";
var root =
    new XElement (ns + "html",
        new XElement (ns + "head",
            new XElement (ns + "title", "An XHTML page")),
        new XElement (ns + "body",
            new XElement (ns + "p", "This is the content")));
);
var doc =
    new XDocument (
        new XDeclaration ("1.0", "utf-8", "no"),
        new XComment ("Reference a stylesheet"),
        styleInstruction,
        docType,
        root);
doc.Save ("test.html");
```

Ниже показано содержимое результирующего файла test.html:

```
<?xml version=1.0 encoding=utf-8 standalone=no?>
<!--Reference a stylesheet-->
<?xml-stylesheet href='styles.css' type='text/css'?>
<!DOCTYPE html PUBLIC "-//W3C//DTD XHTML 1.0 Strict//EN"
    "http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-strict.dtd">
<html xmlns=http://www.w3.org/1999/xhtml>
    <head>
        <title>An XHTML page</title>
    </head>
    <body>
        <p>This is the content</p>
    </body>
</html>
```

Класс XDocument имеет свойство Root, которое служит сокращением для доступа к единственному объекту XElement документа. Обратная ссылка предоставляется свойством Document класса XObject, которая работает для всех объектов в дереве:

```
Console.WriteLine (doc.Root.Name.LocalName);           // html
 XElement bodyNode = doc.Root.Element (ns + "body");
 Console.WriteLine (bodyNode.Document == doc);          // True
```

Вспомните, что дочерние узлы документа не имеют родительского элемента:

```
Console.WriteLine (doc.Root.Parent == null);           // True
foreach (XNode node in doc.Nodes())
    Console.WriteLine (node.Parent == null);             // TrueTrueTrueTrue
```



Объект `XDeclaration` — это не `XNode`, и в отличие от комментариев, инструкций обработки и корневого элемента он не должен присутствовать внутри коллекции `Nodes` документа. Взамен он присваивается отдельному свойству по имени `Declaration`. Именно потому в последнем примере значение `True` в выводе повторялось четыре раза, а не пять.

Объявления XML

Стандартный XML-файл начинается с примерно такого объявления:

```
<?xml version=1.0 encoding=utf-8 standalone=yes?>
```

Объявление XML гарантирует, что содержимое файла будет корректно разобрано и воспринято средством чтения. При выдаче объявлений XML объекты `XElement` и `XDocument` следуют описанным ниже правилам:

- вызов метода `Save` с именем файла всегда записывает объявление;
- вызов метода `Save` с экземпляром `XmlWriter` записывает объявление, если только `XmlWriter` не был проинструментирован иначе;
- метод `ToString` никогда не выдает объявление XML.



Объект `XmlWriter` можно проинструментировать о том, что он не должен генерировать объявление, путем установки свойств `OmitXmlDeclaration` и `ConformanceLevel` объекта `XmlWriterSettings` при конструировании экземпляра `XmlWriter`. Об этом пойдет речь в главе 11.

Наличие или отсутствие объекта `XDeclaration` никак не влияет на то, записывается объявление XML либо нет. Объект `XDeclaration` предназначен для предоставления подсказок XML-сериализации двояким образом:

- какую кодировку текста использовать;
- что именно помещать в атрибуты `encoding` и `standalone` объявления XML (которые должны записываться объявлением).

Конструктор класса `XDeclaration` принимает три аргумента, которые соответствуют атрибутам `version`, `encoding` и `standalone`. В следующем примере содержимое `test.xml` кодируется с применением UTF-16:

```
var doc = new XDocument (
    new XDeclaration ("1.0", "utf-16", "yes"),
    new XElement ("test", "data")
);
doc.Save ("test.xml");
```



Что бы ни было указано для версии XML, средство записи XML его игнорирует, всегда записывая "1.0".

Кодировка должна указываться с использованием кода IETF, подобного "utf-16" — в точности, как он будет представлен в объявлении XML.

Запись объявления в строку

Предположим, что объект XDocument необходимо сериализовать в строку, включая объявление XML. Поскольку метод ToString не записывает объявление, мы должны применять вместо него XmlWriter:

```
var doc = new XDocument (
    new XDeclaration ("1.0", "utf-8", "yes"),
    new XElement ("test", "data")
);
var output = new StringBuilder();
var settings = new XmlWriterSettings { Indent = true };
using (XmlWriter xw = XmlWriter.Create (output, settings))
    doc.Save (xw);
Console.WriteLine (output.ToString());
```

Вот результат:

```
<?xml version=1.0 encoding=utf-16 standalone=yes?>
<test>data</test>
```

Обратите внимание, что в выводе получена кодировка UTF-16 — несмотря на то, что в XDeclaration была явно затребована кодировка UTF-8! Результат может выглядеть как ошибка, но на самом деле объект XmlWriter удивительно интеллектуален. Из-за того, что запись производится в строку, а не в файл или поток, невозможно использовать никакую другую кодировку кроме UTF-16 — формат, в котором внутренне хранятся строки. Таким образом, XmlWriter записывает "utf-16", так что никакого обмана здесь нет.

Это также объясняет причину, по которой метод ToString не выпускает объявление XML. Представьте, что вместо вызова метода Save для записи XDocument в файл вы поступаете следующим образом:

```
File.WriteAllText ("data.xml", doc.ToString());
```

Как уже утверждалось, в файле data.xml будет отсутствовать объявление XML, делая его незавершенным, однако по-прежнему поддающимся разбору (кодировка текста может быть выведена). Но если бы метод ToString выдавал объявление XML, тогда файл data.xml фактически содержал бы некорректное объявление (`encoding="utf-16"`), которое могло бы препятствовать его успешному чтению, потому что метод WriteAllText кодирует с применением UTF-8.

Имена и пространства имен

Точно так же как типы .NET могут иметь пространства имен, то же самое возможно для элементов и атрибутов XML.

Пространства имен XML преследуют две цели. Во-первых, подобно пространствам имен в языке C# они помогают избегать конфликтов имен. Такая проблема может возникать при слиянии данных из нескольких XML-файлов.

Во-вторых, пространства имен придают имени абсолютный смысл. Например, имя “nil” может означать все что угодно. Тем не менее, в рамках пространства имен `http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance` имя “nil” означает своего рода эквивалент значения `null` в C# и сопровождается специфичными правилами его использования.

Поскольку пространства имен XML являются весомым источником путаницы, мы раскроем данную тему сначала в общих чертах и затем перейдем к применению пространств имен в LINQ to XML.

Пространства имен в XML

Предположим, что требуется определить элемент `customer` в пространстве имен `OReilly.Nutshell.CSharp`. Сделать это можно двумя способами. Первый способ — воспользоваться атрибутом `xmlns`:

```
<customer xmlns=OReilly.Nutshell.CSharp/>
```

`xmlns` представляет собой специальный зарезервированный атрибут. В случае применения в подобной манере он выполняет две функции:

- указывает пространство имен для данного элемента;
- указывает стандартное пространство имен для всех элементов-потомков.

Таким образом, в следующем примере `address` и `postcode` неявно находятся в пространстве имен `OReilly.Nutshell.CSharp`:

```
<customer xmlns=OReilly.Nutshell.CSharp>
  <address>
    <postcode>02138</postcode>
  </address>
</customer>
```

Если нужно, чтобы `address` и `postcode` не имели пространства имен, тогда понадобится поступить так:

```
<customer xmlns=OReilly.Nutshell.CSharp>
  <address xmlns="">
    <postcode>02138</postcode>  <!-- postcode теперь наследует пустое
пространство имен --&gt;
  &lt;/address&gt;
&lt;/customer&gt;</pre>
```

Префиксы

Другой способ указания пространства имен предусматривает использование префикса. Префикс — это псевдоним, который назначается пространству имен с целью сокращения клавиатурного ввода. С применением префикса связаны два шага — определение префикса и его использование. Шаги можно объединить:

```
<nut:customer xmlns:nut=OReilly.Nutshell.CSharp/>
```

Здесь происходят два разных действия. В правой части конструкция `xmlns:nut="..."` определяет префикс по имени `nut` и делает его доступным данному элементу и всем его потомкам. В левой части конструкция `nut:customer` назначает вновь выделенный префикс элементу `customer`.

Элемент, снабженный префиксом, не определяет стандартное пространство имен для потомков. В следующем XML-коде `firstname` имеет пустое пространство имен:

```
<nut:customer xmlns:nut=OReilly.Nutshell.CSharp>
  <firstname>Joe</firstname>
</customer>
```

Чтобы назначить `firstname` пространство имен `OReilly.Nutshell.CSharp`, потребуется поступить так:

```
<nut:customer xmlns:nut=OReilly.Nutshell.CSharp>
  <nut:firstname>Joe</firstname>
</customer>
```

Префикс — или префиксы — можно также определять для удобства работы с потомками, не назначая любой из этих префиксов самому родительскому элементу. В показанном ниже коде определены два префикса, `i` и `z`, а сам элемент `customer` оставлен с пустым пространством имен:

```
<customer xmlns:i=http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance
          xmlns:z=http://schemas.microsoft.com/2003/10/Serialization/>
  ...
</customer>
```

Если бы узел был корневым, то `i` и `z` были бы доступны всему документу. Префиксы удобны, когда элементы должны извлекаться из нескольких пространств имен.

Обратите внимание, что в рассмотренном примере оба пространства имен представляют собой URI. Применение URI (которыми вы владеете) является стандартной практикой: оно обеспечивает уникальность пространств имен. Таким образом, в реальных обстоятельствах элемент `customer`, скорее всего, будет больше похож на:

```
<customer xmlns=http://oreilly.com/schemas/nutshell/csharp/>
```

или на:

```
<nut:customer xmlns:nut=http://oreilly.com/schemas/nutshell/csharp/>
```

Атрибуты

Назначать пространства имен можно также и атрибутам. Главное отличие состоит в том, что атрибут всегда требует префикса. Например:

```
<customer xmlns:nut=OReilly.Nutshell.CSharp nut:id=123 />
```

Еще одно отличие связано с тем, что неуточненный атрибут всегда имеет пустое пространство имен: он никогда не наследует стандартное пространство имен от своего родительского элемента.

Как правило, атрибуты не нуждаются в пространствах имен, потому что их смысл обычно локален по отношению к элементу. Исключение составляют универсальные атрибуты или атрибуты метаданных, такие как атрибут `nil`, определенный W3C:

```
<customer xmlns:xsi=http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance>
  <firstname>Joe</firstname>
  <lastname xsi:nil=true/>
</customer>
```

Здесь однозначно указано на то, что `lastname` является `nil` (`null` в C#), а не пустой строкой. Поскольку мы используем стандартное пространство имен, универсальная утилита разбора может точно определить наше намерение.

Указание пространств имен в X-DOM

До сих пор в настоящей главе в качестве имен `XElement` и `XAttribute` применялись только простые строки. Простая строка соответствует имени XML с пустым пространством имен, что очень похоже на тип .NET, определенный в глобальном пространстве имен.

Существует пара подходов к указанию пространства имен XML. Первый из них — заключение его в фигурные скобки и помещение перед локальным именем:

```
var e = new XElement ("{http://domain.com/xmlspace}customer", "Bloggs");
Console.WriteLine (e.ToString());
```

Вот результирующий XML-код:

```
<customer xmlns=http://domain.com/xmlspace>Bloggs</customer>
```

Второй (и более эффективный) подход предусматривает использование типов `XNamespace` и `XName`. Их определения показаны ниже:

```
public sealed class XNamespace
{
    public string NamespaceName { get; }
}

public sealed class XName // Локальное имя с дополнительным пространством имен
{
    public string LocalName { get; }
    public XNamespace Namespace { get; } // Необязательно
}
```

Оба типа определяют неявные приведения от `string`, поэтому следующий код вполне законен:

```
XNamespace ns    = "http://domain.com/xmlspace";
XName localName = "customer";
XName fullName  = "{http://domain.com/xmlspace}customer";
```

В типе `XNamespace` также перегружена операция `+`, что позволяет комбинировать пространство имен с именем в `XName`, не применяя фигурные скобки:

```
XNamespace ns = "http://domain.com/xmlspace";
XName fullName = ns + "customer";
Console.WriteLine (fullName); // {http://domain.com/xmlspace}customer
```

Все конструкторы и методы в модели X-DOM, которые принимают имя элемента или атрибута, на самом деле принимают объект `XName`, а не строку. Причина того, что строку можно заменять (как во всех примерах, приведенных до настоящего момента), связана с неявным приведением.

Пространство имен указывается одинаково независимо от того, чем является сущность — элементом или атрибутом:

```
XNamespace ns = "http://domain.com/xmlspace";
var data = new XElement (ns + "data",
    new XAttribute (ns + "id", 123)
);
```

Модель X-DOM и стандартные пространства имен

Модель X-DOM игнорирует концепцию стандартного пространства имен до тех пор, пока не наступает момент фактического вывода XML. Это означает, что когда вы конструируете дочерний элемент XElement, то при необходимости должны предоставить его пространство имен явно: оно не будет наследоваться от родительского элемента:

```
XNamespace ns = "http://domain.com/xmlspace";
var data = new XElement (ns + "data",
    new XElement (ns + "customer", "Bloggs"),
    new XElement (ns + "purchase", "Bicycle")
);
```

Однако при чтении и выводе XML модель X-DOM использует стандартные пространства имен:

```
Console.WriteLine (data.ToString());
```

ВЫВОД:

```
<data xmlns=http://domain.com/xmlspace>
  <customer>Bloggs</customer>
  <purchase>Bicycle</purchase>
</data>
```

```
Console.WriteLine (data.Element (ns + "customer").ToString());
```

ВЫВОД:

```
<customer xmlns=http://domain.com/xmlspace>Bloggs</customer>
```

Если дочерние узлы XElement конструируются без указания пространств имен — другими словами, так:

```
XNamespace ns = "http://domain.com/xmlspace";
var data = new XElement (ns + "data",
    new XElement ("customer", "Bloggs"),
    new XElement ("purchase", "Bicycle")
);
Console.WriteLine (data.ToString());
```

тогда будет получен отличающийся результат:

```
<data xmlns=http://domain.com/xmlspace>
  <customer xmlns=>Bloggs</customer>
  <purchase xmlns=>Bicycle</purchase>
</data>
```

Еще одна проблема возникает, когда по причине забывчивости не включено пространство имен при навигации по дереву X-DOM:

```

XNamespace ns = "http://domain.com/xmlspace";
var data = new XElement (ns + "data",
    new XElement (ns + "customer", "Bloggs"),
    new XElement (ns + "purchase", "Bicycle")
);
XElement x = data.Element (ns + "customer");      // Нормально
XElement y = data.Element ("customer");           // null

```

Если вы строите дерево X-DOM, не указывая пространства имен, то можете впоследствии назначить любому элементу одиночное пространство имен, как показано ниже:

```

foreach ( XElement e in data.DescendantsAndSelf () )
if ( e.Name.Namespace == "" )
    e.Name = ns + e.Name.LocalName;

```

Префиксы

Модель X-DOM трактует префиксы точно так же, как пространства имен: чисто как функцию сериализации. Следовательно, вы можете полностью игнорировать проблему префиксов — и это сойдет вам с рук! Единственная причина, по которой вы можете решить поступить иначе, касается эффективности при выводе в XML-файл. Например, взгляните на приведенный далее код:

```

XNamespace ns1 = "http://domain.com/space1";
XNamespace ns2 = "http://domain.com/space2";

var mix = new XElement (ns1 + "data",
    new XElement (ns2 + "element", "value"),
    new XElement (ns2 + "element", "value"),
    new XElement (ns2 + "element", "value")
);

```

По умолчанию XElement будет сериализовать результат следующим образом:

```

<data xmlns=http://domain.com/space1>
    <element xmlns=http://domain.com/space2>value</element>
    <element xmlns=http://domain.com/space2>value</element>
    <element xmlns=http://domain.com/space2>value</element>
</data>

```

Как видите, присутствует излишнее дублирование. Решение заключается в том, чтобы не изменять способ конструирования X-DOM, а замен предложить сериализатору подсказки перед записью XML. Для этого необходимо добавить атрибуты, определяющие префиксы, которые должны быть применены. Обычно такие атрибуты добавляются к корневому элементу:

```

mix.SetAttributeValue (XNamespace.Xmlns + "ns1", ns1);
mix.SetAttributeValue (XNamespace.Xmlns + "ns2", ns2);

```

Приведенный выше код назначает префикс ns1 переменной ns1 из XNamespace и префикс ns2 переменной ns2. Во время сериализации модель X-DOM автоматически выбирает указанные атрибуты и использует их для уплотнения результирующего XML. Вот результат вызова метода ToString на mix:

```
<ns1:data xmlns:ns1=http://domain.com/space1
           xmlns:ns2=http://domain.com/space2>
  <ns2:element>value</ns2:element>
  <ns2:element>value</ns2:element>
  <ns2:element>value</ns2:element>
</ns1:data>
```

Предиксы не изменяют способа конструирования, запрашивания или обновления модели X-DOM — для таких действий мы игнорируем наличие префиксов и продолжаем применять полные имена. Префиксы вступают в игру только при преобразовании в файлы или потоки XML и из них.

Префиксы также учитываются в атрибутах сериализации. В приведенном ниже примере мы записываем дату рождения и кредит заказчика в виде "nil", используя стандартный атрибут W3C. Выделенная строка гарантирует, что префикс сериализуется без нежелательного повторения пространства имен:

```
XNamespace xsi = "http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance";
var nil = new XAttribute (xsi + "nil", true);

var cust = new XElement ("customers",
    new XAttribute (XNamespace.Xmlns + "xsi", xsi),
    new XElement ("customer",
        new XElement ("lastname", "Bloggs"),
        new XElement ("dob", nil),
        new XElement ("credit", nil)
    )
);
```

А вот результирующий XML-код:

```
<customers xmlns:xsi=http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance>
  <customer>
    <lastname>Bloggs</lastname>
    <dob xsi:nil=true />
    <credit xsi:nil=true />
  </customer>
</customers>
```

Для краткости мы предварительно объявили пустой XAttribute, так что его можно применять два раза при построении DOM-модели. Дважды ссылаться на тот же самый атрибут разрешено из-за того, что при необходимости он автоматически дублируется.

Аннотации

С помощью аннотаций к любому объекту XObject можно присоединять специальные данные. Аннотации предназначены для вашего личного использования и трактуются моделью X-DOM как “черные ящики”. Если вы когда-либо имели дело со свойством Tag какого-нибудь элемента управления Windows Forms или Windows Presentation Foundation (WPF), то концепция должна быть знакомой — лишь с тем отличием, что разрешено иметь множество аннотаций и назначать им закрытую область видимости. Допускается создавать аннота-

цию, которую другие типы не смогут даже видеть, не говоря уже о том, чтобы перезаписывать.

За добавление и удаление аннотаций отвечают следующие методы класса XObject:

```
public void AddAnnotation (object annotation)
public void RemoveAnnotations<T> () where T : class
```

Перечисленные далее методы извлекают аннотации:

```
public T Annotation<T> () where T : class
public IEnumerable<T> Annotations<T> () where T : class
```

Каждой аннотации назначается ключ согласно ее типу, который должен быть ссылочным. Показанный ниже код добавляет и затем извлекает аннотацию типа string:

```
XElement e = new XElement ("test");
e.AddAnnotation ("Hello");
Console.WriteLine (e.Annotation<string>()); // Hello
```

Можно добавить множество аннотаций того же самого типа, а затем применить метод Annotations для извлечения последовательности совпадений.

Тем не менее, открытый тип вроде string не обеспечивает создание эффективного ключа, т.к. код в других типах может стать помехой вашим аннотациям. Более удачный подход предполагает использование внутреннего или (вложенного) закрытого класса:

```
class X
{
    class CustomData { internal string Message; } // Закрытый вложенный тип
    static void Test()
    {
        XElement e = new XElement ("test");
        e.AddAnnotation (new CustomData { Message = "Hello" } );
        Console.Write (e.Annotations<CustomData>().First().Message); // Hello
    }
}
```

Для удаления аннотаций вы должны иметь доступ также и к типу ключа:

```
e.RemoveAnnotations<CustomData>();
```

Проектирование в модель X-DOM

До сих пор мы показывали, как применять LINQ для получения данных из модели X-DOM. Запросы LINQ можно также использовать для проектирования в модель X-DOM. Источником может быть все, к чему поддерживаются запросы LINQ, в том числе:

- существенные классы EF Core;
- локальная коллекция;
- другая модель X-DOM.

Независимо от источника применяется та же самая стратегия, что и в случае использования LINQ для выдачи дерева X-DOM: сначала записывается выражение функционального построения, которое создает желаемую форму X-DOM, а затем на основе этого выражения строится запрос LINQ. Например, пусть необходимо извлекать заказчиков из базы данных в XML-код следующего вида:

```
<customers>
  <customer id=1>
    <name>Sue</name>
    <buys>3</buys>
  </customer>
  ...
</customers>
```

Мы начинаем с того, что представляем выражение функционального построения для X-DOM, применяя простые литералы:

```
var customers =
  new XElement ("customers",
    new XElement ("customer", new XAttribute ("id", 1),
      new XElement ("name", "Sue"),
      new XElement ("buys", 3)
    )
  );

```

Затем мы превращаем это выражение в проекцию и строим на его основе запрос LINQ:

```
var customers =
  new XElement ("customers",
    // Из-за дефекта в EF Core мы должны вызывать метод AsEnumerable
    from c in dbContext.Customers.AsEnumerable()
    select
      new XElement ("customer", new XAttribute ("id", c.ID),
        new XElement ("name", c.Name),
        new XElement ("buys", c.Purchases.Count)
      )
  );

```



Вызов метода AsEnumerable требуется из-за дефекта в EF Core (исправление запланировано в более позднем выпуске). После того, как дефект будет устранен, удаление вызова AsEnumerable увеличит эффективность, предотвращая обращение к базе данных при каждом вызове c.Purchases.Count.

Ниже показан результат:

```
<customers>
  <customer id=1>
    <name>Tom</name>
    <buys>3</buys>
  </customer>
  <customer id=2>
    <name>Harry</name>
    <buys>2</buys>
  </customer>
  ...
</customers>
```

Чтобы лучше понять, как все работает, сконструируем тот же самый запрос за два шага. Вот первый шаг:

```
 IEnumerable< XElement > sqlQuery =  
    from c in dbContext.Customers.AsEnumerable()  
    select  
        new XElement ("customer", new XAttribute ("id", c.ID),  
            new XElement ("name", c.Name),  
            new XElement ("buys", c.Purchases.Count)  
    );
```

Внутренняя порция представляет собой нормальный запрос LINQ, который выполняет проецирование в элементы XElement. Вот второй шаг:

```
 var customers = new XElement ("customers", sqlQuery);
```

Здесь конструируется корневой элемент XElement. Единственный необычный аспект заключается в том, что содержимое, т.е. sqlQuery — это не одиничный XElement, а реализация IQueryble< XElement >, которая в свою очередь реализует интерфейс IEnumerable< XElement >. Вспомните, что при обработке XML-содержимого происходит автоматическое перечисление коллекций. Таким образом, каждый элемент XElement добавляется как дочерний узел.

Устранение пустых элементов

Предположим, что в предыдущем примере также необходимо включить подробности о последней дорогой покупке заказчика. Решить задачу можно было бы следующим образом:

```
 var customers =  
     new XElement ("customers",  
         // После устранения дефекта в EF Core вызов AsEnumerable можно удалить  
         from c in dbContext.Customers.AsEnumerable()  
         let lastBigBuy = (from p in c.Purchases  
                           where p.Price > 1000  
                           orderby p.Date descending  
                           select p).FirstOrDefault()  
         select  
             new XElement ("customer", new XAttribute ("id", c.ID),  
                 new XElement ("name", c.Name),  
                 new XElement ("buys", c.Purchases.Count),  
                 new XElement ("lastBigBuy",  
                     new XElement ("description", lastBigBuy?.Description,  
                     new XElement ("price", lastBigBuy?.Price ?? 0m))  
             )  
     );
```

Однако здесь будут выпускаться пустые элементы для заказчиков, не совершивших дорогих покупок. (Если бы это был локальный запрос, а не запрос к базе данных, то сгенерировалось бы исключение NullReferenceException.) В таких случаях лучше полностью опустить узел lastBigBuy, поместив конструктор для элемента lastBigBuy внутрь условной операции:

```

select
    new XElement ("customer", new XAttribute ("id", c.ID),
        new XElement ("name", c.Name),
        new XElement ("buys", c.Purchases.Count),
        lastBigBuy == null ? null :
            new XElement ("lastBigBuy",
                new XElement ("description", lastBigBuy.Description),
                new XElement ("price", lastBigBuy.Price))

```

Для заказчиков, не имеющих lastBigBuy, вместо пустого элемента XElement выдается значение null. Это именно то, что нужно, т.к. содержимое null попросту игнорируется.

Потоковая передача проекции

Если проецирование в модель X-DOM осуществляется только с целью его сохранения посредством метода Save (или вызова ToString), то эффективность использования памяти можно повысить, задействовав класс XStreamingElement. Класс XStreamingElement представляет собой усеченную версию XElement, которая применяет к своему дочернему содержимому семантику отложенной загрузки. Для его использования нужно просто заменить внешние элементы XElement элементами XStreamingElement:

```

var customers =
    new XStreamingElement ("customers",
        from c in dbContext.Customers
        select
            new XStreamingElement ("customer", new XAttribute ("id", c.ID),
                new XElement ("name", c.Name),
                new XElement ("buys", c.Purchases.Count)
            )
    );
customers.Save ("data.xml");

```

Запросы, переданные конструктору XStreamingElement, не перечисляются вплоть до вызова метода Save, ToString или WriteTo на элементе, что позволяет избежать загрузки в память сразу целого дерева X-DOM. Обратной стороной такого подхода является то, что запросы оцениваются повторно, требуя сохранения заново. Кроме того, обход дочернего содержимого XStreamingElement невозможен — данный класс не открывает доступ к методам вроде Elements или Attributes.

Класс XStreamingElement не основан на XObject (или на любом другом классе), поэтому он располагает таким ограниченным набором членов. В состав членов помимо Save, ToString и WriteTo входят:

- метод Add, который принимает содержимое подобно конструктору;
- свойство Name.

Класс XStreamingElement не позволяет читать содержимое в потоковой манере — в таком случае придется применять класс XmlReader в сочетании с X-DOM. Мы объясним, как это делать, в разделе “Шаблоны для использования XmlReader/XmlWriter” главы 11.



Другие технологии XML и JSON

В главе 10 был раскрыт API-интерфейс LINQ to XML и язык XML в целом. В настоящей главе мы исследуем низкоуровневые классы XmlReader/XmlWriter и типы для работы с форматом JSON (JavaScript Object Notation — запись объектов JavaScript), который стал популярной альтернативой XML.

В дополнительных материалах, доступных на веб-сайте издательства, описаны инструменты для работы со схемой XML и таблицами стилей.

XmlReader

XmlReader — высокопроизводительный класс для чтения XML-потока низкоуровневым односторонним способом.

Рассмотрим следующее содержимое XML-файла `customer.xml`:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" standalone="yes"?>
<customer id="123" status="archived">
    <firstname>Jim</firstname>
    <lastname>Bo</lastname>
</customer>
```

Для создания экземпляра XmlReader вызывается статический метод `XmlReader.Create`, которому передается объект Stream, объект TextReader или строка URI:

```
using XmlReader reader = XmlReader.Create ("customer.xml");
...
```



Поскольку класс XmlReader позволяет читать из потенциально медленных источников (Stream и URI), он предлагает асинхронные версии большинства своих методов, так что можно легко писать не-блокирующий код. Асинхронность подробно обсуждается в главе 14.

Ниже показано, как сконструировать экземпляр XmlReader, который читает из строки:

```
using XmlReader reader = XmlReader.Create (
    new System.IO.StringReader (myString));
```

Для управления настройками разбора и проверки достоверности можно также передавать объект XmlReaderSettings. В частности, следующие три свойства XmlReaderSettings полезны при пропускании избыточного содержимого:

bool IgnoreComments	// Пропускать узлы комментариев?
bool IgnoreProcessingInstructions	// Пропускать инструкции обработки?
bool IgnoreWhitespace	// Пропускать пробельные символы?

В приведенном далее примере средству чтения сообщается о том, что узлы с пробельными символами, которые отвлекают внимание в типовых сценариях, выпускаться не должны:

```
XmlReaderSettings settings = new XmlReaderSettings ();
settings.IgnoreWhitespace = true;

using XmlReader reader = XmlReader.Create ("customer.xml", settings);
...
```

Еще одним полезным свойством XmlReaderSettings является ConformanceLevel. Его стандартное значение Document указывает средству чтения на то, что необходимо предполагать наличие допустимого XML-документа с единственным корневым узлом. Такая проблема возникает, когда нужно прочитать только внутреннюю порцию XML-кода, содержащую несколько узлов:

```
<firstname>Jim</firstname>
<lastname>Bo</lastname>
```

Чтобы прочитать такой XML-код без генерации исключения, потребуется установить ConformanceLevel в Fragment.

Класс XmlReaderSettings также имеет свойство по имени CloseInput, которое указывает на то, должен ли закрываться лежащий в основе поток, когда закрывается средство чтения (в XmlWriterSettings существует аналогичное свойство под названием CloseOutput). Стандартное значение для свойств CloseInput и CloseOutput равно false.

Чтение узлов

Единицами XML-потока являются узлы XML. Средство чтения перемещается по потоку в текстовом порядке (сначала в глубину). Свойство Depth средства чтения возвращает текущую глубину курсора.

Самый простой способ чтения из XmlReader предполагает вызов метода Read. Он осуществляет перемещение на следующий узел в XML-потоке подобно методу MoveNext из интерфейса IEnumarator. Первый вызов Read устанавливает курсор на первый узел. Когда метод Read возвращает false, это означает, что курсор переместился за последний узел, и в данном случае экземпляр XmlReader должен быть закрыт и освобожден.

Два строковых свойства в классе XmlReader предоставляют доступ к содержимому узла: Name и Value. В зависимости от типа узла заполняется либо Name, либо Value (или оба).

В следующем примере мы читаем каждый узел в XML-потоке, выводя тип узла по мере продвижения:

```
XmlReaderSettings settings = new XmlReaderSettings();
settings.IgnoreWhitespace = true;

using XmlReader reader = XmlReader.Create ("customer.xml", settings);
while (reader.Read())
{
    Console.Write (new string (' ', reader.Depth * 2)); // Вывести отступ
    Console.Write (reader.NodeType.ToString ());

    if (reader.NodeType == XmlNodeType.Element ||
        reader.NodeType == XmlNodeType.EndElement)
    {
        Console.Write (" Name=" + reader.Name);
    }
    else if (reader.NodeType == XmlNodeType.Text)
    {
        Console.Write (" Value=" + reader.Value);
    }
    Console.WriteLine ();
}
```

Ниже показан вывод:

```
XmlDeclaration
Element Name=customer
  Element Name=firstname
    Text Value=Jim
  EndElement Name=firstname
  Element Name=lastname
    Text Value=Bo
  EndElement Name=lastname
EndElement Name=customer
```



Атрибуты в обход на основе Read не включаются (см. раздел “Чтение атрибутов” далее в главе).

Свойство NodeType имеет тип XmlNodeType, который представляет собой перечисление со следующими членами:

None	Comment	Document
XmlDeclaration	Entity	DocumentType
Element	EndElement	DocumentFragment
EndElement	EntityReference	Notation
Text	ProcessingInstruction	Whitespace
Attribute	CDATA	SignificantWhitespace

Чтение элементов

Зачастую структура читаемого XML-документа уже известна. Чтобы помочь в этом отношении, класс `XmlReader` предлагает набор методов, которые выполняют чтение, предполагая наличие определенной структуры. Они упрощают код и одновременно предпринимают некоторую проверку достоверности.



Класс `XmlReader` генерирует исключение `XmlException`, если любая проверка достоверности терпит неудачу. Класс `XmlException` имеет свойства `LineNumber` и `LinePosition`, которые указывают, где произошла ошибка — в случае крупных XML-файлов регистрация такой информации в журнале очень важна!

Метод `ReadStartElement` проверяет, что текущий `NodeType` является `Element`, и затем вызывает метод `Read`. Если указано имя, тогда он проверяет, совпадает ли оно с именем текущего элемента.

Метод `ReadEndElement` удостоверяется в том, что текущий `NodeType` — это `EndElement`, и затем вызывает метод `Read`.

Например, мы могли бы прочитать узел:

```
<firstname>Jim</firstname>
```

следующим образом:

```
reader.ReadStartElement ("firstname");
Console.WriteLine (reader.Value);
reader.Read();
reader.ReadEndElement();
```

Метод `ReadElementContentAsString` выполняет сразу все описанные ранее действия. Он читает начальный элемент, текстовый узел и конечный элемент, возвращая содержимое в виде строки:

```
string firstName = reader.ReadElementContentAsString ("firstname", "");
```

Второй аргумент ссылается на пространство имен, которое в приведенном примере оставлено пустым. Доступны также типизированные версии метода, такие как `ReadElementContentAsInt`, разбирающие результат. Вернемся к исходному XML-документу:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" standalone="yes"?>
<customer id="123" status="archived">
    <firstname>Jim</firstname>
    <lastname>Bo</lastname>
    <creditlimit>500.00</creditlimit> <!--Да, мы не учитываем этот комментарий!-->
</customer>
```

Его можно прочитать следующим образом:

```
XmlReaderSettings settings = new XmlReaderSettings();
settings.IgnoreWhitespace = true;

using XmlReader r = XmlReader.Create ("customer.xml", settings);
r.MoveToContent();                                // Пропустить XML-объявление
r.ReadStartElement ("customer");
```

```
string firstName    = r.ReadElementContentAsString ("firstname", "");  
string lastName     = r.ReadElementContentAsString ("lastname", "");  
decimal creditLimit = r.ReadElementContentAsDecimal ("creditlimit", "");  
  
r.MoveToContent();           // Пропустить этот надоедливый комментарий  
r.ReadEndElement();         // Прочитать закрывающий дескриптор customer
```



Метод `MoveToContent` по-настоящему удобен. Он пропускает все малоинтересное: XML-объявления, пробельные символы, комментарии и инструкции обработки. Посредством свойств `XmlReaderSettings` можно заставить средство чтения выполнять большинство таких действий автоматически.

Необязательные элементы

Предположим, что в предыдущем примере элемент `<lastname>` был необязательным. Решение прямолинейно:

```
r.ReadStartElement ("customer");  
string firstName    = r.ReadElementContentAsString ("firstname", "");  
string lastName     = r.Name == "lastname"  
                    ? r.ReadElementContentAsString () : null;  
decimal creditLimit = r.ReadElementContentAsDecimal ("creditlimit", "");
```

Случайный порядок элементов

Примеры в текущем разделе полагаются на то, что элементы в XML-файле расположены в установленном порядке. Чтобы справиться с элементами, представленными в другом порядке, проще всего прочитать такой раздел XML-файла в дерево X-DOM. Мы покажем, как это делать, в разделе “Шаблоны для использования `XmlReader/XmlWriter`” далее в главе.

Пустые элементы

Способ, которым класс `XmlReader` обрабатывает пустые элементы, таит в себе серьезную ловушку. Рассмотрим следующий элемент:

```
<customerList></customerList>
```

Вот его эквивалент в XML:

```
<customerList/>
```

Тем не менее, `XmlReader` трактует два варианта по-разному. В первом случае приведенный ниже код работает ожидаемым образом:

```
reader.ReadStartElement ("customerList");  
reader.ReadEndElement();
```

Во втором случае метод `ReadEndElement` генерирует исключение, т.к. отсутствует отдельный “конечный элемент”, на который рассчитывает класс `XmlReader`. Обходной путь предусматривает добавление проверки на предмет пустых элементов:

```
bool isEmpty = reader.IsEmptyElement;  
reader.ReadStartElement ("customerList");  
if (!isEmpty) reader.ReadEndElement();
```

На самом деле такая неприятность возникает, только когда рассматриваемый элемент может содержать дочерние элементы (скажем, список заказчиков). В случае элементов, которые содержат простой текст (вроде `firstname`), проблемы можно избежать путем вызова такого метода, как `ReadElementContentAsString`. Методы `ReadElementXXX` корректно обрабатывают оба вида пустых элементов.

Другие методы `ReadXXX`

В табл. 11.1 приведена сводка по всем методам `ReadXXX` в классе `XmlReader`. Большинство из них предназначено для работы с элементами. Выделенная полужирным часть в примере XML-фрагмента — это раздел, который читает описываемый метод.

Таблица 11.1. Методы чтения

Методы	Типы узлов, на которых методы работают	Пример XML-фрагмента	Входные параметры	Возвращаемые данные
<code>ReadContentAsXXX</code>	Text	<code><a>x</code>		x
<code>ReadElementContentAsXXX</code>	Element	<code><a>x</code>		x
<code>ReadInnerXml</code>	Element	<code><a>x</code>		x
<code>ReadOuterXml</code>	Element	<code><a>x</code>		<code><a>x</code>
<code>ReadStartElement</code>	Element	<code><a>x</code>		
<code>ReadEndElement</code>	Element	<code><a>x</code>		
<code>ReadSubtree</code>	Element	<code><a>x</code>		<code><a>x</code>
<code>ReadToDescendant</code>	Element	<code><a>x</code>	"b"	
<code>ReadToFollowing</code>	Element	<code><a>x</code>	"b"	
<code>ReadToNextSibling</code>	Element	<code><a>x</code>	"b"	
<code>ReadAttributeValue</code>	Attribute	См. раздел “Чтение атрибутов” далее в главе		

Методы `ReadContentAsXXX` разбирают текстовый узел в тип `XXX`. Внутренне класс `XmlConvert` выполняет преобразование из строки в данный тип. Текстовый узел может находиться внутри элемента или атрибута.

Методы `ReadElementContentAsXXX` представляют собой оболочки вокруг соответствующих методов `ReadContentAsXXX`. Они применяются к узлу элемента, а не к текстовому узлу, заключенному в элемент.

Метод `ReadInnerXml` обычно применяется к элементу; он читает и возвращает элемент со всеми его потомками. В случае применения к атрибуту метод `ReadInnerXml` возвращает значение атрибута.

Метод `ReadOuterXml` аналогичен `ReadInnerXml`, но только включает, а не исключает элемент в позиции курсора.

Метод `ReadSubtree` возвращает новый экземпляр `XmlReader`, который обеспечивает представление лишь текущего элемента (и его потомков). Чтобы исходный `XmlReader` мог безопасно продолжить чтение, этот экземпляр должен быть закрыт. Когда новый экземпляр `XmlReader` закрывается, позиция курсора исходного `XmlReader` перемещается в конец поддерева.

Метод `ReadToDescendant` перемещает курсор в начало первого узла-потомка с указанным именем/пространством имен. Метод `ReadToFollowing` перемещает курсор в начало первого узла — независимо от глубины — с указанным именем/пространством имен. Метод `ReadToNextSibling` перемещает курсор в начало первого родственного узла с указанным именем/пространством имен.

Существуют также два унаследованных метода: `ReadString` и `ReadElementString`. Они ведут себя подобно методам `ReadContentAsString` и `ReadElementContentAsString`, но с тем отличием, что генерируют исключение, если внутри элемента обнаружено более одного текстового узла. Вы должны избегать использования унаследованных методов, т.к. они генерируют исключение, если элемент содержит комментарий.

Чтение атрибутов

Класс `XmlReader` предоставляет индексатор, обеспечивающий прямой (произвольный) доступ к атрибутам элемента — по имени или по позиции. Вызов метода `GetAttribute` эквивалентен применению индексатора.

Имея следующий XML-фрагмент:

```
<customer id="123" status="archived"/>
```

вот как мы могли бы прочитать его атрибуты:

```
Console.WriteLine (reader ["id"]);           // 123
Console.WriteLine (reader ["status"]);         // archived
Console.WriteLine (reader ["bogus"] == null);   // True
```



Для того чтобы читать атрибуты, экземпляр `XmlReader` должен располагаться на начальном элементе. После вызова метода `ReadStartElement` атрибуты исчезают навсегда!

Хотя порядок атрибутов семантически несуществен, доступ к атрибутам возможен по их порядковым позициям. Предыдущий пример можно переписать следующим образом:

```
Console.WriteLine (reader [0]);           // 123
Console.WriteLine (reader [1]);           // archived
```

Индексатор также позволяет указывать пространство имен атрибута, если оно имеется.

Свойство `AttributeCount` возвращает количество атрибутов для текущего узла.

Узлы атрибутов

Для явного обхода узлов атрибутов потребуется сделать специальное отклонение от нормального пути, предусматривающего просто вызов метода Read. Вской причиной поступить так является необходимость разбора значений атрибутов в другие типы с помощью методов ReadContentAsXXX.

Отклонение должно начинаться с начального элемента. В целях упрощения работы во время обхода атрибутов правило односторонности ослабляется: можно переходить к любому атрибуту (вперед или назад) за счет вызова метода MoveToAttribute.



Метод MoveToElement возвращает начальный элемент из любого места внутри ответвления узла атрибута.

Вернувшись к предыдущему примеру:

```
<customer id="123" status="archived"/>
```

можно поступить так:

```
reader.MoveToAttribute ("status");
string status = reader.ReadContentAsString();
reader.MoveToAttribute ("id");
int id = reader.ReadContentAsInt();
```

Метод MoveToAttribute возвращает false, если указанный атрибут не существует.

Можно также совершить обход всех атрибутов в последовательности, вызывая метод MoveToFirstAttribute, а затем метод MoveToNextAttribute:

```
if (reader.MoveToFirstAttribute())
    do
    {
        Console.WriteLine (reader.Name + "=" + reader.Value);
    }
    while (reader.MoveToNextAttribute());
```

Вот вывод:

```
id=123
status=archived
```

Пространства имен и префиксы

Класс XmlReader предлагает две параллельные системы для ссылки на имена элементов и атрибутов:

- Name;
- NamespaceURI и LocalName.

Всякий раз, когда читается свойство Name элемента или вызывается метод, принимающий одиночный аргумент name, используется первая система. Такой подход хорошо работает в отсутствие каких-либо пространств имен или префиксов; в противном случае он действует в грубой и буквальной манере.

Пространства имен игнорируются, а префиксы включаются в точности так, как они записаны. Ниже показаны примеры.

Пример фрагмента	Значение Name
<customer ...>	customer
<customer xmlns='blah' ...>	customer
<x:customer ...>	x:customer

Приведенный далее код работает с первыми двумя случаями:

```
reader.ReadStartElement ("customer");
```

Для обработки третьего случая требуется следующий код:

```
reader.ReadStartElement ("x:customer");
```

Вторая система работает через два свойства, осведомленные о пространствах имен: NamespaceURI и LocalName. Указанные свойства принимают во внимание префиксы и стандартные пространства имен, определенные родительскими элементами. Префиксы автоматически расширяются. Это означает, что свойство NamespaceURI всегда отражает семантически корректное пространство имен для текущего элемента, а свойство LocalName всегда свободно от префиксов.

При передаче двух аргументов имен в такой метод, как ReadStartElement, вы применяете ту же самую систему. Например, взгляните на следующий XML-фрагмент:

```
<customer xmlns="DefaultNamespace" xmlns:other="OtherNamespace">
  <address>
    <other:city>
    ...
  </address>
</customer>
```

Прочитать его можно было бы так:

```
reader.ReadStartElement ("customer", "DefaultNamespace");
reader.ReadStartElement ("address", "DefaultNamespace");
reader.ReadStartElement ("city", "OtherNamespace");
```

Абстрагирование от префиксов обычно является именно тем, что нужно. При необходимости посредством свойства Prefix можно просмотреть, какой префикс использовался, и с помощью метода LookupNamespace преобразовать его в пространство имен.

XmlWriter

Класс XmlWriter — это одностороннее средство записи в XML-поток. Проектное решение, положенное в основу XmlWriter, симметрично таковому в классе XmlReader.

Как и XmlTextReader, экземпляр XmlWriter конструируется вызовом метода Create, которому передается необязательный объект настроек. В приведенном ниже примере мы разрешаем отступы, чтобы сделать вывод удобным для восприятия человеком, и затем записываем его в простой XML-файл:

```
XmlWriterSettings settings = new XmlWriterSettings();
settings.Indent = true;

using XmlWriter writer = XmlWriter.Create ("foo.xml", settings);
writer.WriteStartElement ("customer");
writer.WriteString ("firstname", "Jim");
writer.WriteString ("lastname", "Bo");
writer.WriteEndElement();
```

В результате получается следующий документ (тот же самый, что и в файле, который мы читали в первом примере применения класса XmlReader):

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<customer>
  <firstname>Jim</firstname>
  <lastname>Bo</lastname>
</customer>
```

Класс XmlWriter автоматически записывает обявление в начале, если только в XmlWriterSettings не указано обратное за счет установки свойства OmitXmlDeclaration в true или свойства ConformanceLevel в Fragment. В последнем случае также разрешена запись нескольких корневых узлов — то, что иначе приводит к генерации исключения.

Метод WriteValue записывает одиночный текстовый узел. Он принимает строковые и нестроковые типы, такие как bool и DateTime, внутренне используя класс XmlConvert для выполнения совместимых с XML преобразований строк:

```
writer.WriteStartElement ("birthdate");
writer.WriteLine (DateTime.Now);
writer.WriteEndElement();
```

Напротив, если мы вызовем:

```
WriteElementString ("birthdate", DateTime.Now.ToString());
```

то результат окажется несовместимым с XML и уязвимым к некорректному разбору.

Вызов метода WriteString эквивалентен вызову метода WriteValue со строкой. Класс XmlWriter автоматически защищает символы, которые в противном случае были бы недопустимыми внутри атрибута либо элемента, такие как &, <, >, и расширенные символы Unicode.

Запись атрибутов

Атрибуты можно записывать немедленно после записи начального элемента:

```
writer.WriteStartElement ("customer");
writer.WriteString ("id", "1");
writer.WriteString ("status", "archived");
```

Для записи нестроковых значений нужно вызывать методы WriteStartAttribute, WriteValue и WriteEndAttribute.

Запись других типов узлов

В классе `XmlWriter` также определены следующие методы для записи других разновидностей узлов:

```
WriteBase64          // для двоичных данных
WriteBinHex          // для двоичных данных
WriteCData
WriteComment
WriteDocType
WriteEntityRef
WriteProcessingInstruction
WriteRaw
WriteWhitespace
```

Метод `WriteRaw` внедряет строку прямо в выходной поток. Имеется также метод `WriteNode`, который принимает экземпляр `XmlReader` и копирует из него все данные.

Пространства имен и префиксы

Перегруженные версии методов `Write*` позволяют ассоциировать элемент или атрибут с пространством имен. Давайте перепишем содержимое XML-файла из предыдущего примера. На этот раз мы будем связывать все элементы с пространством имен `http://oreilly.com`, объявив префикс `o` в элементе `customer`:

```
writer.WriteStartElement ("o", "customer", "http://oreilly.com");
writer.WriteElementString ("o", "firstname", "http://oreilly.com", "Jim");
writer.WriteElementString ("o", "lastname", "http://oreilly.com", "Bo");
writer.WriteEndElement();
```

Вывод теперь выглядит следующим образом:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<o:customer xmlns:o='http://oreilly.com'>
  <o:firstname>Jim</o:firstname>
  <o:lastname>Bo</o:lastname>
</o:customer>
```

Обратите внимание, что для краткости класс `XmlWriter` опускает объявление пространств имен в дочерних элементах, если они уже объявлены их родительским элементом.

Шаблоны для использования `XmlReader`/`XmlWriter`

Работа с иерархическими данными

Рассмотрим следующие классы:

```

public class Contacts
{
    public IList<Customer> Customers = new List<Customer>();
    public IList<Supplier> Suppliers = new List<Supplier>();
}

public class Customer { public string FirstName, LastName; }
public class Supplier { public string Name; }

```

Предположим, что мы хотим применить классы XmlReader и XmlWriter для сериализации объекта Contacts в XML, как в приведенном фрагменте:

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<contacts>
    <customer id="1">
        <firstname>Jay</firstname>
        <lastname>Dee</lastname>
    </customer>
    <customer> <!-- мы будем предполагать, что id необязателен -->
        <firstname>Kay</firstname>
        <lastname>Gee</lastname>
    </customer>
    <supplier>
        <name>X Technologies Ltd</name>
    </supplier>
</contacts>

```

Лучший подход заключается в том, чтобы не записывать один крупный метод, а инкапсулировать XML-функциональность в самих типах Customer и Supplier, реализовав для них методы ReadXml и WriteXml. Используемый шаблон довольно прост:

- когда методы ReadXml и WriteXml завершаются, они оставляют средство чтения/записи на той же глубине;
- метод ReadXml читает внешний элемент, тогда как метод WriteXml записывает только его внутреннее содержимое.

Ниже показано, как можно было бы реализовать тип Customer:

```

public class Customer
{
    public const string XmlName = "customer";
    public int? ID;
    public string FirstName, LastName;

    public Customer () { }

    public Customer (XmlReader r) { ReadXml (r); }

    public void ReadXml (XmlReader r)
    {
        if (r.MoveToAttribute ("id")) ID = r.ReadContentAsInt ();
        r.ReadStartElement ();
        FirstName = r.ReadElementContentAsString ("firstname", "");
        LastName = r.ReadElementContentAsString ("lastname", "");
        r.ReadEndElement ();
    }
}

```

```

public void WriteXml (XmlWriter w)
{
    if (ID.HasValue) w.WriteAttributeString ("id", "", ID.ToString ());
    w.WriteElementString ("firstname", FirstName);
    w.WriteElementString ("lastname", LastName);
}
}

```

Обратите внимание, что метод ReadXml читает узлы внешнего начального и конечного элементов. Если бы эту работу делал вызывающий компонент, то класс Customer мог бы не читать собственные атрибуты. Причина, по которой метод WriteXml не сделан симметричным в таком отношении, двойственна:

- вызывающий компонент может нуждаться в выборе способа именования внешнего элемента;
- вызывающему компоненту может быть необходима запись дополнительных XML-атрибутов, таких как подтип элемента (который затем может применяться для принятия решения о том, экземпляр какого класса создавать при чтении данного элемента).

Еще одно преимущество следования описанному шаблону связано с тем, что ваша реализация будет совместимой с интерфейсом IXmlSerializable (это раскрывается в разделе “Сериализация” дополнительных материалов, которые доступны на веб-сайте издательства).

Класс Supplier аналогичен:

```

public class Supplier
{
    public const string XmlName = "supplier";
    public string Name;

    public Supplier () { }

    public Supplier (XmlReader r) { ReadXml (r); }

    public void ReadXml (XmlReader r)
    {
        r.ReadStartElement ();
        Name = r.ReadElementContentAsString ("name", "");
        r.ReadEndElement ();
    }

    public void WriteXml (XmlWriter w) =>
        w.WriteElementString ("name", Name);
}

```

В классе Contacts мы должны выполнять перечисление элемента customers в методе ReadXml с целью проверки, является ли каждый подэлемент заказчиком или поставщиком. Также понадобится закодировать обработку пустых элементов:

```

public void ReadXml (XmlReader r)
{
    bool isEmpty = r.IsEmptyElement;           // Это обеспечивает корректную
    r.ReadStartElement ();                     // обработку пустого
    if (isEmpty) return;                     // элемента <contacts/>
}

```

```

while (r.NodeType == XmlNodeType.Element)
{
    if (r.Name == Customer.XmlName)      Customers.Add (new Customer (r));
    else if (r.Name == Supplier.XmlName) Suppliers.Add (new Supplier (r));
    else
        throw new XmlException ("Unexpected node: " + r.Name);
        // Непредвиденный узел
}
r.ReadEndElement();
}

public void WriteXml (XmlWriter w)
{
    foreach (Customer c in Customers)
    {
        w.WriteStartElement (Customer.XmlName);
        c.WriteXml (w);
        w.WriteEndElement();
    }
    foreach (Supplier s in Suppliers)
    {
        w.WriteStartElement (Supplier.XmlName);
        s.WriteXml (w);
        w.WriteEndElement();
    }
}

```

Вот как сериализовать объект Contacts, заполненный экземплярами Customer и Supplier, в XML-файл:

```

var settings = new XmlWriterSettings();
settings.Indent = true; // Для улучшения визуального восприятия
using XmlWriter writer = XmlWriter.Create ("contacts.xml", settings);
var cts = new Contacts()
// Добавить экземпляры Customer и Supplier...
writer.WriteStartElement ("contacts");
cts.WriteXml (writer);
writer.WriteEndElement();

```

А так выполняется десериализация из того же XML-файла:

```

var settings = new XmlReaderSettings();
settings.IgnoreWhitespace = true;
settings.IgnoreComments = true;
settings.IgnoreProcessingInstructions = true;
using XmlReader reader = XmlReader.Create ("contacts.xml", settings);
reader.MoveToContent();
var cts = new Contacts();
cts.ReadXml(reader);

```

Смешивание XmlReader/XmlWriter с моделью X-DOM

Переключиться на модель X-DOM можно в любой точке XML-дерева, где работа с классами `XmlReader` или `XmlWriter` становится слишком громоздкой. Использование X-DOM для обработки внутренних элементов — великолепный способ комбинирования простоты применения X-DOM и низкого расхода памяти классами `XmlReader` и `XmlWriter`.

Использование `XmlReader` с `XElement`

Чтобы прочитать текущий элемент в модель X-DOM, необходимо вызвать метод `XNode.ReadFrom`, передав ему экземпляр `XmlReader`. В отличие от `XElement.Load` этот метод не является “жадным” в том смысле, что он не ожидает увидеть целый документ. Взамен метод `XNode.ReadFrom` читает только до конца текущего поддерева.

В качестве примера предположим, что имеется XML-файл журнала со следующей структурой:

```
<log>
  <logentry id="1">
    <date>...</date>
    <source>...</source>
    ...
  </logentry>
  ...
</log>
```

При наличии миллиона элементов `logentry` чтение целого журнала в модель X-DOM приведет к непроизводительному расходу памяти. Более эффективное решение предусматривает обход всех элементов `logentry` с помощью класса `XmlReader` и затем использование `XElement` для индивидуальной обработки каждого элемента:

```
XmlReaderSettings settings = new XmlReaderSettings();
settings.IgnoreWhitespace = true;

using XmlReader r = XmlReader.Create ("logfile.xml", settings);
r.ReadStartElement ("log");
while (r.Name == "logentry")
{
  XElement logEntry = (XElement) XNode.ReadFrom (r);
  int id = (int) logEntry.Attribute ("id");
  DateTime date = (DateTime) logEntry.Element ("date");
  string source = (string) logEntry.Element ("source");
  ...
}
r.ReadEndElement();
```

Если следовать шаблону, описанному в предыдущем разделе, тогда `XElement` можно поместить внутрь метода `ReadXml` или `WriteXml` специального типа так, что вызывающий компонент даже не обнаружит подвоха! Например, метод `ReadXml` класса `Customer` можно было бы переписать следующим образом:

```

public void ReadXml (XmlReader r)
{
    XElement x = (XElement) XNode.ReadFrom (r);
    ID = (int) x.Attribute ("id");
    FirstName = (string) x.Element ("firstname");
    LastName = (string) x.Element ("lastname");
}

```

Класс XElement взаимодействует с классом XmlReader, чтобы гарантировать, что пространства имен остались незатронутыми, а префиксы соответствующим образом расширенными — даже если они определены на внешнем уровне. Таким образом, если содержимое XML-файла выглядит, как показано ниже:

```

<log xmlns="http://loggingspace">
    <logentry id="1">
        ...

```

то экземпляры XElement, сконструированные на уровне logentry, будут корректно наследовать внешнее пространство имен.

Использование XmlWriter с XElement

Класс XElement можно применять только для записи внутренних элементов в XmlWriter. В приведенном далее коде производится запись миллиона элементов logentry в XML-файл с использованием класса XElement — без помещения всех их в память:

```

using XmlWriter w = XmlWriter.Create ("logfile.xml");
w.WriteStartElement ("log");
for (int i = 0; i < 1000000; i++)
{
    XElement e = new XElement ("logentry",
        new XAttribute ("id", i),
        new XElement ("date", DateTime.Today.AddDays (-1)),
        new XElement ("source", "test"));
    e.WriteTo (w);
}
w.WriteEndElement ();

```

С применением класса XElement связаны минимальные накладные расходы во время выполнения. Если мы изменим пример для повсеместного использования класса XmlWriter, то никакой заметной разницы в скорости выполнения не будет.

Работа с JSON

Формат JSON стал популярной альтернативой XML. Хотя в JSON нет расширенных средств XML (таких как пространства имен, префиксы и схемы), его преимущество связано с простотой и отсутствием перегруженности; он похож на формат, который вы бы получили в результате преобразования объекта JavaScript в строку.

Исторически сложилось так, что платформа .NET не имела встроенной поддержки JSON, поэтому приходилось полагаться на сторонние библиотеки — в первую очередь на Json.NET. Хотя сейчас ситуация изменилась, библиотека Json.NET по-прежнему популярна по ряду причин:

- она существует с 2011 года;
- тот же самый API-интерфейс работает и на старых платформах .NET;
- она считается более функциональной (во всяком случае, так было в прошлом), чем API-интерфейсы Microsoft JSON.

Преимущество API-интерфейсов Microsoft JSON заключается в том, что они с самого начала проектировались как простые и чрезвычайно эффективные. Кроме того, начиная с версии .NET 6, их функциональность стала достаточно близкой к Json.NET.

В этом разделе мы раскроем:

- односторонние средства чтения и записи (`Utf8JsonReader` и `Utf8JsonWriter`);
- средство чтения DOM-модели (`JsonDocument`);
- средство чтения/записи DOM-модели (`JsonNode`).

В разделе “Сериализация” дополнительных материалов, доступных на веб-сайте издательства, рассматривается класс `JsonSerializer`, который отвечает за сериализацию и десериализацию JSON.

Utf8JsonReader

Структура `System.Text.Json.Utf8JsonReader`(<https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/api/system.text.json.utf8jsonreader?view=net-8.0>) является оптимизированным односторонним средством чтения для текста JSON, закодированного посредством UTF-8. Она концептуально похожа на класс `XmlReader`, представленный ранее в главе, и применяется во многом аналогично.

Возьмем JSON-файл по имени `people.json` со следующим содержимым:

```
{  
    "FirstName": "Sara",  
    "LastName": "Wells",  
    "Age": 35,  
    "Friends": ["Dylan", "Ian"]  
}
```

Фигурными скобками обозначается объект JSON (содержащий свойства, такие как `"FirstName"` и `"LastName"`), а квадратными скобками — массив JSON (который содержит повторяющиеся элементы). В данном случае повторяющимися элементами являются строки, но ими могут быть объекты (или другие массивы).

Приведенный далее код производит разбор содержимого файла, проходя по его маркерам JSON. Маркер — это начало или конец объекта, начало или ко-

неч массива, имя свойства или значение массива либо свойства (строка, число, true, false или null):

```
byte[] data = File.ReadAllBytes ("people.json");
Utf8JsonReader reader = new Utf8JsonReader (data);
while (reader.Read())
{
    switch (reader.TokenType)
    {
        case JsonTokenType.StartObject:
            Console.WriteLine ("Start of object");
            break;
        case JsonTokenType.EndObject:
            Console.WriteLine ("End of object");
            break;
        case JsonTokenType.StartArray:
            Console.WriteLine ();
            Console.WriteLine ("Start of array");
            break;
        case JsonTokenType.EndArray:
            Console.WriteLine ("End of array");
            break;
        case JsonTokenType.PropertyName:
            Console.Write ("Property: {reader.GetString()}");
            break;
        case JsonTokenType.String:
            Console.WriteLine (" Value: {reader.GetString()}");
            break;
        case JsonTokenType.Number:
            Console.WriteLine (" Value: {reader.GetInt32()}");
            break;
        default:
            Console.WriteLine ("No support for {reader.TokenType}");
            break;
    }
}
```

Вот как выглядит вывод:

```
Start of object
Property: FirstName Value: Sara
Property: LastName Value: Wells
Property: Age Value: 35
Property: Friends
Start of array
Value: Dylan
Value: Ian
End of array
End of object
```

Поскольку структура `Utf8JsonReader` работает напрямую с кодировкой UTF-8, она проходит по маркерам, не требуя предварительного преобразования входных данных в UTF-16 (формат строк .NET). Преобразование в UTF-16 происходит только при вызове метода `GetString`.

Интересно отметить, что конструктор `Utf8JsonReader` принимает не байтовый массив, а объект `ReadOnlySpan<byte>` (по этой причине `Utf8JsonReader` определена как ссылочная структура). Вы можете передавать байтовый массив, т.к. существует неявное преобразование из `T[]` в `ReadOnlySpan<T>`. В главе 23 мы опишем, как работают интервалы, и объясним, каким образом их можно использовать для улучшения показателей производительности за счет минимизации выделений памяти.

JsonReaderOptions

По умолчанию `Utf8JsonReader` требует, чтобы данные JSON строго соответствовали стандарту RFC 8259. Вы можете проинструктировать средство чтения о том, что оно должно быть более терпимым, передав конструктору `Utf8JsonReader` экземпляр класса `JsonReaderOptions`, который определяет описанные ниже параметры.

- **Комментарии в стиле языка С.** По умолчанию комментарии в JSON вызывают генерацию исключения `JsonException`. Установка свойства `CommentHandling` в `JsonCommentHandling.Skip` заставляет средство чтения игнорировать комментарии, а в `JsonCommentHandling.Allow` — распознавать их и выпускать маркеры `JsonTokenType.Comment`, когда они встречаются. Комментарии не могут появляться в середине других маркеров.
- **Завершающие запятые.** Согласно стандарту последнее свойство объекта и последний элемент массива не должны иметь завершающую запятую. Установка свойства `AllowTrailingCommas` смягчает это ограничение.
- **Контроль над максимальной глубиной вложения.** По умолчанию объекты и массивы можно вкладывать на глубину до 64 уровней. Установка свойства `MaxDepth` в отличающееся число переопределяет данную настройку.

Utf8JsonWriter

Класс `System.Text.Json.Utf8JsonWriter` (<https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/api/system.text.json.utf8jsonwriter?view=net-8.0>) представляет собой одностороннее средство записи JSON. Он поддерживает следующие типы:

- `String` и `DateTime` (сформатированные как строка в JSON);
- числовые типы `Int32`, `UInt32`, `Int64`, `UInt64`, `Single`, `Double` и `Decimal` (сформатированные как числа в JSON);
- `bool` (сформатированный как литералы `true/false` в JSON);
- `null` в JSON;
- массивы.

Вы можете организовать указанные типы данных в виде объектов согласно стандарту JSON. Кроме того, можно создавать компоненты, которые не являются частью стандарта JSON, но на практике часто поддерживаются инструментами разбора JSON.

Ниже демонстрируется применение Utf8JsonWriter:

```
var options = new JsonWriterOptions { Indented = true };
using (var stream = File.Create ("MyFile.json"))
using (var writer = new Utf8JsonWriter (stream, options))
{
    writer.WriteStartObject ();
    // Имя и значение свойства указываются в одном вызове
    writer.WriteString ("FirstName", "Dylan");
    writer.WriteString ("LastName", "Lockwood");

    // Имя и значение свойства указываются в разных вызовах
    writer.WritePropertyName ("Age");
    writer.WriteNumberValue (46);
    writer.WriteCommentValue ("This is a (non-standard) comment");
    writer.WriteEndObject ();
}
```

Код приводит к генерации выходного файла со следующим содержимым:

```
{
    "FirstName": "Dylan",
    "LastName": "Lockwood",
    "Age": 46
    /*This is a (non-standard) comment*/
}
```

Начиная с версии .NET 6, класс `Utf8JsonWriter` имеет метод `WriteRawValue`, который выдает строку или байтовый массив напрямую в поток данных JSON. Это полезно в особых случаях — например, если необходимо записывать число так, чтобы оно всегда включало десятичную точку (1.0, а не 1).

В приведенном примере мы устанавливаем свойство `Indented` экземпляра `JsonWriterOptions` в `true` с целью улучшения читабельности. Если бы мы этого не сделали, то результат оказался бы таким:

```
{"FirstName": "Dylan", "LastName": "Lockwood", "Age": 46...}
```

Класс `JsonWriterOptions` также имеет свойство `Encoder` для управления специальными символами в строках и свойство `SkipValidation`, позволяющее игнорировать структурные проверки достоверности (и делающее возможным выпуск недействительных выходных данных JSON).

JsonDocument

Класс `System.Text.Json.JsonDocument` производит разбор данных JSON в допускающую только чтение DOM-модель, которая состоит из экземпляров `JsonElement`, генерируемых по требованию. В отличие от `Utf8JsonReader` класс `JsonDocument` обеспечивает произвольный доступ к элементам.

Класс `JsonDocument` является одним из двух API-интерфейсов на основе DOM для работы с JSON, второй API-интерфейс — `JsonNode` (который рассматривается в следующем разделе). Класс `JsonNode` был введен в версии .NET 6 главным образом для удовлетворения спроса на записываемую DOM-модель. Однако он также подходит для сценариев, предусматривающих только чтение,

и предоставляет несколько более гибкий интерфейс, поддерживаемый традиционной DOM-моделью, который использует классы для значений, массивов и объектов JSON. В отличие от этого API-интерфейс `JsonDocument` чрезвычайно легковесный и включает всего один класс примечаний (`JsonDocument`) и две легковесных структуры (`JsonProperty` и `JsonValue`), которые производят разбор базовых данных по требованию. Разница проиллюстрирована на рис. 11.1.



В большинстве реальных сценариев преимущества `JsonDocument` в плане производительности по сравнению с `JsonNode` незначительны, поэтому вы можете сразу выбрать `JsonNode`, если предпочитаете изучать только один API-интерфейс.

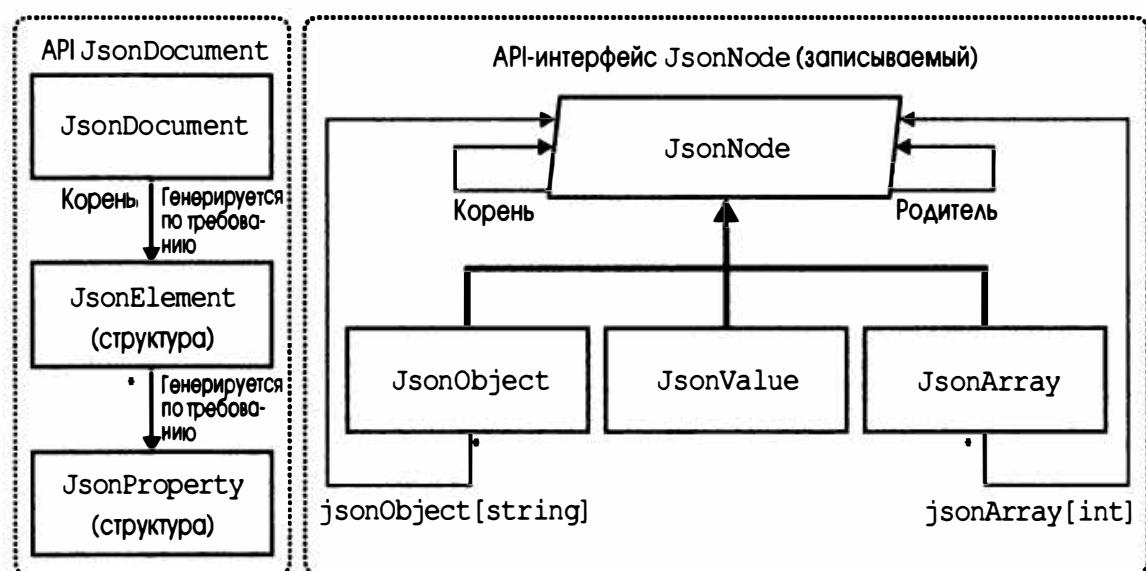


Рис. 11.1. API-интерфейсы DOM-модели JSON



Класс `JsonDocument` дополнительно увеличивает эффективность за счет того, что задействует пул в памяти для минимизации сборки мусора. Это означает, что вы обязаны освобождать экземпляр `JsonDocument` после использования, иначе его память не будет возвращена в пул. Следовательно, когда класс сохраняет экземпляр `JsonDocument` в поле, он также должен реализовывать интерфейс `IDisposable`. Если это окажется обременительным, тогда рассмотрите возможность использования `JsonNode`.

Статический метод `Parse` создает экземпляр `JsonDocument` из потока, строки или буфера памяти:

```
using JsonDocument document = JsonDocument.Parse (jsonString);  
...
```

При вызове `Parse` можно дополнительно предоставлять объект `JsonDocumentOptions` для управления обработкой завершающих запятых, комментариев и максимальной глубины вложения (упомянутые параметры обсуждались в разделе “`JsonReaderOptions`” ранее в главе).

Экземпляр `JsonDocument` позволяет получить доступ к модели DOM через свойство `RootElement`:

```
using JsonDocument document = JsonDocument.Parse ("123");
JsonElement root = document.RootElement;
Console.WriteLine (root.ValueKind); // Number
```

Класс `JsonElement` способен представлять значение JSON (строку, число, `true/false`, `null`), массив или объект; свойство `ValueKind` указывает, что именно.



Методы, описанные в последующих разделах, генерируют исключение, если элемент не относится к ожидаемому типу. Если вы не уверены в корректности схемы файла JSON, то во избежание генерации таких исключений можете сначала проверить свойство `ValueKind` (или применять методы `TryGet*`).

Класс `JsonElement` также предлагает два метода, которые работают с элементом любого вида: `GetRawText` возвращает внутренние данные JSON, а `WriteTo` записывает элемент в `Utf8JsonWriter`.

Чтение простых значений

Если элемент представляет значение JSON, то его можно получить с помощью вызова `GetString`, `GetInt32`, `GetBoolean` и т.д.:

```
using JsonDocument document = JsonDocument.Parse ("123");
int number = document.RootElement.GetInt32();
```

Кроме того, в классе `JsonElement` имеются методы для разбора строк JSON в другие распространенные типы CLR, такие как `DateTime` (и даже двоичный тип `Base-64`). Существуют также версии `TryGet*`, которые предотвращают генерацию исключения в случае неудачи разбора.

Чтение массивов JSON

Если `JsonElement` представляет массив, то вы можете вызывать описанные ниже методы.

- `EnumerateArray()`. Выполняет перечисление всех элементов массива JSON (как экземпляров `JsonElement`).
- `GetArrayLength()`. Возвращает количество элементов в массиве.

Кроме того, вы можете использовать индексатор для возвращения элемента в определенной позиции:

```
using JsonDocument document = JsonDocument.Parse (@"[1, 2, 3, 4, 5]");
int length = document.RootElement.GetArrayLength(); // 5
int value = document.RootElement[3].GetInt32(); // 4
```

Чтение объектов JSON

Если элемент представляет объект JSON, тогда вы можете вызывать следующие методы.

- `EnumerateObject()`. Выполняет перечисление имен и значений всех свойств объекта.
- `GetProperty (string propertyName)`. Получает свойство по имени (возвращая еще один экземпляр `JsonElement`). Генерирует исключение, если свойство с указанным именем не существует.
- `TryGetProperty (string propertyName, out JsonElement value)`. Возвращает свойство объекта, если оно существует.

Например:

```
using JsonDocument document = JsonDocument.Parse(@"{ ""Age"": 32}");
JsonElement root = document.RootElement;
int age = root.GetProperty("Age").GetInt32();
```

Вот как можно было бы “обнаружить” свойство `Age`:

```
JsonProperty ageProp = root.EnumerateObject().First();
string name = ageProp.Name; // Age
JsonElement value = ageProp.Value;
Console.WriteLine(value.ValueKind); // Number
Console.WriteLine(value.GetInt32()); // 32
```

JsonDocument и LINQ

Класс `JsonDocument` хорошо сочетается с LINQ. Имея файл JSON с показанным ниже содержимым:

```
[
  {
    "FirstName": "Sara",
    "LastName": "Wells",
    "Age": 35,
    "Friends": ["Ian"]
  },
  {
    "FirstName": "Ian",
    "LastName": "Weems",
    "Age": 42,
    "Friends": ["Joe", "Eric", "Li"]
  },
  {
    "FirstName": "Dylan",
    "LastName": "Lockwood",
    "Age": 46,
    "Friends": ["Sara", "Ian"]
  }
]
```

мы можем применять `JsonDocument` для его запрашивания с помощью LINQ:

```
using var stream = File.OpenRead(jsonPath);
using JsonDocument document = JsonDocument.Parse(json);
var query =
  from person in document.RootElement.EnumerateArray()
```

```

select new
{
    FirstName = person.GetProperty ("FirstName").GetString(),
    Age = person.GetProperty ("Age").GetInt32(),
    Friends =
        from friend in person.GetProperty ("Friends").EnumerateArray()
        select friend.GetString()
};

```

Поскольку запросы LINQ оцениваются ленивым образом, важно организовать перечисление запроса до того, как документ покинет область видимости и экземпляр JsonDocument неявно освободится благодаря оператору `using`.

Выполнение обновлений с помощью средства записи JSON

Хотя экземпляр JsonDocument допускает только чтение, посредством метода `WriteTo` содержимое JsonElement можно отправить экземпляру `Utf8JsonWriter`, что образует механизм выпуска модифицированной версии данных JSON. Вот как можно взять содержимое файла JSON из предыдущего примера и записать его в новый файл JSON, включая только объекты людей с двумя и более друзьями:

```

using var json = File.OpenRead (jsonPath);
using JsonDocument document = JsonDocument.Parse (json);

var options = new JsonWriterOptions { Indented = true };

using (var outputStream = File.Create ("NewFile.json"))
using (var writer = new Utf8JsonWriter (outputStream, options))
{
    writer.WriteStartArray();
    foreach (var person in document.RootElement.EnumerateArray())
    {
        int friendCount = person.GetProperty ("Friends").GetArrayLength();
        if (friendCount >= 2)
            person.WriteTo (writer);
    }
}

```

Тем не менее, если вам нужна возможность обновления DOM-модели, тогда лучшим решением будет класс `JsonNode`.

Класс `JsonNode`

Класс `JsonNode` (из пространства имен `System.Text.Json.Nodes`) был введен в .NET 6 в первую очередь для удовлетворения спроса на записываемую DOM-модель. Однако он также подходит для сценариев, предусматривающих только чтение, и предоставляет несколько более гибкий интерфейс, поддерживаемый традиционной DOM-моделью, который использует классы для значений, массивов и объектов JSON (см. рис. 11.1). Из-за того, что они являются классами, с ними связаны накладные расходы на сборку мусора, но в большинстве реальных сценариев они, скорее всего, будут незначительными. Класс `JsonNode` высоко оптимизирован и может работать быстрее, чем `JsonDocument`, когда одни и те же узлы читаются многократно (поскольку `JsonNode`, несмотря на ленивое чтение, кеширует результаты разбора).

Статический метод Parse создает экземпляр JsonNode из потока данных, строки, буфера памяти или объекта Utf8JsonReader:

```
JsonNode node = JsonNode.Parse (jsonString);
```

При вызове Parse можно дополнительно предоставить объект JsonDocument Options для управления обработкой завершающих запятых, комментариев и максимальной глубины вложенности (эти параметры обсуждались в разделе “JsonReaderOptions” ранее в главе). В отличие от JsonDocument класс JsonNode не требует освобождения.



Вызов ToString() на JsonNode возвращает удобочитаемую (с отступами) строку JSON. Существует также метод ToJsonString(), который возвращает компактную строку JSON.

Начиная с версии .NET 8, класс JsonNode имеет статический метод DeepEquals, так что можно сравнивать два объекта JsonNode без предварительного их расширения в строки JSON. Кроме того, есть метод DeepClone из .NET 8.

Метод Parse возвращает подтип JsonNode, которым будет JsonValue, JsonObject или JSONArray. В классе JsonNode предусмотрены вспомогательные методы AsValue(), AsObject() и AsArray(), позволяющие избежать громоздких приведений вниз:

```
var node = JsonNode.Parse ("123"); // Выполняет разбор объекта JsonValue
int number = node.AsValue<int>().GetValue<int>();
// Сокращение для ((JsonValue)node).GetValue<int>();
```

Тем не менее, обычно вызывать эти методы не придется, поскольку наиболее часто используемые члены представлены в самом классе JsonNode:

```
var node = JsonNode.Parse ("123");
int number = node.GetValue<int>();
// Сокращение для node.AsValue().GetValue<int>();
```

Чтение простых значений

Только что было показано, что выполнить извлечение или разбор простого значения можно с помощью вызова GetValue с параметром типа. Для еще большего упрощения явные операции приведения C# в классе JsonNode перегружены, делая возможным применение следующей сокращенной версии кода:

```
var node = JsonNode.Parse ("123");
int number = (int) node;
```

Прием работает для стандартных числовых типов: char, bool, DateTime, DateTimeOffset и Guid (и их версий, допускающих значение null), а также string.

Если нет уверенности, что разбор будет успешным, тогда придется использовать такой код:

```
if (node.AsValue().TryGetValue<int> (out var number))
    Console.WriteLine (number);
```

В .NET 8 вызов `node.GetValueKind()` сообщает, чем является узел: строкой, числом, массивом, объектом или значением `true/false`.

Узлы, которые были получены в результате разбора текста JSON, внутренне поддерживаются `JsonElement` (часть API-интерфейса `JsonDocument`, допускающего только чтение). Извлечь лежащий в основе объект `JsonElement` можно следующим образом:

```
JsonElement je = node.GetValue<JsonElement>();
```

Однако прием не работает, когда экземпляр узла создается явно (как будет в случае обновления DOM-модели). Такие узлы поддерживаются не `JsonElement`, а фактическим значением после разбора (см. раздел “Обновление с помощью `JsonNode`” далее в главе).

Чтение массивов JSON

Экземпляр `JsonNode`, представляющий массив JSON, будет иметь тип `JsonArray`, который реализует `IList<JsonNode>`, поэтому можно выполнять его перечисление и получать доступ к элементам подобно обычному массиву или списку:

```
var node = JsonNode.Parse(@"[1, 2, 3, 4, 5]");
Console.WriteLine (node.AsArray().Count); // 5
foreach (JsonNode child in node.AsArray())
{ ... }
```

Если обратиться к индексатору напрямую из класса `JsonNode`, тогда код удастся сократить:

```
Console.WriteLine ((int)node[0]); // 1
```

Начиная с версии .NET 8, можно также вызывать метод `GetValues<T>` для возвращения данных в виде экземпляра реализации `IEnumerable<T>`:

```
int[] values = node.AsArray().GetValues<int>().ToArray();
```

Чтение объектов JSON

Экземпляр `JsonNode`, который представляет объект JSON, будет иметь тип `JsonObject`.

Класс `JsonObject` реализует интерфейс `IDictionary<string, JsonNode>`, поэтому можно получать доступ к члену через индексатор, а также выполнять перечисление пар “ключ/значение” словаря.

Как и в случае с `JsonArray`, обращаться к индексатору можно прямо из класса `JsonNode`:

```
var node = JsonNode.Parse(@"{ ""Name"": ""Alice"" , ""Age"": 32}");
string name = (string) node ["Name"]; // Alice
int age = (int) node ["Age"]; // 32
```

Вот как можно было бы “обнаружить” свойства `Name` и `Age`:

```
// Выполнить перечисление пар ключ/значение словаря:
foreach (KeyValuePair<string, JsonNode> keyValuePair in node.AsObject())
{
    string propertyName = keyValuePair.Key; // "Name" (затем "Age")
    JsonNode value = keyValuePair.Value;
}
```

Если вы не уверены, определено ли свойство, то подойдет следующий прием:

```
if (node.AsObject().TryGetProperty("Name", out JsonNode nameNode))  
{ ... }
```

Гибкий обход и LINQ

Вы можете глубоко проникнуть в иерархию с помощью только индексаторов. Например, имея следующий файл JSON:

```
[  
 {  
     "FirstName": "Sara",  
     "LastName": "Wells",  
     "Age": 35,  
     "Friends": ["Ian"]  
 },  
 {  
     "FirstName": "Ian",  
     "LastName": "Weems",  
     "Age": 42,  
     "Friends": ["Joe", "Eric", "Li"]  
 },  
 {  
     "FirstName": "Dylan",  
     "LastName": "Lockwood",  
     "Age": 46,  
     "Friends": ["Sara", "Ian"]  
 }  
 ]
```

Вот как можно извлечь третьего друга второго человека:

```
string li = (string) node[1]["Friends"][2];
```

Выполнять запросы в таком файле также легко посредством LINQ:

```
JsonNode node = JsonNode.Parse(File.ReadAllText(jsonPath));  
  
var query =  
    from person in node.AsArray()  
    select new  
    {  
        FirstName = (string) person["FirstName"],  
        Age = (int) person["Age"],  
        Friends =  
            from friend in person["Friends"].AsArray()  
            select (string) friend  
    };
```

В отличие от `JsonDocument` класс `JsonNode` не является освобождаемым, так что беспокоиться о возможности освобождения во время ленивого перечисления не нужно.

Обновление с помощью `JsonNode`

Классы `JsonObject` и `JsonArray` являются изменяемыми, поэтому можно обновлять их содержимое.

Самый простой способ замены или добавления свойств в `JsonObject` предусматривает применение индексатора. В следующем примере мы изменяем значение свойства `Color` с "Red" на "White" и добавляем новое свойство по имени `Valid`:

```
var node = JsonNode.Parse ("{ \"Color\": \"Red\" }");
node ["Color"] = "White";
node ["Valid"] = true;
Console.WriteLine (node.ToString()); // {"Color":"White","Valid":true}
```

Вторая строка в приведенном примере является сокращенной версией следующей строки:

```
node ["Color"] = JsonValue.Create ("White");
```

Вместо присваивания свойству простого значения можно присвоить ему экземпляр `JsonArray` или `JsonObject`. (В следующем разделе будет показано, каким образом создавать экземпляры `JsonArray` и `JsonObject`.)

Чтобы удалить свойство, сначала необходимо привести его к `JsonObject` (или вызвать `AsObject`), а затем вызвать метод `Remove`:

```
node.AsObject().Remove ("Valid");
```

(Класс `JsonObject` вдобавок предоставляет метод `Add`, который генерирует исключение, если свойство уже существует.)

Класс `JsonArray` также позволяет использовать индексатор для замены элементов:

```
var node = JsonNode.Parse ("[1, 2, 3]");
node[0] = 10;
```

Вызов `AsArray` открывает доступ к методам `Add/Insert/Remove/RemoveAt`. В следующем примере мы удаляем первый элемент массива и добавляем его в конец:

```
var arrayNode = JsonNode.Parse ("[1, 2, 3]");
arrayNode.AsArray().RemoveAt (0);
arrayNode.AsArray().Add (4);
Console.WriteLine (arrayNode.ToString()); // [2,3,4]
```

Начиная с версии .NET 8, обновлять экземпляр `JsonNode` можно с помощью вызова `ReplaceWith`:

```
var node = JsonNode.Parse ("{ \"Color\": \"Red\" }");
var color = node["Color"];
color.ReplaceWith ("Blue");
```

Конструирование DOM-модели `JsonNode` в коде

Классы `JsonArray` и `JsonObject` имеют конструкторы, поддерживающие синтаксис инициализации объекта, что позволяет построить всю DOM-модель `JsonNode` в одном выражении:

```
var node = new JSONArray
{
    new JSONObject {
        ["Name"] = "Tracy",
        ["Age"] = 30,
        ["Friends"] = new JSONArray ("Lisa", "Joe")
    },
    new JSONObject {
        ["Name"] = "Jordyn",
        ["Age"] = 25,
        ["Friends"] = new JSONArray ("Tracy", "Li")
    }
};
```

В результате получаются представленные ниже данные JSON:

```
[
    {
        "Name": "Tracy",
        "Age": 30,
        "Friends": ["Lisa", "Joe"]
    },
    {
        "Name": "Jordyn",
        "Age": 25,
        "Friends": ["Tracy", "Li"]
    }
]
```




Освобождение и сборка мусора

Некоторые объекты требуют написания явного кода для возврата таких ресурсов, как открытые файлы, блокировки, дескрипторы операционной системы и неуправляемые объекты. В терминологии .NET процедура называется освобождением и поддерживается через интерфейс `IDisposable`. Управляемая память, занятая неиспользуемыми объектами, тоже в какой-то момент должна быть возвращена; такая функция называется сборкой мусора и выполняется средой CLR.

Освобождение отличается от сборки мусора тем, что обычно оно инициируется явно, в то время как сборка мусора является полностью автоматической. Другими словами, программист заботится об освобождении файловых дескрипторов, блокировок и ресурсов операционной системы, а среда CLR занимается освобождением памяти.

В настоящей главе обсуждаются темы освобождения и сборки мусора, а также рассматриваются финализаторы C# и шаблон, согласно которому они могут предоставить страховку для освобождения. Наконец, здесь раскрываются тонкости сборщика мусора и другие варианты управления памятью.

`IDisposable`, `Dispose` и `Close`

В .NET определен специальный интерфейс для типов, требующих метода освобождения:

```
public interface IDisposable
{
    void Dispose();
}
```

Оператор `using` языка C# предлагает синтаксическое сокращение для вызова метода `Dispose` на объектах, которые реализуют интерфейс `IDisposable`, используя блок `try/finally`. Например:

```
using (FileStream fs = new FileStream ("myFile.txt", FileMode.Open))
{
    // ...Запись в файл...
}
```

Компилятор преобразует такой код следующим образом:

```
FileStream fs = new FileStream ("myFile.txt", FileMode.Open);
try
{
    // ...Запись в файл...
}
finally
{
    if (fs != null) ((IDisposable)fs).Dispose();
}
```

Блок `finally` гарантирует, что метод `Dispose` вызывается даже в случае генерации исключения или принудительного раннего выхода из блока.

Аналогичным образом показанный ниже синтаксис обеспечивает освобождение, когда `fs` покидает область видимости:

```
using FileStream fs = new FileStream ("myFile.txt", FileMode.Open);
// ...Запись в файл...
```

В простых сценариях создание собственного освобождаемого типа сводится просто к реализации интерфейса `IDisposable` и написанию метода `Dispose`:

```
sealed class Demo : IDisposable
{
    public void Dispose()
    {
        // Выполнить очистку/освобождение
        ...
    }
}
```



Такой шаблон хорошо работает в простых случаях и подходит для запечатанных классов. В разделе “Вызов метода `Dispose` из финализатора” далее в главе мы представим более продуманный шаблон, который может обеспечить страховку для потребителей, забывших вызвать `Dispose`. В случае незапечатанных типов есть веские основания следовать такому шаблону с самого начала — иначе наступит крупная путаница, когда подтипы сами пожелаю добавить функциональность подобного рода.

Стандартная семантика освобождения

Логика освобождения в .NET подчиняется фактическому набору правил. Эти правила не являются жестко привязанными к платформе .NET или к языку C#; их назначение заключается в том, чтобы определить согласованный протокол для потребителей. Правила описаны ниже.

1. После того, как объект был освобожден, он находится в “подвешенном” состоянии. Его нельзя реактивировать, а обращение к его методам или свойствам (отличающимся от `Dispose`) становится причиной генерации исключения `ObjectDisposedException`.
2. Многократный вызов метода `Dispose` объекта не приводит к ошибкам.
3. Если освобождаемый объект х “владеет” освобождаемым объектом у, то метод `Dispose` объекта х автоматически вызывает метод `Dispose` объекта у — при условии, что не указано иначе.
4. Перечисленные правила также полезны при написании собственных типов, хотя они не являются обязательными. Ничто не способно остановить вас от написания метода вроде “`Undispose`”, разве только перспектива получить взбучку от коллег по разработке!

Согласно правилу 3 объект контейнера автоматически освобождает свои дочерние объекты. Хорошим примером может служить контейнерный элемент управления Windows Forms, такой как `Form` или `Panel`. Контейнер может размещать множество дочерних элементов управления, однако вы не должны освобождать каждый из них явно: обо всех них позаботится закрываемый или освобождаемый родительский элемент управления либо форма. Еще один пример — помещение типа `FileStream` в оболочку `DeflateStream`. Освобождение `DeflateStream` также приводит к освобождению `FileStream` — если только в конструкторе не указано иное.

Close и **Stop**

Некоторые типы в дополнение к `Dispose` определяют метод по имени `Close`. Библиотека .NET BCL не полностью согласована относительно семантики метода `Close`, хотя почти во всех случаях он обладает одной из следующих характеристик:

- является функционально идентичным методу `Dispose`;
- реализует подмножество функциональности метода `Dispose`.

Второй характеристикой обладает, например, интерфейс `IDbConnection`: подключение с состоянием `Closed` (закрыто) можно повторно открыть посредством метода `Open`, но сделать это для освобожденного (по причине вызова `Dispose`) подключения нельзя. Другим примером может служить элемент `Form` из Windows Forms, активизированный с помощью метода `ShowDialog`: вызов `Close` скрывает этот элемент, а вызов `Dispose` освобождает его ресурсы.

В некоторых классах определен метод `Stop` (скажем, в `Timer` и `HttpListener`). Метод `Stop` может освобождать неуправляемые ресурсы подобно `Dispose`, но в отличие от `Dispose` он разрешает последующий перезапуск (посредством `Start`).

Когда выполнять освобождение

Безопасное правило, которому необходимо следовать (почти во всех случаях), формулируется так: если есть сомнения, тогда нужно освобождать.

Объекты, содержащие неуправляемый дескриптор ресурса, почти всегда требуют освобождения, чтобы освободить такой дескриптор. Примеры включают файловые или сетевые потоки, сетевые сокеты, элементы управления Windows Forms, перья, кисти и растровые изображения GDI+. И наоборот, если тип является освобождаемым, тогда он часто (но не всегда) ссылается на неуправляемый дескриптор, прямо или косвенно. Причина в том, что неуправляемые дескрипторы предоставляют шлюз во “внешний мир” ресурсам операционной системы, сетевым подключениям, блокировкам базы данных — основным средствам, из-за некорректного отбрасывания которых объекты могут создавать проблемы за своими пределами. Тем не менее, существуют три сценария, когда в освобождении нет необходимости:

- когда вы не “владеете” объектом, например, при получении общего объекта через статическое поле или свойство;
- когда метод Dispose объекта выполняет какое-то нежелательное действие;
- когда метод Dispose объекта является лишним согласно проекту, и освобождение такого объекта добавляет сложности программе.

Первый сценарий встречается редко. Основные случаи отражены в пространстве имен System.Drawing: объекты GDI+, получаемые через статические поля или свойства (такие как Brushes.Blue), никогда не должны освобождаться, поскольку один и тот же экземпляр задействован на протяжении всего времени жизни приложения. Однако экземпляры, которые получаются с помощью конструкторов (скажем, через new SolidBrush), должны быть освобождены, как и должны освобождаться экземпляры, полученные посредством статических методов (вроде Font.FromHdc).

Второй сценарий более распространен. В пространствах имен System.IO и System.Data можно найти ряд удачных примеров.

Тип	Что делает функция освобождения	Когда освобождение выполнять не нужно
MemoryStream	Предотвращает дальнейший ввод-вывод	Когда позже необходимо читать/записывать в поток
StreamReader, StreamWriter	Сбрасывает средство чтения/записи и закрывает лежащий в основе поток	Когда лежащий в основе поток должен быть сохранен открытый (по окончании потребуется вызвать метод Flush на объекте StreamWriter)
IDbConnection	Освобождает подключение к базе данных и очищает строку подключения	Если необходимо повторно открыть его с помощью Open, то должен быть вызван метод Close, а не Dispose
DbContext (EF Core)	Предотвращает дальнейшее использование	Когда могут существовать лениво оцениваемые запросы, подключенные к данному контексту

Метод `Dispose` класса `MemoryStream` делает недоступным только сам объект; он не выполняет никакой критически важной очистки, потому что `MemoryStream` не удерживает неуправляемые дескрипторы или другие ресурсы подобного рода.

Третий сценарий охватывает такие классы, как `StringReader` и `StringWriter`. Упомянутые типы являются освобождаемыми по принуждению их базового класса, а не по причине реальной потребности в выполнении необходимой очистки. Если приходится создавать и работать с таким объектом полностью внутри одного метода, тогда помещение его в блок `using` привносит лишь небольшое неудобство. Но если объект является более долговечным, то процедура выяснения, когда он больше не применяется и может быть освобожден, добавляет излишнюю сложность. В таких случаях можно просто проигнорировать освобождение объекта.



Игнорирование освобождения может иногда повлечь за собой снижение производительности (см. раздел “Вызов метода `Dispose` из финализатора” далее в главе).

Очистка полей при освобождении

В общем случае очищать поля объекта в его методе `Dispose` вовсе не обязательно. Тем не менее, рекомендуемой практикой является отмена подписки на события, на которые объект был подписан внутренне во время своего существования (пример приведен в разделе “Утечки управляемой памяти” далее в главе). Отмена подписки на события подобного рода позволяет избежать получения нежелательных уведомлений о событиях, а также непреднамеренного сохранения объекта в активном состоянии с точки зрения сборщика мусора (`garbage collector — GC`).



Сам по себе метод `Dispose` не вызывает освобождения (управляемой) памяти — это может произойти только при сборке мусора.

Стоит также установить какое-то поле, указывающее на факт освобождения объекта, чтобы можно было сгенерировать исключение `ObjectDisposedException`, если потребитель позже попытается обратиться к членам освобожденного объекта. Хороший шаблон предусматривает использование свойства, открытого для чтения:

```
public bool IsDisposed { get; private set; }
```

Хотя формально и необязательно, но неплохо также очистить собственные обработчики событий объекта (устанавливая их в `null`) в методе `Dispose`. Тем самым исключается возможность возникновения таких событий во время или после освобождения.

Иногда объект хранит ценную секретную информацию вроде ключей шифрования. В подобных случаях имеет смысл во время освобождения очистить такие данные в полях (во избежание их обнаружения другими процессами на машине, когда память позже передается операционной системе). Именно это делает класс

`SymmetricAlgorithm` из пространства имен `System.Security.Cryptography`, вызывая метод `Array.Clear` на байтовом массиве, который хранит ключ шифрования.

Анонимное освобождение

Иногда бывает полезно реализовать интерфейс `IDisposable` без написания класса. Например, предположим, что вы хотите предоставить доступ к методам класса, которые приостанавливают и возобновляют обработку событий:

```
class Foo
{
    int _suspendCount;

    public void SuspendEvents() => _suspendCount++;
    public void ResumeEvents() => _suspendCount--;

    void FireSomeEvent()
    {
        if (_suspendCount == 0)
            ...Запустить событие...
    }
    ...
}
```

Пользоваться таким API-интерфейсом неудобно. Потребители обязаны помнить о необходимости вызова метода `ResumeEvents`. И для надежности они должны вызывать его в блоке `finally` (на случай генерации исключения):

```
var foo = new Foo();
foo.SuspendEvents();
try
{
    ...Выполнение работы... //Из-за того, что здесь может возникнуть исключение,...
}
finally
{
    foo.ResumeEvents();    //...мы должны вызывать ResumeEvents в блоке finally.
}
```

Лучше избавиться от `ResumeEvents` и заставить метод `SuspendEvents` возвращать реализацию `IDisposable`. Тогда потребители смогут поступать так:

```
using (foo.SuspendEvents())
{
    ...Выполнение работы...
}
```

Проблема в том, что это увеличивает объем работы у того, кто должен реализовывать метод `SuspendEvents`. Даже приложив немалые усилия по сокращению, мы получаем добавочный беспорядок:

```
public IDisposable SuspendEvents()
{
    _suspendCount++;
    return new SuspendToken (this);
}
```

```

class SuspendToken : IDisposable
{
    Foo _foo;
    public SuspendToken (Foo foo) => _foo = foo;
    public void Dispose()
    {
        if (_foo != null) _foo._suspendCount--;
        _foo = null;           // Предотвратить двойное освобождение потребителем
    }
}

```

Проблему решает шаблон анонимного освобождения. С помощью следующего многократно используемого класса:

```

public class Disposable : IDisposable
{
    public static Disposable Create (Action onDispose)
        => new Disposable (onDispose);
    Action _onDispose;
    Disposable (Action onDispose) => _onDispose = onDispose;
    public void Dispose()
    {
        _onDispose?.Invoke(); // Выполнить действие освобождения, если не null.
        _onDispose = null;   // Обеспечить, чтобы его нельзя было выполнить еще раз
    }
}

```

мы можем сократить метод SuspendEvents:

```

public IDisposable SuspendEvents ()
{
    _suspendCount++;
    return Disposable.Create (() => _suspendCount--);
}

```

Автоматическая сборка мусора

Независимо от того, требует ли объект метода Dispose для специальной логики освобождения, в какой-то момент память, занимаемая им в куче, должна быть освобождена. Среда CLR обрабатывает данный аспект полностью автоматически посредством автоматического сборщика мусора. Вы никогда не освобождаете управляемую память самостоятельно. Например, взгляните на следующий метод:

```

public void Test ()
{
    byte[] myArray = new byte[1000];
    ...
}

```

Когда метод Test выполняется, в куче выделяется память под массив для удержания 1000 байтов. Ссылка на массив осуществляется через локальную переменную myArray, хранящуюся в стеке. Когда метод завершается, локальная переменная myArray покидает область видимости, а это значит, что ничего не

остается для ссылки на массив в куче. Висячий массив затем может быть утилизирован при сборке мусора.



В режиме отладки с отключенной оптимизацией время жизни объекта, на который производится ссылка с помощью локальной переменной, расширяется до конца блока кода, чтобы упростить процесс отладки. В противном случае объект становится пригодным для сборки мусора в самой ранней точке, после которой им перестали пользоваться.

Сборка мусора не происходит немедленно после того, как объект становится висячим. Почти как уборка мусора на улицах, она выполняется периодически, хотя (в отличие от уборки улиц) и не по фиксированному графику. Среда CLR основывает свое решение о том, когда инициировать сборку мусора, на ряде факторов, таких как доступная память, объем выделенной памяти и время, прошедшее с момента последней сборки (сборщик мусора самостоятельно подстраивается для оптимизации под конкретные шаблоны доступа в память). Это значит, что между моментом, когда объект становится висячим, и моментом, когда занятая объектом память будет освобождена, имеется неопределенная задержка. Такая задержка может варьироваться в пределах от наносекунд до дней.



Сборщик мусора не собирает весь мусор при каждой сборке. Взамен диспетчер памяти разделяет объекты на *поколения*, и сборщик мусора выполняет сборку новых поколений (недавно распределенных объектов) чаще, чем старых поколений (объектов, существующих на протяжении длительного времени). Мы обсудим принцип более подробно в разделе “Как работает сборщик мусора” далее в главе.

Сборка мусора и потребление памяти

Сборщик мусора старается соблюдать баланс между временем, затрачиваемым на сборку мусора, и потреблением памяти со стороны приложения (рабочий набор). Следовательно, приложения могут расходовать больше памяти, чем им необходимо, особенно если конструируются крупные временные массивы. Отслеживать потребление памяти процессом можно с помощью диспетчера задач Windows или монитора ресурсов — либо программно запрашивая счетчик производительности:

```
// Эти типы находятся в пространстве имен System.Diagnostics:  
string procName = Process.GetCurrentProcess().ProcessName;  
using PerformanceCounter pc = new PerformanceCounter  
    ("Process", "Private Bytes", procName);  
Console.WriteLine (pc.NextValue());
```

В данном коде запрашивается *закрытый рабочий набор*, который дает наилучшую общую картину потребления памяти программой. В частности, он исключает память, которую среда CLR освободила внутренне и готова возвратить операционной системе, если в данной памяти нуждается другой процесс.

Корневые объекты

Корневой объект — это то, что сохраняет определенный объект в активном состоянии. Если на какой-то объект нет прямой или косвенной ссылки со стороны корневого объекта, то он будет пригоден для сборки мусора.

Корневым объектом может выступать одна из следующих сущностей:

- локальная переменная или параметр в выполняющемся методе (или в любом методе внутри его стека вызовов);
- статическая переменная;
- объект в очереди, которая хранит объекты, готовые к финализации (см. следующий раздел).

Код в удаленном объекте не может выполняться, а потому если есть хоть какая-то вероятность выполнения некоторого метода (экземпляра), то на его объект должна существовать ссылка одним из указанных выше способов.

Обратите внимание, что группа объектов, которые циклически ссылаются друг на друга, считается висячей, если отсутствует ссылка из корневого объекта (рис. 12.1). Выражаясь по-другому, объекты, которые не могут быть доступны за счет следования по ссылкам (обозначенным стрелками) из корневого объекта, являются недостижимыми и таким образом подпадают под сборку мусора.

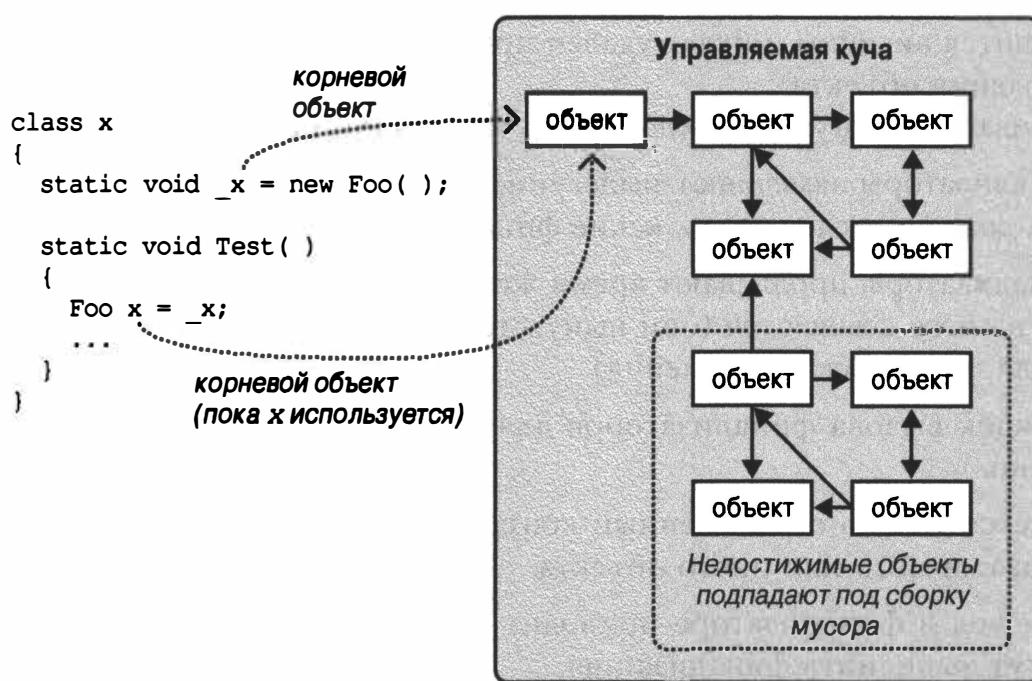


Рис. 12.1. Пример корневых объектов

Финализаторы

Перед освобождением объекта из памяти запускается его финализатор, если он предусмотрен. Финализатор объявляется подобно конструктору, но его имя снабжается префиксом ~:

```
class Test
{
    ~Test()
    {
        // Логика финализатора...
    }
}
```

(Несмотря на сходство в объявлении с конструктором, финализаторы не могут быть объявлены как `public` или `static`, не могут принимать параметры и не могут обращаться к базовому классу.)

Финализаторы возможны потому, что работа сборки мусора организована в виде отличающихся фаз. Первым делом сборщик мусора идентифицирует неиспользуемые объекты, готовые к удалению. Те из них, которые не имеют финализаторов, удаляются немедленно. Те из них, которые располагают отложенными (незапущенными) финализаторами, сохраняются в активном состоянии (на текущий момент) и помещаются в специальную очередь.

В данной точке сборка мусора завершена, и программа продолжает выполнение. Затем параллельно программе начинает выполняться поток финализаторов, который выбирает объекты из этой специальной очереди и запускает их методы финализации. Перед запуском финализатора каждый объект по-прежнему активен — специальная очередь действует в качестве корневого объекта. После того, как объект извлечен из очереди, а его финализатор выполнен, объект становится висячим и будет удален при следующей сборке мусора (для данного поколения объекта).

Финализаторы могут быть удобными, но с рядом оговорок.

- Финализаторы замедляют выделение и утилизацию памяти (сборщик мусора должен отслеживать, какие финализаторы были запущены).
- Финализаторы продлевают время жизни объекта и любых объектов, которые на него ссылаются (они вынуждены ожидать очередной сборки мусора для фактического удаления).
- Порядок вызова финализаторов для набора объектов предсказать невозможно.
- Имеется только ограниченный контроль над тем, когда будет вызван финализатор того или иного объекта.
- Если код в финализаторе приводит к блокировке, то другие объекты не смогут выполнить финализацию.
- Финализаторы могут вообще не запуститься, если приложение не смогло выгрузиться чисто.

В целом финализаторы кое в чем похожи на юристов — хотя и бывают ситуации, когда они действительно нужны, обычно прибегать к их услугам желания нет, разве что в случае крайней необходимости. К тому же, если вы решили воспользоваться услугами юристов, то должны быть абсолютно уверены в понимании того, что они делают для вас.

Ниже приведены некоторые руководящие принципы, применяемые при реализации финализаторов.

- Удостоверьтесь, что финализатор выполняется быстро.
- Никогда не блокируйте финализатор (см. раздел “Блокирование” главы 14).
- Не ссылайтесь на другие финализируемые объекты.
- Не генерируйте исключения.



Среда CLR может вызвать финализатор объекта, даже если во время конструирования сгенерировано исключение. По этой причине при написании финализатора лучше не предполагать, что все поля были корректно инициализированы.

ВЫЗОВ МЕТОДА `Dispose` ИЗ ФИНАЛИЗАТОРА

Популярный шаблон предусматривает вызов в финализаторе метода `Dispose`. Подобное действие имеет смысл, когда очистка не является срочной, и ее ускорение вызовом метода `Dispose` является больше оптимизацией, нежели необходимости.



Имейте в виду, что в данном шаблоне вы объединяете вместе освобождение памяти и освобождение ресурсов — две вещи с потенциально несовпадающими интересами (если только сам ресурс не является памятью). Вы также увеличиваете нагрузку на поток финализации.

Такой шаблон также служит в качестве страховки для случаев, когда потребитель попросту забывает вызвать метод `Dispose`. Однако затем подобную небрежность неплохо бы зарегистрировать в журнале, чтобы впоследствии исправить ошибку.

Ниже показан стандартный шаблон реализации:

```
class Test : IDisposable
{
    public void Dispose()           // НЕ virtual
    {
        Dispose (true);
        GC.SuppressFinalize (this); // Препятствует запуску финализатора
    }
    protected virtual void Dispose (bool disposing)
    {
        if (disposing)
        {
            // Вызывать метод Dispose на других объектах, которыми владеет данный
            // экземпляр. Здесь можно ссылаться на другие финализируемые объекты.
            // ...
        }
        // Освободить неуправляемые ресурсы, которыми владеет (только) этот объект
        // ...
    }
    ~Test () => Dispose (false);
}
```

Метод `Dispose` перегружен для приема флага `disposing` типа `bool`. Версия без параметров не объявлена как `virtual` и просто вызывает расширенную версию `Dispose` с передачей ей значения `true`.

Расширенная версия содержит действительную логику освобождения и помечена как `protected` и `virtual`, предоставляя подклассам безопасную точку для добавления собственной логики освобождения. Флаг `disposing` означает, что он вызывается “надлежащим образом” из метода `Dispose`, а не в “режиме крайнего средства” из финализатора. Идея заключается в том, что при вызове с флагом `disposing`, установленным в `false`, этот метод в общем случае не должен ссылаться на другие объекты с финализаторами (поскольку такие объекты сами могут быть финализированными и потому находиться в непредсказуемом состоянии). Как видите, правила исключают довольно многое! Существует пара задач, которые метод `Dispose` по-прежнему может выполнять в режиме крайнего средства, когда `disposing` равно `false`:

- освобождение любых прямых ссылок на ресурсы операционной системы (полученных возможно через обращение P/Invoke к Win32 API);
- удаление временного файла, созданного при конструировании.

Чтобы сделать описанный подход надежным, любой код, способный генерировать исключение, должен быть помещен в блок `try/catch`, а исключение в идеальном случае необходимо регистрировать в журнале. Любая регистрация в журнале должна быть насколько возможно простой и надежной.

Обратите внимание, что внутри метода `Dispose` без параметров мы вызываем метод `GC.SuppressFinalize` — это предотвращает запуск финализатора, когда сборщик мусора позже доберется до него. Формально подобное неизбежно, т.к. методы `Dispose` должны допускать многократные вызовы. Тем не менее, такой прием повышает производительность, потому что позволяет подвергнуть данный объект (и объекты, которые на него ссылаются) процедуре сборки мусора в единственном цикле.

Восстановление

Предположим, что финализатор модифицирует активный объект так, что он снова ссылается на неактивный объект. Во время очередной сборки мусора (для поколения объекта) среда CLR выяснит, что ранее неактивный объект больше не является висячим, поэтому он должен избежать сборки мусора. Такой расширенный сценарий называется восстановлением.

В целях иллюстрации предположим, что нужно написать класс, который управляет временным файлом. Во время сборки мусора для экземпляра данного класса финализатор класса должен удалить временный файл. Решение задачи кажется простым:

```
public class TempFileRef
{
    public readonly string FilePath;
    public TempFileRef (string filePath) { FilePath = filePath; }
    ~TempFileRef() { File.Delete (FilePath); }
}
```

К сожалению, здесь присутствует ошибка: вызов метода `File.Delete` может генерировать исключение (возможно, из-за нехватки разрешений, по причине того, что файл в текущий момент используется, или файл уже был удален). Такое исключение привело бы к нарушению работы всего приложения (и воспрепятствовало бы запуску других финализаторов). Мы могли бы просто “поглотить” исключение с помощью пустого блока перехвата, но тогда не было бы известно, что именно пошло не так. Обращение к какому-то хорошо продуманному API-интерфейсу сообщения об ошибках тоже нежелательно, поскольку это привнесет накладные расходы в поток финализаторов, затрудняя проведение сборки мусора для других объектов. Мы хотим, чтобы действия финализации были простыми, надежными и быстрыми.

Более удачное решение предполагает запись информации об отказе в статическую коллекцию:

```
public class TempFileRef
{
    static internal readonly ConcurrentQueue<TempFileRef> FailedDeletions
        = new ConcurrentQueue<TempFileRef>();
    public readonly string FilePath;
    public Exception DeletionError { get; private set; }
    public TempFileRef (string filePath) { FilePath = filePath; }
    ~TempFileRef()
    {
        try { File.Delete (FilePath); }
        catch (Exception ex)
        {
            DeletionError = ex;
            FailedDeletions.Enqueue (this); // Восстановление
        }
    }
}
```

Занесение объекта в статическую коллекцию `FailedDeletions` предоставляет ему еще одну ссылку, гарантируя тем самым, что он останется активным до тех пор, пока со временем не будет изъят из этой коллекции.



Класс `ConcurrentQueue<T>` является безопасной к потокам версией класса `Queue<T>` и определен в пространстве имен `System.Collections.Concurrent` (см. главу 22). Коллекция, безопасная к потокам, применяется по двум причинам. Во-первых, среда CLR резервирует право на выполнение финализаторов более чем одному потоку параллельно. Это значит, что при доступе к общему состоянию, такому как статическая коллекция, мы должны учитывать возможность одновременной финализации двух объектов. Во-вторых, в определенный момент понадобится изъять элементы из `FailedDeletions`, чтобы предпринять в отношении них какие-то действия. Действия должны выполняться также в безопасной к потокам манере, потому что они могут происходить одновременно с занесением в коллекцию другого объекта финализатором.

GC.ReRegisterForFinalize

Финализатор восстановленного объекта не запустится во второй раз, если только не вызвать метод `GC.ReRegisterForFinalize`.

В следующем примере мы пытаемся удалить временный файл внутри финализатора (как в последнем примере). Но если удаление терпит неудачу, то мы повторно регистрируем объект, чтобы предпринять новую попытку при следующей сборке мусора:

```
public class TempFileRef
{
    public readonly string FilePath;
    int _deleteAttempt;

    public TempFileRef (string filePath) { FilePath = filePath; }

    ~TempFileRef()
    {
        try { File.Delete (FilePath); }
        catch
        {
            if (_deleteAttempt++ < 3) GC.ReRegisterForFinalize (this);
        }
    }
}
```

После третьей неудавшейся попытки финализатор молча отказывается от удаления файла. Мы могли бы расширить такое поведение, скомбинировав его с предыдущим примером — другими словами, после третьего отказа добавить объект в очередь `FailedDeletions`.



Позаботьтесь о том, чтобы метод `ReRegisterForFinalize` вызывался в финализаторе только один раз. Двукратный вызов приведет к тому, что объект будет перерегистрирован дважды и ему придется пройти две дополнительных финализации!

Как работает сборщик мусора

Стандартная среда CLR использует сборщик мусора с поддержкой поколений, пометки и сжатия, который осуществляет автоматическое управление памятью для объектов, хранящихся в управляемой куче. Сборщик мусора считается отслеживающим в том, что он не вмешивается в каждый доступ к объекту, а взамен активизируется периодически и отслеживает граф объектов, хранящихся в управляемой куче, с целью определения объектов, которые могут расцениваться как мусор и потому подвергаться сборке.

Сборщик мусора инициирует процесс сборки при выделении памяти (через ключевое слово `new`) либо после того, как выделенный объем памяти превысил определенный порог, либо в другие моменты, чтобы уменьшить объем памяти, занимаемой приложением. Процесс сборки можно также активизировать вручную, вызвав метод `System.GC.Collect`. Во время сборки мусора все потоки могут быть заморожены (более подробно об этом рассказывается в следующем разделе).

Сборщик мусора начинает со ссылок на корневые объекты и проходит по графу объектов, помечая все затрагиваемые им объекты как достижимые. После завершения процесса все объекты, которые не были помечены, считаются неиспользуемыми и пригодными к сборке мусора.

Неиспользуемые объекты без финализаторов отбрасываются немедленно, а неиспользуемые объекты с финализаторами помещаются в очередь для обработки потоком финализаторов после завершения сборщика мусора. Эти объекты затем становятся пригодными к сборке при следующем запуске сборщика мусора для данного поколения объектов (если только они не будут восстановлены).

Оставшиеся активные объекты затем смещаются в начало кучи (сжимаются), освобождая пространство под дополнительные объекты. Сжатие служит двум целям: оно устраниет фрагментацию памяти и позволяет сборщику мусора при выделении памяти под новые объекты применять очень простую стратегию — всегда выделять память в конце кучи. Подобный подход позволяет избежать выполнения потенциально длительной задачи по ведению списка сегментов свободной памяти.

Если оказывается, что после сборки мусора памяти для размещения нового объекта недостаточно, и операционная система не может выделить дополнительную память, тогда генерируется исключение `OutOfMemoryException`.



Вы можете получать информацию о текущем состоянии управляемой кучи с помощью вызова `GC.GetGCMemoryInfo()`. Начиная с версии .NET 5, этот метод был расширен для возвращения данных, связанных с производительностью.

Приемы оптимизации

Для сокращения времени сборки мусора в сборщике предпринимаются разнообразные приемы оптимизации.

Сборка с учетом поколений

Самая важная оптимизация связана с тем, что сборщик мусора поддерживает поколения. Концепция поколений извлекает преимущества из того факта, что хотя многие объекты распределяются и быстро отбрасываются, некоторые объекты существуют длительное время, поэтому не должны отслеживаться в течение каждой сборки.

По существу сборщик мусора разделяет управляемую кучу на три поколения. Объекты, которые были только что распределены, относятся к поколению `Gen0`, объекты, выдержавшие один цикл сборки — к поколению `Gen1`, а все остальные объекты — к поколению `Gen2`. Поколения `Gen0` и `Gen1` называются недолговечными.

Среда CLR сохраняет раздел `Gen0` относительно небольшим (с типичным размером от сотен килобайтов до нескольких мегабайтов). Когда раздел `Gen0` заполняется, сборщик мусора `GC` вызывает сборку `Gen0` — что происходит относительно часто. Сборщик мусора применяет похожий порог памяти к разделу

Gen1 (который действует в качестве буфера для Gen2), поэтому сборки Gen1 тоже являются относительно быстрыми и частыми. Однако полные сборки мусора, включающие Gen2, занимают намного больше времени и в итоге происходят нечасто. Результат полной сборки мусора показан на рис. 12.2.

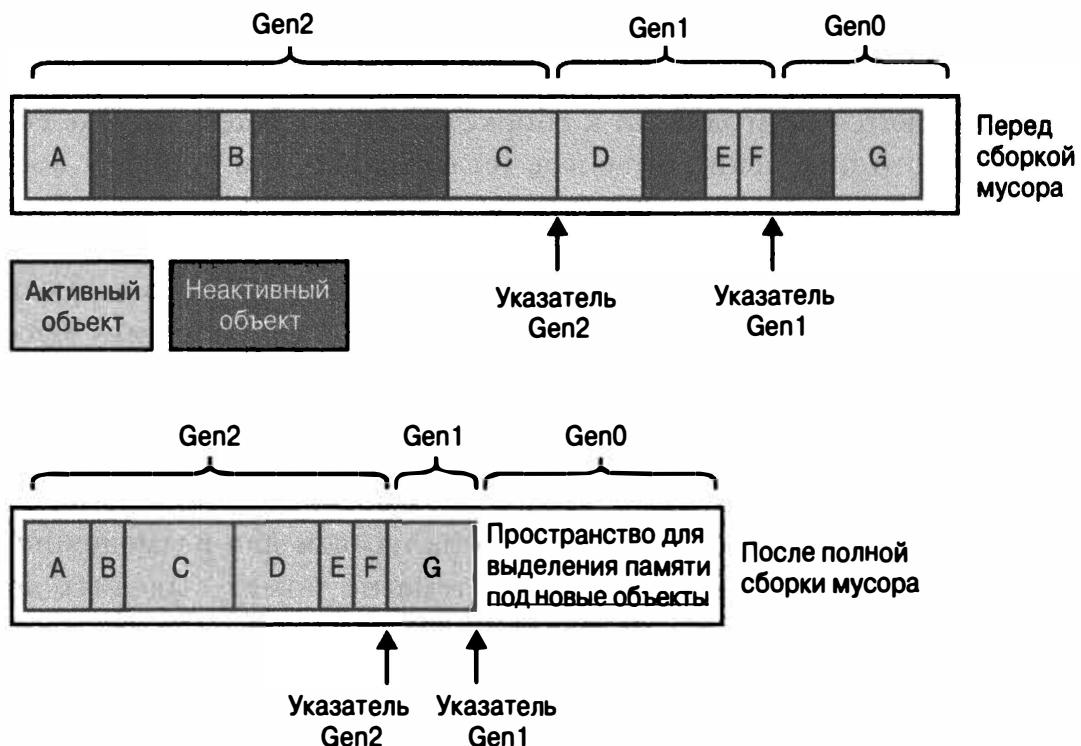


Рис. 12.2. Поколения кучи

Вот очень приблизительные цифры: сборка Gen0 может занимать менее одной миллисекунды, так что заметить ее в типовом приложении нереально. Но полная сборка мусора в программе с крупными графиками объектов может длиться примерно 100 мс. Цифры зависят от множества факторов и могут значительно варьироваться — особенно в случае раздела Gen2, размер которого не ограничен (в отличие от разделов Gen0 и Gen1).

В результате кратко живущие объекты очень эффективны в своем использовании сборщика мусора. Экземпляры `StringBuilder`, создаваемые в следующем методе, почти наверняка будут собраны при быстрой сборке Gen0:

```
string Foo()
{
    var sb1 = new StringBuilder ("test");
    sb1.Append (...);
    var sb2 = new StringBuilder ("test");
    sb2.Append (sb1.ToString ());
    return sb2.ToString ();
}
```

Куча для массивных объектов

Для объектов, размеры которых превышают определенный порог (в настоящее время составляющий 85 000 байтов), сборщик мусора применяет отдельную область, которая называется кучей для массивных объектов (Large Object

Heap — LOH). Она позволяет избежать накладных расходов по сжатию крупных объектов, а также избыточных сборок Gen0 — без области LOH распределение последовательности объектов размером 16 Мбайт каждый могло бы приводить к запуску сборки Gen0 после каждого распределения.

По умолчанию область LOH не сжимается, поскольку перемещение крупных блоков памяти во время сборки мусора будет чрезмерно затратным. Отсюда два последствия.

- Выделение памяти может стать медленнее, т.к. сборщик мусора не всегда способен просто распределять объекты в конце кучи — он должен также искать промежутки в середине, что требует поддержки связного списка свободных блоков памяти¹.
- Область LOH подвержена фрагментации. Это значит, что освобождение объекта может привести к возникновению дыры в LOH, которую впоследствии трудно заполнить. Например, дыра, оставленная 86000-байтовым объектом, может быть заполнена только объектом с размером между 85 000 и 86 000 байтов (если только рядом не примыкает еще одна дыра).

Если вы ожидаете проблем с фрагментацией, то можете проинструктировать сборщик мусора о необходимости сжатия области LOH при следующей сборке:

```
GCSettings.LargeObjectHeapCompactionMode =  
    GCLargeObjectHeapCompactionMode.CompactOnce;
```

Еще один обходной путь на тот случай, когда ваша программа часто выделяет память под крупные массивы, предусматривает использование API-интерфейса для работы с пулом массивов (см. раздел “Организация пула массивов” далее в главе).

Куча для массивных объектов не поддерживает концепцию поколений: все объекты трактуются как относящиеся к поколению Gen2.

Сравнение сборки мусора в режиме рабочей станции и в режиме сервера

.NET предлагает два режима сборки мусора: режим рабочей станции и режим сервера. По умолчанию выбирается режим рабочей станции; вы можете переключиться на режим сервера, добавив в файл .csproj приложения следующие строки:

```
<PropertyGroup>  
    <ServerGarbageCollection>true</ServerGarbageCollection>  
</PropertyGroup>
```

При компиляции проекта эта настройка записывается в файл runtimeconfig.json приложения, откуда она читается средой CLR:

```
"runtimeOptions": {  
    "configProperties": {  
        "System.GC.Server": true  
    ...
```

¹ То же самое может иногда возникать в куче с поколениями из-за закрепления (см. раздел “Оператор fixed” в главе 4).

Когда включена сборка мусора в режиме сервера, среда CLR выделяет отдельную кучу и сборщик мусора для каждого ядра. В итоге сборка мусора ускоряется, но потребляет дополнительную память и ресурсы центрального процессора (поскольку каждое ядро требует собственного потока). Если на машине функционирует много других процессов и включена сборка мусора в режиме сервера, то это может привести к “избыточному использованию” центрального процессора, что особенно вредно на рабочих станциях, т.к. из-за него операционная система практически перестает реагировать на запросы.

Сборка мусора в режиме сервера доступна только в многоядерных системах: на одноядерных устройствах (или одноядерных виртуальных машинах) данная настройка игнорируется.

Фоновая сборка мусора

И в режиме рабочей станции, и в режиме сервера среда CLR по умолчанию включает фоновую сборку мусора. Вы можете отключить ее, добавив в файл .csproj приложения следующие строки:

```
<PropertyGroup>
  <ConcurrentGarbageCollection>false</ConcurrentGarbageCollection>
</PropertyGroup>
```

При компиляции проекта эта настройка записывается в файл .runtimeconfig.json приложения:

```
"runtimeOptions": {
  "configProperties": {
    "System.GC.Concurrent": false,
    ...
  }
}
```

Сборщик мусора обязан замораживать (блокировать) ваши потоки выполнения на период проведения сборки мусора. Фоновая сборка мусора сводит к минимуму такие периоды ожидания, делая ваше приложение более отзывчивым. Это происходит за счет потребления чуть большего объема ресурсов центрального процессора и памяти. Таким образом, отключая фоновую сборку мусора, вы достигаете следующих целей:

- слегка уменьшаете степень использования центрального процессора и памяти;
- увеличиваете паузы (или время ожидания), когда происходит сборка мусора.

Фоновая сборка мусора позволяет вашему прикладному коду выполняться параллельно со сборкой поколения Gen2. (Сборки поколений Gen0 и Gen1 считаются достаточно быстрыми, чтобы иметь возможность извлечь преимущество от такого параллелизма.)

Фоновая сборка мусора является улучшенной версией того, что ранее называлось параллельной сборкой мусора: в ней устранено ограничение, согласно которому параллельная сборка мусора перестает быть параллельной, когда во время выполнения сборки Gen2 заполнится раздел Gen0. В результате приложения, которые постоянно выделяют память, становятся более отзывчивыми.

Уведомления от сборщика мусора

В случае отключения фоновой сборки мусора вы можете запросить у сборщика мусора выдачу уведомления непосредственно перед началом полной (блокирующей) сборки мусора. Это предназначено для конфигураций ферм серверов: идея состоит в переадресации запросов другим серверам прямо перед началом сборки мусора. Затем немедленно инициируется сборка мусора и производится ожидание ее завершения перед переадресацией запросов обратно данному серверу.

Чтобы начать выдачу уведомлений, необходимо вызывать метод `GC.RegisterForFullGCNotification`. Далее потребуется запустить другой поток (см. главу 14), в котором сначала вызывается метод `GC.WaitForFullGCApproach`. Когда этот метод возвратит значение перечисления `GCNotificationStatus`, указывающее на то, что сборка мусора уже близко, можно переадресовывать запросы другим серверам и принудительно запускать сборку мусора вручную (см. следующий раздел). Затем нужно вызвать метод `GC.WaitForFullGCCComplete`: по возвращению управления из данного метода сборка мусора завершена, и можно снова принимать запросы. После этого весь цикл повторяется.

Принудительный запуск сборки мусора

Сборку мусора можно запустить принудительно в любой момент, вызвав метод `GC.Collect`. Вызов `GC.Collect` без аргумента инициирует полную сборку мусора. Если передать целочисленное значение, тогда сборка выполнится для поколений, начиная с `Gen0` и заканчивая поколением, номер которого соответствует указанному значению; таким образом, `GC.Collect(0)` выполняет только быструю сборку `Gen0`.

Обычно наилучшие показатели производительности можно получить, позволив сборщику мусора самостоятельно решать, что именно собирать: принудительная сборка мусора может нанести ущерб производительности за счет излишнего перевода объектов поколения `Gen0` в поколение `Gen1` (и объектов поколения `Gen1` в поколение `Gen2`). Принудительная сборка также нарушит возможность самонастройки сборщика мусора, посредством которой сборщик динамически регулирует пороги для каждого поколения, чтобы добиться максимальной производительности во время работы приложения.

Тем не менее, существуют два исключения. Наиболее распространенным сценарием для вмешательства является ситуация, когда приложение собирается перейти в режим сна на некоторое время: хорошим примером может быть Windows-служба, которая выполняет ежесуточное действие (скажем, проверку обновлений). Такое приложение может использовать объект `System.Timers.Timer` для запуска действия каждые 24 часа. После завершения действия никакой другой код в течение 24 часов выполняться не будет, т.е. в данный период выделение памяти не делается и сборщик мусора не имеет шансов быть активизированным. Сколько бы памяти служба не потребила во время выполнения своего действия, память продолжит быть занятой в течение следующих 24 часов даже при пустом графе объектов! Решение предусматривает вызов метода `GC.Collect` сразу после завершения ежесуточного действия.

Чтобы обеспечить сборку мусора в отношении объектов, для которых она отложена финализаторами, необходимо предпринять дополнительный шаг — вызвать метод `WaitForPendingFinalizers` и запустить сборщик мусора еще раз:

```
GC.Collect();
GC.WaitForPendingFinalizers();
GC.Collect();
```

Часто это делается в цикле: действие по выполнению финализаторов может освободить больше объектов, а не только те, которые имеют финализаторы.

Еще один сценарий для вызова метода `GC.Collect` связан с тестированием класса, располагающего финализатором.

Настройка сборки мусора во время выполнения

Статическое свойство `GCSettings.LatencyMode` определяет способ, которым сборщик мусора балансирует задержку и общую эффективность. Изменение значения данного свойства со стандартного `Interactive` на `LowLatency` или `SustainedLowLatency` указывает среде CLR на необходимость применения более быстрых (но более частых) процедур сборки мусора. Это полезно, если приложение нуждается в очень быстром реагировании на события, возникающие в реальном времени. Изменение режима на `Batch` доводит до максимума производительность за счет потенциально низкой скорости реагирования, что полезно для пакетной обработки.

Режим `SustainedLowLatency` не поддерживается, если вы отключили фоновую сборку мусора в файле `.runtimeconfig.json`.

Кроме того, вы можете сообщить среде CLR о том, что сборка мусора должна быть временно приостановлена, вызвав метод `GC.TryStartNoGCRegion`, и затем возобновить ее с помощью метода `GC.EndNoGCRegion`.

Нагрузка на память

Исполняющая среда решает, когда инициировать сборку мусора, на основе нескольких факторов, в числе которых общая загрузка памяти на машине. Если программа выделяет неуправляемую память (см. главу 24), то исполняющая среда получит нереалистично оптимистическое представление об использовании памяти программой, потому что среде CLR известно только об управляемой памяти. Чтобы ослабить такое влияние, можно проинструктировать среду CLR о необходимости учесть выделение указанного объема неуправляемой памяти, вызвав метод `GC.AddMemoryPressure`. Чтобы отменить это (когда неуправляемая память освобождена), потребуется вызвать метод `GC.RemoveMemoryPressure`.

Организация пула массивов

Если ваше приложение часто создает экземпляры массивов, то вы можете избежать большей части накладных расходов, связанных со сборкой мусора, за счет организации пула массивов. Средство пула массивов появилось в .NET Core 3 и работает путем “аренды” массива, который позже возвращается в пул для повторного использования.

Чтобы создать экземпляр массива, вызовите метод `Rent` класса `ArrayPool` из пространства имен `System.Buffers`, указав желаемый размер массива:

```
int[] pooledArray = ArrayPool<int>.Shared.Rent (100); // 100 байтов
```

Такой вызов приведет к выделению массива размером (по крайней мере) 100 байтов из глобального общего пула массивов. Диспетчер пула может предоставить вам массив, размер которого больше запрошенного вами (обычно размер является степенью 2).

Завершив работу с массивом, вызовите метод `Return`, который вернет массив в пул, позволяя арендовать его снова:

```
ArrayPool<int>.Shared.Return (pooledArray);
```

Вы можете дополнительно передать булевское значение, указывающее диспетчеру пула на необходимость очистки массива перед его возвращением в пул.



Ограничение организации пула массивов связано с отсутствием возможности воспрепятствовать дальнейшему (незаконному) использованию массива после его возвращения в пул, поэтому вы должны внимательно писать код, чтобы избежать такого сценария. Имейте в виду, что вы способны нарушить работу не только своего кода, но и других API-интерфейсов, эксплуатирующих пул массивов, наподобие ASP.NET Core.

Вместо применения общего пула массивов вы можете создать специальный пул и арендовать массивы из него. Такой подход устраниет риск нарушения работы других API-интерфейсов, но увеличивает общий расход памяти (как и снижает возможности для многократного использования):

```
var myPool = ArrayPool<int>.Create();
int[] array = myPool.Rent (100);
...
```

Утечки управляемой памяти

В неуправляемых языках вроде C++ вы должны не забывать об освобождении памяти вручную, когда объект больше не требуется; в противном случае возникнет утечка памяти. В мире управляемых языков такая ошибка невозможна, поскольку в среде CLR существует система автоматической сборки мусора.

Несмотря на это, крупные и сложные приложения .NET могут демонстрировать аналогичный синдром в легкой форме с тем же самым конечным результатом: с течением времени жизни приложение потребляет все больше и больше памяти до тех пор, пока его не придется перезапустить. Хорошая новость в том, что утечки управляемой памяти обычно легче диагностировать и предотвращать.

Утечки управляемой памяти связаны с неиспользуемыми объектами, которые остаются активными по причине существования неиспользуемых или забытых ссылок на них. Распространенным кандидатом являются обработчики событий — онидерживают ссылку на целевой объект (если только он не является статическим методом). Например, взгляните на следующие классы:

```

class Host
{
    public event EventHandler Click;
}

class Client
{
    Host _host;
    public Client (Host host)
    {
        _host = host;
        _host.Click += HostClicked;
    }
    void HostClicked (object sender, EventArgs e) { ... }
}

```

Приведенный ниже тестовый класс содержит метод, который создает 1000 экземпляров класса Client:

```

class Test
{
    static Host _host = new Host();
    public static void CreateClients()
    {
        Client[] clients = Enumerable.Range (0, 1000)
            .Select (i => new Client (_host))
            .ToArray();
        // Делать что-нибудь с экземплярами класса Client...
    }
}

```

Может показаться, что после того, как метод CreateClients завершит выполнение, тысяча объектов Client станут пригодными для сборки мусора. К сожалению, на каждый объект Client имеется еще одна ссылка: объект _host, событие Click которого теперь ссылается на экземпляр Client. Данный факт может остаться незамеченным, если событие Click не возникает — или если метод HostClicked не делает ничего такого, что привлекало бы внимание.

Один из способов решения проблемы — обеспечить, чтобы класс Client реализовывал интерфейс IDisposable, и в методе Dispose отсоединиться от обработчика событий:

```
public void Dispose() { _host.Click -= HostClicked; }
```

Тогда потребители класса Client освободят его экземпляры после завершения работы с ними:

```
Array.ForEach (clients, c => c.Dispose());
```



В разделе “Слабые ссылки” далее в главе мы опишем другое решение этой проблемы, которое может оказаться удобным в средах, где освобождаемые объекты, как правило, не применяются (примером такой среды может служить WPF). В действительности инфраструктура WPF предлагает класс по имени WeakEventManager, который задействует шаблон использования слабых ссылок.

Таймеры

Забытые таймеры тоже приводят к утечкам памяти (таймеры обсуждаются в главе 21). В зависимости от вида таймера существуют два отличающихся сценария. Давайте сначала рассмотрим таймер в пространстве имен `System.Timers`. В следующем примере класс `Foo` (когда создан его экземпляр) вызывает метод `tmr_Elapsed` каждую секунду:

```
using System.Timers;  
class Foo  
{  
    Timer _timer;  
    Foo()  
    {  
        _timer = new System.Timers.Timer { Interval = 1000 };  
        _timer.Elapsed += tmr_Elapsed;  
        _timer.Start();  
    }  
    void tmr_Elapsed (object sender, ElapsedEventArgs e) { ... }  
}
```

К сожалению, экземпляры `Foo` никогда не смогут быть обработаны сборщиком мусора! Проблема в том, что сама исполняющая среда удерживает ссылки на активные таймеры, чтобы они могли запускать свои события `Elapsed`. Таким образом:

- исполняющая среда будет удерживать `_timer` в активном состоянии;
- `_timer` будет удерживать экземпляр `Foo` в активном состоянии через обработчик событий `tmr_Elapsed`.

Решение станет очевидным, как только вы осознаете, что класс `Timer` реализует интерфейс `IDisposable`. Освобождение таймера останавливает его и гарантирует, что исполняющая среда больше не ссылается на данный объект:

```
class Foo : IDisposable  
{  
    ...  
    public void Dispose() { _timer.Dispose(); }  
}
```



Полезный руководящий принцип предусматривает реализацию интерфейса `IDisposable`, если хоть одному полю в классе присваивается объект, который реализует `IDisposable`.

Касательно того, что уже обсуждалось: таймеры WPF и Windows Forms ведут себя аналогично.

Однако таймер из пространства имен `System.Threading` является особым. Ссылки на активные потоковые таймеры .NET не хранит, а взамен напрямую ссылается на делегаты обратного вызова. Таким образом, если вы забудете освободить потоковый таймер, то может запуститься финализатор, который остановит и освободит таймер автоматически:

```
static void Main()
{
    var tmr = new System.Threading.Timer (TimerTick, null, 1000, 1000);
    GC.Collect ();
    System.Threading.Thread.Sleep (10000); // Ждать 10 секунд
}
static void TimerTick (object notUsed) { Console.WriteLine ("tick"); }
```

Если данный пример скомпилирован в режиме выпуска (отладка отключена, а оптимизация включена), тогда таймер будет обработан сборщиком мусора и финализирован еще до того, как у него появится шанс запуститься хотя бы один раз! И снова мы можем исправить положение, освободив таймер по завершении работы с ним:

```
using (var tmr = new System.Threading.Timer (TimerTick, null, 1000, 1000))
{
    GC.Collect ();
    System.Threading.Thread.Sleep (10000); // Ждать 10 секунд
}
```

Явный вызов метода `tmr.Dispose` в конце блока `using` гарантирует, что переменная `tmr` “используется” и потому не рассматривается сборщиком мусора как неактивная вплоть до конца блока. По иронии судьбы этот вызов метода `Dispose` на самом деле приводит к тому, что объект сохраняется активным дольше!

Диагностика утечек памяти

Простейший способ избежать утечек управляемой памяти предполагает проведение упреждающего мониторинга потребления памяти после того, как приложение написано. Получить данные по текущему использованию памяти объектами программы можно следующим образом (аргумент `true` сообщает сборщику мусора о необходимости выполнения сначала процесса сборки):

```
long memoryUsed = GC.GetTotalMemory (true);
```

Если вы практикуете разработку через тесты, то у вас есть возможность применять модульные тесты для утверждения, что память восстановлена должным образом. Если такое утверждение терпит неудачу, тогда придется проверить только изменения, которые были внесены недавно.

Находить утечки управляемой памяти в крупных приложениях помогает инструмент `windbg.exe`. Доступны также средства с дружественным графическим пользовательским интерфейсом наподобие Microsoft CLR Profiler, SciTech Memory Profiler и Red Gate ANTS Memory Profiler.

Среда CLR также открывает доступ к многочисленным счетчикам событий для помощи в мониторинге потребления ресурсов.

Слабые ссылки

Иногда удобно удерживать ссылку на объект, который является “невидимым” сборщику мусора, в том смысле, что объект сохраняется в активном состоянии. Это называется слабой ссылкой и реализовано классом `System.WeakReference`.

Для использования класса WeakReference необходимо сконструировать его экземпляр с целевым объектом:

```
var sb = new StringBuilder ("this is a test");
var weak = new WeakReference (sb);
Console.WriteLine (weak.Target);           // Выводит this is a test
```

Если на целевой объект имеется только одна или более слабых ссылок, то сборщик мусора считает его пригодным для сборки. После того, как целевой объект обработан сборщиком мусора, свойство Target экземпляра WeakReference получает значение null:

```
var weak = GetWeakRef();
GC.Collect();
Console.WriteLine (weak.Target);           // (пусто)
WeakReference GetWeakRef () =>
    new WeakReference (new StringBuilder ("weak"));
```

Во избежание обработки сборщиком мусора целевой объект понадобится присвоить локальной переменной в промежутке между его проверкой на предмет null и использованием:

```
var sb = (StringBuilder) weak.Target;
if (sb != null) { /* Делать что-нибудь с sb */ }
```

Поскольку целевой объект был присвоен локальной переменной, он получил надежный корневой объект и потому не может быть обработан сборщиком мусора, пока эта переменная используется.

В приведенном ниже классе слабые ссылки применяются для отслеживания всех создаваемых объектов Widget, не препятствуя их обработке сборщиком мусора:

```
class Widget
{
    static List<WeakReference> _allWidgets = new List<WeakReference>();
    public readonly string Name;
    public Widget (string name)
    {
        Name = name;
        _allWidgets.Add (new WeakReference (this));
    }
    public static void ListAllWidgets()
    {
        foreach (WeakReference weak in _allWidgets)
        {
            Widget w = (Widget)weak.Target;
            if (w != null) Console.WriteLine (w.Name);
        }
    }
}
```

Единственное замечание, которое следует сделать относительно такой системы — с течением времени статический список разрастается и накапливает слабые ссылки с целевыми объектами, установленными в null. Таким образом, понадобится внедрить определенную стратегию очистки.

Слабые ссылки и кеширование

Один из сценариев применения WeakReference связан с кешированием крупных графов объектов. Они позволяют интенсивно использующим память данным кешироваться без излишнего потребления памяти:

```
_weakCache = new WeakReference (...);           // _weakCache является полем  
...  
var cache = _weakCache.Target;  
if (cache == null) { /* Пересоздать кеш и присвоить его _weakCache */ }
```

На практике такая стратегия может оказаться не особенно эффективной, потому что вы располагаете лишь небольшим контролем над тем, когда запускается сборщик мусора и какое поколение он выберет для проведения сборки. В частности, если ваш кеш останется в поколении Gen0, то он может быть обработан сборщиком в пределах нескольких микросекунд (не забывайте, что сборщик мусора выполняет свою работу не только тогда, когда памяти становится мало — он производит регулярную сборку и при нормальных условиях потребления памяти). В итоге, как минимум, придется организовать двухуровневый кеш, где процесс начинается с хранения сильных ссылок, которые со временем преобразуются в слабые ссылки.

Слабые ссылки и события

Ранее уже было показано, каким образом события могут вызывать утечки управляемой памяти. Простейшее решение заключается в том, чтобы избегать подписки в таких условиях или реализовать метод Dispose для отмены подписки. Слабые ссылки предлагают еще одно решение.

Предположим, что есть делегат, который удерживает только слабые ссылки на свои целевые объекты. Такой делегат не будет сохранять свои целевые объекты в активном состоянии — если только не существуют независимые ссылки на них. Конечно, при этом нельзя предотвратить ситуацию, когда запущенный делегат сталкивается с висячей ссылкой на целевой объект — в период времени между моментом, когда целевой объект пригоден для сборки мусора, и моментом, когда сборщик мусора подхватит его. Чтобы такое решение было эффективным, код должен быть надежным в указанном сценарии. С учетом данного случая класс слабого делегата может быть реализован так, как показано ниже:

```
public class WeakDelegate<TDelegate> where TDelegate : Delegate  
{  
    class MethodTarget  
    {  
        public readonly WeakReference Reference;  
        public readonly MethodInfo Method;  
        public MethodTarget (Delegate d)  
        {  
            // d.Target будет null для целей в виде статических методов:  
            if (d.Target != null) Reference = new WeakReference (d.Target);  
            Method = d.Method;  
        }  
    }  
}
```

```

List<MethodTarget> _targets = new List<MethodTarget>();
public WeakDelegate()
{
    if (!typeof (TDelegate).IsSubclassOf (typeof (Delegate)))
        throw new InvalidOperationException
            ("TDelegate must be a delegate type");
    // TDelegate должен быть типом делегата
}
public void Combine (TDelegate target)
{
    if (target == null) return;
    foreach (Delegate d in (target as Delegate).GetInvocationList())
        _targets.Add (new MethodTarget (d));
}
public void Remove (TDelegate target)
{
    if (target == null) return;
    foreach (Delegate d in (target as Delegate).GetInvocationList())
    {
        MethodTarget mt = _targets.Find (w =>
            Equals (d.Target, w.Reference?.Target) &&
            Equals (d.Method.MethodHandle, w.Method.MethodHandle));
        if (mt != null) _targets.Remove (mt);
    }
}
public TDelegate Target
{
    get
    {
        Delegate combinedTarget = null;
        foreach (MethodTarget mt in _targets.ToArray())
        {
            WeakReference wr = mt.Reference;
            // Статический целевой объект или активный целевой объект экземпляра
            if (wr == null || wr.Target != null)
            {
                var newDelegate = Delegate.CreateDelegate (
                    typeof(TDelegate), wr?.Target, mt.Method);
                combinedTarget = Delegate.Combine (combinedTarget, newDelegate);
            }
            else
                _targets.Remove (mt);
        }
        return combinedTarget as TDelegate;
    }
    set
    {
        _targets.Clear();
        Combine (value);
    }
}

```

В методах `Combine` и `Remove` мы осуществляем ссылочное преобразование `target` в `Delegate` с помощью операции `as`, а не более привычной операции приведения. Причина в том, что C# запрещает использовать операцию приведения с таким параметром типа, поскольку существует потенциальная неоднозначность между специальным преобразованием и ссылочным преобразованием.

Затем мы вызываем метод `GetInvocationList`, т.к. эти методы могут быть вызваны групповыми делегатами, т.е. делегатами с более чем одним методом для вызова.

В свойстве `Target` мы строим групповой делегат, комбинирующий все делегаты, на которые имеются слабые ссылки с активными целевыми объектами, удаляя оставшиеся (висячие) ссылки из списка `_targets` во избежание его разрастания до бесконечности. (Мы могли бы усовершенствовать наш класс, делая то же самое в методе `Combine`; еще одним улучшением было бы добавление блокировок для обеспечения безопасности в отношении потоков (см. раздел “Блокировка и безопасность потоков” в главе 14).) Мы также разрешаем иметь делегаты вообще без слабой ссылки; они представляют делегаты, целевой метод которых является статическим.

В следующем коде показано, как использовать готовый делегат при реализации события.

```
public class Foo
{
    WeakDelegate<EventHandler> _click = new WeakDelegate<EventHandler>();
    public event EventHandler Click
    {
        add { _click.Combine (value); } remove { _click.Remove (value); }
    }
    protected virtual void OnClick (EventArgs e)
        => _click.Target?.Invoke (this, e);
}
```



Диагностика

Когда что-то пошло не так, важно иметь доступ к информации, которая поможет в диагностировании проблемы. Существенную помощь в этом оказывает IDE-среда или отладчик, но он обычно доступен только на этапе разработки. После поставки приложение обязано самостоятельно собирать и фиксировать диагностическую информацию. Для удовлетворения данного требования .NET предлагает набор средств, которые позволяют регистрировать диагностическую информацию, следить за поведением приложений, обнаруживать ошибки времени выполнения и интегрироваться с инструментами отладки в случае их доступности.

Некоторые диагностические инструменты и API-интерфейсы специфичны для Windows, поскольку они полагаются на функциональные средства операционной системы Windows. Чтобы не допустить загромождения библиотеки .NET BCL специфичными для платформ API-интерфейсами, в Microsoft решили поставлять их в виде отдельных пакетов NuGet, на которые можно дополнительно ссылаться. Существует более десятка специфичных для Windows пакетов; сослаться сразу на все пакеты можно с помощью “главного” пакета Microsoft.Windows.Compatibility.

Типы, рассматриваемые в настоящей главе, определены преимущественно в пространстве имен System.Diagnostics.

Условная компиляция

С помощью директив препроцессора любой раздел кода C# можно компилировать условно. Директивы препроцессора представляют собой специальные инструкции для компилятора, которые начинаются с символа # (и в отличие от других конструкций C# должны полностью располагаться в одной строке). Логически они выполняются перед основной компиляцией (хотя на практике компилятор обрабатывает их во время фазы лексического анализа). Директивами препроцессора для условной компиляции являются #if, #else, #endif и #elif.

Директива #if указывает компилятору на необходимость игнорирования раздела кода, если не определен специальный символ. Определить символ можно в исходном коде с использованием директивы #define (в таком случае символ применяется только к этому файлу) или в файле .csproj, используя элемент <DefineConstants> (в данном случае символ применяется к целой сборке):

```

#define TESTMODE //Директивы #define должны находиться в начале файла.
    // По соглашению имена символов записываются в верхнем регистре.
using System;
class Program
{
    static void Main()
    {
#define TESTMODE
        Console.WriteLine ("in test mode!");      // ВЫВОД: in test mode!
#endif
    }
}

```

Если удалить первую строку, то программа скомпилируется без оператора `Console.WriteLine` в исполняемом файле, как если бы он был закомментирован.

Директива `#else` аналогична оператору `else` языка C#, а директива `#elif` эквивалентна директиве `#else`, за которой следует `#if`. Операции `||`, `&&` и `!` могут использоваться для выполнения операций ИЛИ, И и НЕ:

```

#if TESTMODE && !PLAYMODE          // если TESTMODE и не PLAYMODE
...

```

Однако помните, что вы не строите обычное выражение C#, а символы, над которыми вы оперируете, не имеют никакого отношения к переменным — статическим или любым другим.

Вы можете определять символы, которые применяются к каждому файлу в сборке, редактируя файл `.csproj` (или в Visual Studio на вкладке Build (Сборка) диалогового окна Project Properties (Свойства проекта)). Ниже определены две константы, `TESTMODE` и `PLAYMODE`:

```

<PropertyGroup>
    <DefineConstants>TESTMODE;PLAYMODE</DefineConstants>
</PropertyGroup>

```

Если вы определили символ на уровне сборки и затем хотите отменить его определение для какого-то файла, тогда применяйте директиву `#undef`.

Сравнение условной компиляции и статических переменных-флагов

Предыдущий пример взамен можно было бы реализовать с использованием простого статического поля:

```

static internal bool TestMode = true;

static void Main()
{
    if (TestMode) Console.WriteLine ("in test mode!");
}

```

Преимущество такого подхода связано с возможностью конфигурирования во время выполнения. Итак, почему выбирают условную компиляцию? Причина в том, что условная компиляция способна решать задачи, которые нельзя решить посредством переменных-флагов, такие как:

- условное включение атрибута;
- изменение типа, объявляемого для переменной;
- переключение между разными пространствами имен или псевдонимами типов в директиве `using`; например:

```
using TestType =
#if V2
    MyCompany.Widgets.GadgetV2;
#else
    MyCompany.Widgets.Gadget;
#endif
```

Под директивой условной компиляции можно даже реализовать крупную перестройку кода, так что появится возможность немедленного переключения между старой версией и новой. Вдобавок можно создавать библиотеки, которые компилируются для нескольких версий исполняющей среды, используя в своих интересах самые новые функциональные средства, когда они доступны.

Еще одно преимущество условной компиляции связано с тем, что отладочный код может ссылаться на типы в сборках, которые не включаются при развертывании.

Атрибут `Conditional`

Атрибут `Conditional` указывает компилятору на необходимость игнорирования любых обращений к определенному классу или методу, если заданный символ не был определен.

Чтобы выяснить, насколько это полезно, представим, что мы реализуем метод для регистрации информации о состоянии следующим образом:

```
static void LogStatus (string msg)
{
    string logFilePath = ...
    System.IO.File.AppendAllText (logFilePath, msg + "\r\n");
}
```

Теперь предположим, что его нужно выполнять, только если определен символ `LOGGINGMODE`. Первое решение предусматривает помещение всех вызовов метода `LogStatus` внутрь директивы `#if`:

```
#if LOGGINGMODE
LogStatus ("Message Headers: " + GetMsgHeaders ());
#endif
```

Результат получается идеальным, но постоянно писать такой код утомительно. Второе решение заключается в помещении директивы `#if` внутрь самого метода `LogStatus`. Однако это проблематично, поскольку `LogStatus` должен вызываться так:

```
LogStatus ("Message Headers: " + GetComplexMessageHeaders ());
```

Метод `GetComplexMessageHeaders` будет вызываться всегда, что приведет к снижению производительности.

Мы можем скомбинировать функциональность первого решения с удобством второго, присоединив к методу LogStatus атрибут Conditional (который определен в пространстве имен System.Diagnostics):

```
[Conditional ("LOGGINGMODE")]
static void LogStatus (string msg)
{
    ...
}
```

В результате компилятор трактует вызовы LogStatus, как если бы они были помещены внутрь директивы #if LOGGINGMODE. Когда символ не определен, любые обращения к методу LogStatus полностью исключаются из процесса компиляции, в том числе и выражения оценки его аргумента. (Следовательно, будут пропускаться любые выражения, дающие побочные эффекты.) Такой прием работает, даже если метод LogStatus и вызывающий класс находятся в разных сборках.



Еще одно преимущество конструкции [Conditional] в том, что условная проверка выполняется, когда компилируется *вызывающий класс*, а не *вызываемый метод*. Это удобно, т.к. позволяет написать библиотеку, которая содержит методы вроде LogStatus, и построить только одну версию данной библиотеки.

Во время выполнения атрибут Conditional игнорируется — он представляет собой исключительно инструкцию для компилятора.

Альтернативы атрибуту Conditional

Атрибут Conditional бесполезен, когда во время выполнения необходима возможность динамического включения или отключения функциональности: вместо него должен применяться подход на основе переменных. Остается открытый вопрос о том, как элегантно обойти оценку аргументов при вызове условных методов регистрации. Проблема решается с помощью функционального подхода:

```
using System;
using System.Linq;
class Program
{
    public static bool EnableLogging;
    static void LogStatus (Func<string> message)
    {
        string filePath = ...
        if (EnableLogging)
            System.IO.File.AppendAllText (filePath, message () + "\r\n");
    }
}
```

Лямбда-выражение позволяет вызывать данный метод без разбухания синтаксиса:

```
LogStatus ( () => "Message Headers: " + GetComplexMessageHeaders () );
```

Если значение `EnableLogging` равно `false`, тогда вызов метода `GetComplexMessageHeaders` никогда не выполняется.

Классы Debug и Trace

`Debug` и `Trace` — статические классы, которые предлагают базовые возможности регистрации и утверждений. Указанные два класса очень похожи; основное отличие связано с тем, для чего они предназначены. Класс `Debug` предназначен для отладочных сборок, а класс `Trace` — для отладочных и окончательных сборок. Чтобы достичь таких целей:

- все методы класса `Debug` определены с атрибутом `[Conditional ("DEBUG")]`;
- все методы класса `Trace` определены с атрибутом `[Conditional ("TRACE")]`.

Это означает, что если не определен символ `DEBUG` или `TRACE`, то компилятор исключает все обращения к `Debug` или `Trace`. (Среда Visual Studio на вкладке `Build` диалогового окна `Project Properties` предлагает флагги для определения этих символов и в новых проектах по умолчанию включает символ `TRACE`.)

Классы `Debug` и `Trace` предоставляют методы `Write`, `WriteLine` и `WriteIf`. По умолчанию они отправляют сообщения в окно вывода отладчика:

```
Debug.Write      ("Data");
Debug.WriteLine (23 * 34);
int x = 5, y = 3;
Debug.WriteLine (x > y, "x is greater than y");
```

Класс `Trace` также предлагает методы `TraceInformation`, `TraceWarning` и `TraceError`. Отличия в поведении между ними и методами `Write` зависят от активных прослушивателей `TraceListener` (мы рассмотрим их в разделе “`TraceListener`” далее в главе).

Fail и Assert

Классы `Debug` и `Trace` предоставляют методы `Fail` и `Assert`. Метод `Fail` отправляет сообщение всем экземплярам `TraceListener` из коллекции `Listeners` внутри класса `Debug` или `Trace` (как будет показано в следующем разделе), которые по умолчанию записывают переданное сообщение в вывод отладки, а также отображают его в диалоговом окне:

```
Debug.Fail ("File data.txt does not exist!"); // Файл data.txt не существует!
```

Метод `Assert` просто вызывает метод `Fail`, если аргумент типа `bool` равен `false`; это называется созданием утверждения и указывает на ошибку в коде, если оно нарушено. Можно также задать необязательное сообщение об ошибке:

```
Debug.Assert (File.Exists ("data.txt"), "File data.txt does not exist!");
var result = ...
Debug.Assert (result != null);
```

Методы Write, Fail и Assert также перегружены, чтобы в добавок к сообщению принимать строковую категорию, которая может быть полезна при обработке вывода.

Альтернативой утверждению будет генерация исключения, если противоположное условие равно true. Это общепринятый подход при проверке достоверности аргументов метода:

```
public void ShowMessage (string message)
{
    if (message == null) throw new ArgumentNullException ("message");
    ...
}
```

Такие “утверждения” компилируются безусловным образом и обладают меньшей гибкостью в том, что не позволяют управлять результатом отказавшего утверждения через экземпляры TraceListener. К тому же формально они не являются утверждениями. Утверждение представляет собой то, что в случае нарушения говорит об ошибке в коде текущего метода. Генерация исключения на основе проверки достоверности аргумента указывает на ошибку в коде вызывающего компонента.

TraceListener

Класс Trace имеет статическое свойство Listeners, которое возвращает коллекцию экземпляров TraceListener. Они отвечают за обработку содержимого, выпускаемого методами Write, Fail и Trace.

По умолчанию коллекция Listeners включает единственный прослушиватель (DefaultTraceListener). Стандартный прослушиватель обладает двумя основными возможностями.

- В случае подключения к отладчику наподобие встроенного в Visual Studio сообщения записываются в окно вывода отладки; иначе содержимое сообщения игнорируется.
- Когда вызывается метод Fail (или утверждение не выполняется), приложение прекращает работу.

Вы можете изменить такое поведение, (необязательно) удалив стандартный прослушиватель и затем добавив один или большее число собственных прослушивателей. Прослушиватели трассировки можно написать с нуля (создавая подкласс класса TraceListener) или воспользоваться одним из предопределенных типов:

- TextWriterTraceListener записывает в Stream или StreamWriter либо добавляет в файл;
- EventLogTraceListener записывает в журнал событий Windows (только Windows);
- EventProviderTraceListener записывает в подсистему трассировки событий для Windows (Event Tracing for Windows — ETW; межплатформенная поддержка).

Класс `TextWriterTraceListener` имеет подклассы `ConsoleTraceListener`, `DelimitedListTraceListener`, `XmlWriterTraceListener` и `EventSchemaTraceListener`.

В следующем примере очищается стандартный прослушиватель `Trace`, после чего добавляются три прослушивателя — первый дописывает в файл, второй выводит на консоль и третий записывает в журнал событий Windows:

```
// Очистить стандартный прослушиватель:  
Trace.Listeners.Clear();  
  
// Добавить средство записи, дописывающее в файл trace.txt:  
Trace.Listeners.Add (new TextWriterTraceListener ("trace.txt"));  
  
// Получить выходной поток Console и добавить его в качестве прослушивателя:  
System.IO.TextWriter tw = Console.Out;  
Trace.Listeners.Add (new TextWriterTraceListener (tw));  
  
// Настроить исходный файл журнала событий и создать/добавить прослушиватель.  
// Метод CreateEventSource требует повышения полномочий до уровня администратора,  
// так что это обычно будет делаться при установке приложения.  
if (!EventLog.SourceExists ("DemoApp"))  
    EventLog.CreateEventSource ("DemoApp", "Application");  
  
Trace.Listeners.Add (new EventLogTraceListener ("DemoApp"));
```

В случае журнала событий Windows сообщения, записываемые с помощью метода `Write`, `Fail` или `Assert`, всегда отображаются в программе “Просмотр событий” как сообщения уровня сведений. Однако сообщения, которые записываются посредством методов `TraceWarning` и `TraceError`, отображаются как предупреждения или ошибки.

Класс `TraceListener` также имеет свойство `Filter` типа `TraceFilter`, которое можно устанавливать для управления тем, будет ли сообщение записано данным прослушивателем. Чтобы сделать это, нужно либо создать экземпляр одного из предопределенных подклассов (`EventTypeFilter` или `SourceFilter`), либо создать подкласс класса `TraceFilter` и переопределить метод `ShouldTrace`. Подобный прием можно использовать, скажем, для фильтрации по категории.

В классе `TraceListener` также определены свойства `IndentLevel` и `IndentSize` для управления отступами и свойство `TraceOutputOptions` для записи дополнительных данных:

```
TextWriterTraceListener tl = new TextWriterTraceListener (Console.Out);  
tl.TraceOutputOptions = TraceOptions.DateTime | TraceOptions.Callstack;
```

Свойство `TraceOutputOptions` применяется при использовании методов `Trace`:

```
Trace.TraceWarning ("Orange alert");
```

Вот вывод:

```
DiagTest.vhost.exe Warning: 0 : Orange alert  
DateTime=2018-03-08T05:57:13.625000Z  
Callstack= at System.Environment.GetStackTrace(Exception e,  
Boolean needFileInfo)  
at System.Environment.get_StackTrace() at ...
```

Сброс и закрытие прослушивателей

Некоторые прослушиватели, такие как `TextWriterTraceListener`, в итоге производят запись в поток, подлежащий кешированию. Результатом будут два последствия.

- Сообщение может не появиться в выходном потоке или файле немедленно.
- Перед завершением приложения прослушиватель потребуется закрыть (или, по крайней мере, сбросить); в противном случае потеряется все то, что находится в кеше (по умолчанию до 4 Кбайт данных, если осуществляется запись в файл).

Классы `Trace` и `Debug` предлагают статические методы `Close` и `Flush`, которые вызывают `Close` или `Flush` на всех прослушивателях (а эти методы в свою очередь вызывают `Close` или `Flush` на любых лежащих в основе средствах записи и потоках). Метод `Close` неявно вызывает `Flush`, закрывает файловые дескрипторы и предотвращает дальнейшую запись данных.

В качестве общего правила: метод `Close` должен вызываться перед завершением приложения, а метод `Flush` — каждый раз, когда нужно удостовериться, что текущие данные сообщений записаны. Такое правило применяется при использовании прослушивателей, основанных на потоках или файлах.

Классы `Trace` и `Debug` также предоставляют свойство `AutoFlush`, которое в случае равенства `true` приводит к вызову метода `Flush` после каждого сообщения.



Если применяются прослушиватели, основанные на потоках или файлах, то эффективной политикой будет установка в `true` свойства `AutoFlush` для экземпляров `Debug` и `Trace`. Иначе при возникновении исключения или критической ошибки последние 4 Кбайт диагностической информации могут быть потеряны.

Интеграция с отладчиком

Иногда для приложения удобно взаимодействовать с каким-нибудь отладчиком, если он доступен. На этапе разработки отладчик обычно предоставляется IDE-средой (например, `Visual Studio`), а после развертывания отладчиком, вероятно, будет один из низкоуровневых инструментов отладки, такой как `WinDbg`, `Cordbg` или `MDbg`.

Присоединение и останов

Статический класс `Debugger` из пространства имен `System.Diagnostics` предлагает базовые функции для взаимодействия с отладчиком, а именно — `Break`, `Launch`, `Log` и `IsAttached`.

Для отладки к приложению сначала потребуется присоединить отладчик. В случае запуска приложения из IDE-среды отладчик присоединяется автоматически, если только не запрошено противоположное (выбором пункта меню `Start without debugging` (Запустить без отладки)). Однако иногда запускать приложение

в режиме отладки внутри IDE-среды неудобно или невозможно. Примером может быть приложение Windows-службы или (по иронии судьбы) визуальный редактор Visual Studio. Одно из решений предполагает запуск приложения обычным образом с последующим выбором пункта меню Debug Process (Отладить процесс) в IDE-среде. Тем не менее, при таком подходе нет возможности поместить точку останова в самое начало процесса выполнения программы.

Обходной путь предусматривает вызов метода Debugger.Break внутри приложения. Данный метод запускает отладчик, присоединяется к нему и приостанавливает выполнение в точке вызова. (Метод Launch делает то же самое, но не приостанавливает выполнение.) После присоединения с помощью метода Log сообщения можно отправлять прямо в окно вывода отладчика. Состояние присоединения к отладчику выясняется через свойство IsAttached.

Атрибуты отладчика

Атрибуты DebuggerStepThrough и DebuggerHidden предоставляют указания отладчику о том, как обрабатывать пошаговое выполнение для конкретного метода, конструктора или класса.

Атрибут DebuggerStepThrough требует, чтобы отладчик прошел через функцию без взаимодействия с пользователем. Данный атрибут полезен для автоматически сгенерированных методов и прокси-методов, которые перекладывают выполнение реальной работы на какие-то другие методы. В последнем случае отладчик будет отображать прокси-метод в стеке вызовов, даже когда точка останова находится внутри “реального” метода — если только не добавить также атрибут DebuggerHidden. Упомянутые атрибуты можно комбинировать на прокси-методах, чтобы помочь пользователю сосредоточить внимание на отладке прикладной логики, а не связующего вспомогательного кода:

```
[DebuggerStepThrough, DebuggerHidden]
void DoWorkProxy()
{
    // Настройка...
    DoWork();
    // Освобождение...
}
void DoWork() {...} // Реальный метод...
```

Процессы и потоки процессов

В последнем разделе главы 6 приводились объяснения, как запустить новый процесс с помощью метода Process.Start. Класс Process также позволяет запрашивать и взаимодействовать с другими процессами, выполняющимися на том же самом или другом компьютере. Класс Process является частью .NET Standard 2.0, хотя для платформы UWP его возможности ограничены.

Исследование выполняющихся процессов

Методы Process.GetProcessXXX извлекают специфический процесс по имени либо идентификатору или все процессы, выполняющиеся на текущей

либо указанной машине. Сюда входят как управляемые, так и неуправляемые процессы. Каждый экземпляр `Process` имеет множество свойств, отражающих статистические сведения, такие как имя, идентификатор, приоритет, потребление памяти и процессора, оконные дескрипторы и т.д. В следующем примере производится перечисление всех процессов, функционирующих на текущем компьютере:

```
foreach (Process p in Process.GetProcesses())
using (p)
{
    Console.WriteLine (p.ProcessName);
    Console.WriteLine ("    PID:      " + p.Id);          // Идентификатор процесса
    Console.WriteLine ("    Memory:   " + p.WorkingSet64); // Память
    Console.WriteLine ("    Threads:  " + p.Threads.Count); // Количество потоков
}
```

Метод `Process.GetCurrentProcess` возвращает текущий процесс. Завершить процесс можно вызовом его метода `Kill`.

Исследование потоков в процессе

С помощью свойства `Process.Threads` можно также реализовать перечисление потоков других процессов. Однако вместо объектов `System.Threading.Thread` будут получены объекты `ProcessThread`, которые предназначены для решения административных задач, а не задач, касающихся синхронизации. Объект `ProcessThread` предоставляет диагностическую информацию о лежащем в основе потоке и позволяет управлять некоторыми связанными с ним аспектами, такими как приоритет и родство:

```
public void EnumerateThreads (Process p)
{
    foreach (ProcessThread pt in p.Threads)
    {
        Console.WriteLine (pt.Id);
        Console.WriteLine ("    State:     " + pt.ThreadState);      // Состояние
        Console.WriteLine ("    Priority:  " + pt.PriorityLevel);    // Приоритет
        Console.WriteLine ("    Started:   " + pt.StartTime);        // Запущен
        Console.WriteLine ("    CPU time: " + pt.TotalProcessorTime); // Время ЦП
    }
}
```

StackTrace и StackFrame

Классы `StackTrace` и `StackFrame` выдают допускающее только чтение представление стека вызовов. Трассировки стека можно получать для текущего потока или для объекта `Exception`. Такая информация полезна в основном для диагностических целей, хотя ее также можно использовать и в программировании (как ловкий прием). Экземпляр `StackTrace` представляет полный стек вызовов, а `StackFrame` — одиночный вызов метода внутри стека.



Если вам просто нужно узнать имя и номер строки вызывающего метода, то более легкой и быстрой альтернативой будут атрибуты информации о вызывающем компоненте. Эта тема раскрывалась в разделе “Атрибуты информации о вызывающем компоненте” главы 4.

Если экземпляр `StackTrace` создается без аргументов (или с аргументом типа `bool`), тогда будет получен снимок стека вызовов текущего потока. Когда аргумент типа `bool` равен `true`, он инструктирует `StackTrace` о необходимости чтения файлов .pdb (project debug — отладка проекта) сборки, если они существуют, предоставляя доступ к данным об именах файлов, номерах строк и позициях в строках. Файлы отладки проекта генерируются в случае компиляции с ключом `/debug`. (Среда Visual Studio компилирует с этим ключом, если не затребовано построение окончательной сборки через дополнительные параметры построения (в диалоговом окне Advanced Build Settings (Дополнительные настройки отладки)).) После получения экземпляра `StackTrace` можно исследовать любой отдельный фрейм с помощью вызова метода `GetFrame` или же все фреймы посредством вызова `GetFrames`:

```
static void Main() { A(); }
static void A()    { B(); }
static void B()    { C(); }
static void C()
{
    StackTrace s = new StackTrace (true);
    Console.WriteLine ("Total frames: " + s.FrameCount);
        // Всего фреймов
    Console.WriteLine ("Current method: " + s.GetFrame(0).GetMethod().Name);
        // Текущий метод
    Console.WriteLine ("Calling method: " + s.GetFrame(1).GetMethod().Name);
        // Вызывающий метод
    Console.WriteLine ("Entry method: " + s.GetFrame
        (s.FrameCount-1).GetMethod().Name); // Входной метод
    Console.WriteLine ("Call Stack:");
        // Стек вызовов
    foreach (StackFrame f in s.GetFrames())
        Console.WriteLine (
            " File: " + f.GetFileName() + /* Файл */
            " Line: " + f.GetFileLineNumber() + /* Страна */
            " Col: " + f.GetFileColumnNumber() + /* Колонка */
            " Offset: " + f.GetILOffset() + /* Смещение */
            " Method: " + f.GetMethod().Name); /* Метод */
}
```

Ниже показан вывод:

```
Total frames: 4
Current method: C
Calling method: B
Entry method: Main
Call stack:
File: C:\Test\Program.cs  Line: 15  Col: 4  Offset: 7  Method: C
File: C:\Test\Program.cs  Line: 12  Col: 22  Offset: 6  Method: B
File: C:\Test\Program.cs  Line: 11  Col: 22  Offset: 6  Method: A
File: C:\Test\Program.cs  Line: 10  Col: 25  Offset: 6  Method: Main
```



Смещение IL указывает смещение инструкции, которая будет выполнена следующей, а не той, что выполняется в текущий момент. Тем не менее, номера строк и колонок (при наличии файла .pdb) обычно отражают действительную точку выполнения.

Так происходит оттого, что среда CLR делает все возможное для выведения фактической точки выполнения при вычислении строки и колонки из смещения IL. Компилятор генерирует код IL так, чтобы сделать это реальным, при необходимости вставляя в поток IL инструкции пор (no-operation — нет операции).

Однако компиляция с включенной оптимизацией запрещает вставку инструкций пор, а потому трассировка стека может отражать номера строки и колонки, где расположен оператор, который будет выполняться следующим. Получение удобной трассировки стека еще более затрудняется тем фактом, что оптимизация может быть связана и с применением других трюков, таких как устранение целых методов.

Сокращенный способ получения важной информации для полного экземпляра StackTrace предусматривает вызов на нем метода `ToString`. Вот как могут выглядеть результаты:

```
at DebugTest.Program.C() in C:\Test\Program.cs:line 16
at DebugTest.Program.B() in C:\Test\Program.cs:line 12
at DebugTest.Program.A() in C:\Test\Program.cs:line 11
at DebugTest.Program.Main() in C:\Test\Program.cs:line 10
```

Трассировку стека можно также получить для объекта `Exception`, передав его конструктору `StackTrace` (она покажет, что именно привело к генерации исключения).



Класс `Exception` уже имеет свойство `StackTrace`; тем не менее, оно возвращает простую строку, а не объект `StackTrace`. Объект `StackTrace` намного более полезен при регистрации исключений, возникающих после развертывания (когда файлы .pdb уже не доступны), поскольку вместо номеров строк и колонок в журнале можно регистрировать смещение IL. С помощью смещения IL и утилиты `ildasm` несложно выяснить, внутри какого метода возникла ошибка.

Журналы событий Windows

Платформа Win32 предоставляет централизованный механизм регистрации в форме журналов событий Windows.

Применяемые ранее классы `Debug` и `Trace` осуществляли запись в журнал событий Windows, если был зарегистрирован прослушиватель `EventLogTraceListener`. Тем не менее, посредством класса `EventLog` можно записывать напрямую в журнал событий Windows, не используя классы `Trace` или `Debug`. Класс `EventLog` можно также применять для чтения и мониторинга данных, связанных с событиями.



Выполнять запись в журнал событий Windows имеет смысл в приложении Windows-службы, поскольку если что-то идет не так, то нет никакой возможности отобразить пользовательский интерфейс, который направил бы пользователя на специфический файл, куда была занесена диагностическая информация. Кроме того, запись в журнал событий Windows является общепринятой практикой для служб, так что данный журнал будет первым местом, где администратор начнет выяснять причины отказа той или иной службы.

Существуют три стандартных журнала событий Windows со следующими именами:

- Application (приложение)
- System (система)
- Security (безопасность)

Большинство приложений обычно производят запись в журнал Application.

Запись в журнал событий

Ниже перечислены шаги, которые понадобится выполнить для записи в журнал событий Windows.

1. Выберите один из трех журналов событий (обычно Application).
2. Примите решение относительно имени источника и при необходимости создайте его (создание требует наличия прав администратора).
3. Вызовите метод EventLog.WriteEntry с именем журнала, именем источника и данными сообщения.

Имя источника — это просто идентифицируемое имя вашего приложения. Имя источника перед использованием должно быть зарегистрировано; такую функцию выполняет метод CreateEventSource. Затем можно вызывать метод WriteEntry:

```
const string SourceName = "MyCompany.WidgetServer";  
// Метод CreateEventSource требует наличия прав администратора,  
// поэтому данный код обычно выполняется при установке приложения  
if (!EventLog.SourceExists (SourceName))  
    EventLog.CreateEventSource (SourceName, "Application");  
  
EventLog.WriteEntry (SourceName,  
    "Service started; using configuration file=...",  
    EventLogEntryType.Information);
```

Перечисление EventLogEntryType содержит следующие значения: Information, Warning, Error, SuccessAudit и FailureAudit. Каждое значение обеспечивает отображение отличающегося значка в программе просмотра событий Windows. Можно также указать необязательные категорию и идентификатор события (произвольные числа по вашему выбору) и предоставить дополнительные двоичные данные.

Метод CreateEventSource также позволяет задавать имя машины, что приведет к записи в журнал событий на другом компьютере при наличии достаточных полномочий.

Чтение журнала событий

Для чтения журнала событий необходимо создать экземпляр класса EventLog с именем нужного журнала и дополнительно именем компьютера, если журнал находится на другом компьютере. Впоследствии любая запись журнала может быть прочитана с помощью свойства Entries типа коллекции:

```
EventLog log = new EventLog ("Application");

Console.WriteLine ("Total entries: " + log.Entries.Count); // Всего записей

EventLogEntry last = log.Entries [log.Entries.Count - 1];
Console.WriteLine ("Index: " + last.Index); // Индекс
Console.WriteLine ("Source: " + last.Source); // Источник
Console.WriteLine ("Type: " + last.EntryType); // Тип
Console.WriteLine ("Time: " + last.TimeWritten); // Время
Console.WriteLine ("Message: " + last.Message); // Сообщение
```

С помощью статического метода EventLog.GetEventLogs можно перечислить все журналы на текущем (или другом) компьютере (для полного доступа требуются права администратора):

```
foreach (EventLog log in EventLog.GetEventLogs())
    Console.WriteLine (log.LogDisplayName);
```

Обычно данный код выводит минимум Application, Security и System.

Мониторинг журнала событий

Организовать оповещение о появлении любой записи в журнале событий Windows можно посредством события EntryWritten. Прием работает для журналов событий на локальном компьютере независимо от того, какое приложение записало событие.

Чтобы включить мониторинг журнала событий, необходимо выполнить следующие действия.

1. Создайте экземпляр EventLog и установите его свойство EnableRaisingEvents в true.
2. Обработайте событие EntryWritten.

Вот пример:

```
using (var log = new EventLog ("Application"))
{
    log.EnableRaisingEvents = true;
    log.EntryWritten += DisplayEntry;
    Console.ReadLine();
}
void DisplayEntry (object sender, EntryWrittenEventArgs e)
{
    EventLogEntry entry = e.Entry;
    Console.WriteLine (entry.Message);
}
```

Счетчики производительности



Счетчики производительности являются средством, предназначенным только для Windows, и требуют загрузки NuGet-пакета System.Diagnostics.PerformanceCounter. Если в качестве целевой платформы выбрана система Linux или macOS, тогда ознакомьтесь с альтернативами в разделе “Межплатформенные инструменты диагностики” далее в главе.

Обсуждаемые ранее механизмы регистрации удобны для накопления информации, которая будет анализироваться в будущем. Однако чтобы получить представление о текущем состоянии приложения (или системы в целом), необходим какой-то подход реального времени. Решением такой потребности в Win32 является инфраструктура для мониторинга производительности, которая состоит из набора счетчиков производительности, открываемых системой и приложениями, и оснасток консоли управления Microsoft (Microsoft Management Console — MMC), используемых для отслеживания этих счетчиков в реальном времени.

Счетчики производительности сгруппированы в категории, такие как “Система”, “Процессор”, “Память .NET CLR” и т.д. В инструментах с графическим пользовательским интерфейсом такие категории иногда называются “объектами производительности”. Каждая категория группирует связанный набор счетчиков производительности, отслеживающих один аспект системы или приложения. Примерами счетчиков производительности в категории “Память .NET CLR” могут быть “% времени сборки мусора”, “# байтов во всех кучах” и “Выделено байтов/с”.

Каждая категория может дополнительно иметь один или более экземпляров, допускающих независимый мониторинг. Это полезно, например, для счетчика производительности “% процессорного времени” из категории “Процессор”, который позволяет отслеживать использование центрального процессора. На многопроцессорной машине данный счетчик поддерживает экземпляры для всех процессоров, позволяя независимо проводить мониторинг загрузки каждого процессора.

В последующих разделах будет показано, как решать часто встречающиеся задачи, такие как определение открытых счетчиков, отслеживание счетчиков и создание собственных счетчиков для отображения информации о состоянии приложения.



В зависимости от того, к чему производится доступ, чтение счетчиков производительности или категорий может требовать наличия прав администратора на локальном или целевом компьютере.

Перечисление доступных счетчиков производительности

В следующем примере осуществляется перечисление всех доступных счетчиков производительности на компьютере. В случае если счетчик имеет экземпляры, тогда перечисляются счетчики для каждого экземпляра:

```

PerformanceCounterCategory[] cats =
    PerformanceCounterCategory.GetCategories();

foreach (PerformanceCounterCategory cat in cats)
{
    Console.WriteLine ("Category: " + cat.CategoryName);           // Категория
    string[] instances = cat.GetInstanceNames();
    if (instances.Length == 0)
    {
        foreach (PerformanceCounter ctr in cat.GetCounters())
            Console.WriteLine (" Counter: " + ctr.CounterName);      // Счетчик
    }
    else // Вывести счетчики, имеющие экземпляры
    {
        foreach (string instance in instances)
        {
            Console.WriteLine (" Instance: " + instance);           // Экземпляр
            if (cat.InstanceExists (instance))
                foreach (PerformanceCounter ctr in cat.GetCounters (instance))
                    Console.WriteLine (" Counter: " + ctr.CounterName); // Счетчик
        }
    }
}
}

```



Результат содержит свыше 10 000 строк! К тому же его получение занимает некоторое время, поскольку реализация метода `PerformanceCounterCategory.InstanceExists` неэффективна. В реальной системе настолько детальная информация извлекается только по требованию.

В приведенном далее примере с помощью LINQ извлекаются лишь счетчики производительности, связанные с .NET, а результат помещается в XML-файл:

```

var x =
    new XElement ("counters",
        from PerformanceCounterCategory cat in
            PerformanceCounterCategory.GetCategories()
        where cat.CategoryName.StartsWith ("\".NET\"")
        let instances = cat.GetInstanceNames()
        select new XElement ("category",
            new XAttribute ("name", cat.CategoryName),
            instances.Length == 0
            ?
            from c in cat.GetCounters()
            select new XElement ("counter",
                new XAttribute ("name", c.CounterName)))
        :
        from i in instances
        select new XElement ("instance", new XAttribute ("name", i),
            !cat.InstanceExists (i)
            ?
            null
            :

```

```

        from c in cat.GetCounters (i)
        select new XElement ("counter",
            new XAttribute ("name", c.CounterName))
    )
);
x.Save ("counters.xml");

```

Чтение данных счетчика производительности

Чтобы извлечь значение счетчика производительности, необходимо создать объект `PerformanceCounter` и затем вызвать его метод `NextValue` или `NextSample`. Метод `NextValue` возвращает простое значение типа `float`, а метод `NextSample` — объект `CounterSample`, который открывает доступ к более широкому набору свойств наподобие `CounterFrequency`, `TimeStamp`, `BaseValue` и `RawValue`.

Конструктор `PerformanceCounter` принимает имя категории, имя счетчика и необязательный экземпляр. Таким образом, чтобы отобразить сведения о текущем использовании всех процессоров, потребуется написать следующий код:

```

using PerformanceCounter pc = new PerformanceCounter ("Processor",
                                                       "% Processor Time",
                                                       "_Total");

Console.WriteLine (pc.NextValue());

```

А вот как отобразить данные о потреблении “реальной” (т.е. открытой) памяти текущим процессом:

```

string procName = Process.GetCurrentProcess ().ProcessName;
using PerformanceCounter pc = new PerformanceCounter ("Process",
                                                       "Private Bytes",
                                                       procName);

Console.WriteLine (pc.NextValue());

```

Класс `PerformanceCounter` не открывает доступ к событию `ValueChanged`, поэтому для отслеживания изменений потребуется реализовать опрос. В следующем примере опрос производится каждые 200 мс — пока не поступит сигнал завершения от `EventWaitHandle`:

```

// Необходимо импортировать пространства имен System.Threading
и System.Diagnostics

static void Monitor (string category, string counter, string instance,
                     EventWaitHandle stopper)

{
    if (!PerformanceCounterCategory.Exists (category))
        throw new InvalidOperationException ("Category does not exist");
        // Категория не существует
    if (!PerformanceCounterCategory.CounterExists (counter, category))
        throw new InvalidOperationException ("Counter does not exist");
        // Счетчик не существует
    if (instance == null) instance = ""; // null == экземпляры отсутствуют (не null!)
    if (instance != "" &&
        !PerformanceCounterCategory.InstanceExists (instance, category))
        throw new InvalidOperationException ("Instance does not exist");
        // Экземпляр не существует
}

```

```

float lastValue = 0f;
using (PerformanceCounter pc = new PerformanceCounter (category,
                                                       counter, instance))
{
    while (!stopper.WaitOne (200, false))
    {
        float value = pc.NextValue();
        if (value != lastValue) // Записывать значение, только
                               // если оно изменилось
            Console.WriteLine (value);
        lastValue = value;
    }
}
}

```

Ниже показано, как применять метод `Monitor` для одновременного мониторинга работы процессора и жесткого диска:

```

EventWaitHandle stopper = new ManualResetEvent (false);
new Thread (() =>
    Monitor ("Processor", "% Processor Time", "_Total", stopper)
).Start();
new Thread (() =>
    Monitor ("LogicalDisk", "% Idle Time", "C:", stopper)
).Start();
// Проведение мониторинга; для завершения нужно нажать любую клавишу
Console.WriteLine ("Monitoring - press any key to quit");
Console.ReadKey();
stopper.Set();

```

Создание счетчиков и запись данных о производительности

Перед записью данных счетчика производительности понадобится создать категорию производительности и счетчик. Категория производительности должна быть создана наряду со всеми принадлежащими ей счетчиками за один шаг:

```

string category = "Nutshell Monitoring";
// Мы создадим два счетчика в следующей категории:
string eatenPerMin = "Macadamias eaten so far";
                    // Макадамия, съеденная до сих пор
string tooHard = "Macadamias deemed too hard";
                    // Макадамия считается слишком твердой
if (!PerformanceCounterCategory.Exists (category))
{
    CounterCreationDataCollection cd = new CounterCreationDataCollection();
    // Количество потребленной макадамии, включая время очистки от скорлупы
    cd.Add (new CounterCreationData (eatenPerMin,
                                    "Number of macadamias consumed, including shelling time",
                                    PerformanceCounterType.NumberOfItems32));
    // Количество макадамии, скорлупа которой не треснет, несмотря на все усилия
    cd.Add (new CounterCreationData (tooHard,
                                    "Number of macadamias that will not crack, despite much effort",
                                    PerformanceCounterType.NumberOfItems32));
}

```

```
        PerformanceCounterCategory.Create (category, "Test Category",
        PerformanceCounterCategoryType.SingleInstance, cd);
    }
```

Новые счетчики появятся в инструменте мониторинга производительности Windows в окне Add Counters (Добавить счетчики).

Если позже понадобится определить дополнительные счетчики в той же самой категории, то старая категория должна быть сначала удалена вызовом метода `PerformanceCounterCategory.Delete`.



Создание и удаление счетчиков производительности требует наличия прав администратора. По этой причине такие действия выполняются как часть процесса установки приложения.

После того, как счетчик создан, его значение можно обновить, создав экземпляр `PerformanceCounter`, установив его свойство `ReadOnly` в `false` и затем установив его свойство `RawValue`. Для обновления существующего значения можно также применять методы `Increment` и `IncrementBy`:

```
string category = "Nutshell Monitoring";
string eatenPerMin = "Macadamias eaten so far";
using (PerformanceCounter pc = new PerformanceCounter (category,
    eatenPerMin, ""))
{
    pc.ReadOnly = false;
    pc.RawValue = 1000;
    pc.Increment ();
    pc.IncrementBy (10);
    Console.WriteLine (pc.NextValue());           // 1011
}
```

Класс `Stopwatch`

Класс `Stopwatch` предлагает удобный механизм для измерения времени выполнения. Класс `Stopwatch` использует механизм с самым высоким разрешением, которое только обеспечивается операционной системой и оборудованием; обычно разрешение составляет меньше одной микросекунды. (По контрасту с ним свойства `DateTime.Now` и `Environment.TickCount` поддерживают разрешение около 15 мс.)

Для работы с классом `Stopwatch` необходимо вызвать метод `StartNew` — в результате создается новый экземпляр `Stopwatch` и запускается измерение времени. (В качестве альтернативы экземпляр `Stopwatch` можно создать вручную и затем вызвать метод `Start`.) Свойство `Elapsed` возвращает интервал прошедшего времени в виде структуры `TimeSpan`:

```
Stopwatch s = Stopwatch.StartNew();
System.IO.File.WriteAllText ("test.txt", new string ('*', 30000000));
Console.WriteLine (s.Elapsed);                  // 00:00:01.4322661
```

Класс `Stopwatch` также открывает доступ к свойству `ElapsedTicks`, которое возвращает количество пройденных “тиков” как значение `long`. Чтобы преобразовать тики в секунды, нужно разделить полученное значение на `StopWatch.Frequency`. Есть также свойство `ElapsedMilliseconds`, которое часто оказывается наиболее удобным.

Вызов метода `Stop` фиксирует значения свойств `Elapsed` и `ElapsedTicks`. Никакого фонового действия, связанного с “выполнением” `Stopwatch`, не предусмотрено, а потому вызов метода `Stop` является необязательным.

Межплатформенные инструменты диагностики

В этом разделе будут кратко описаны межплатформенные инструменты диагностики, доступные в .NET.

- `dotnet-counters`. Предоставляет общее представление состояния работающего приложения.
- `dotnet-trace`. Предназначен для более детального мониторинга производительности и событий.
- `dotnet-dump`. Предназначен для создания дампа памяти по запросу или после аварийного отказа.

Указанные инструменты не требуют повышения прав до уровня администратора и подходят как для среды разработки, так и для производственной среды.

`dotnet-counters`

Инструмент `dotnet-counters` осуществляет мониторинг использования памяти и центрального процессора процессом .NET и выводит данные на консоль (или в файл).

Чтобы установить этот инструмент, введите следующую команду в окне командной строки или терминала при наличии каталога с `dotnet` в пути поиска:

```
dotnet tool install --global dotnet-counters
```

Затем вы сможете запустить мониторинг процесса:

```
dotnet-counters monitor System.Runtime --process-id <<ИдентификаторПроцесса>>
```

`System.Runtime` означает то, что нужно выполнять мониторинг всех счетчиков из категории `System.Runtime`. Можно указывать либо название категории, либо имя счетчика (команда `dotnet-counters list` выводит список всех доступных категорий и счетчиков).

Вывод постоянно обновляется и выглядит примерно так:

```
Press p to pause, r to resume, q to quit.
```

```
Status: Running
```

```
[System.Runtime]
```

# of Assemblies Loaded	63
% Time in GC (since last GC)	0
Allocation Rate (Bytes / sec)	244,864

CPU Usage (%)	6
Exceptions / sec	0
GC Heap Size (MB)	8
Gen 0 GC / sec	0
Gen 0 Size (B)	265,176
Gen 1 GC / sec	0
Gen 1 Size (B)	451,552
Gen 2 GC / sec	0
Gen 2 Size (B)	24
LOH Size (B)	3,200,296
Monitor Lock Contention Count / sec	0
Number of Active Timers	0
ThreadPool Completed Work Items / sec	15
ThreadPool Queue Length	0
ThreadPool Threads Count	9
Working Set (MB)	52

Ниже описаны все доступные команды.

Команда	Предназначение
list	Отображает список имен счетчиков вместе с описанием каждого из них
ps	Отображает список процессов dotnet, пригодных для мониторинга
monitor	Отображает значения выбранных счетчиков (обновляемые через определенные промежутки времени)
collect	Сохраняет информацию о счетчике в файл

Поддерживаются следующие параметры.

Параметры/аргументы	Предназначение
--version	Отображает версию инструмента dotnet-counters
-h, --help	Отображает справочную информацию о программе
-p, --process-id	Устанавливает идентификатор процесса dotnet, подлежащего мониторингу. Применяется к командам monitor и collect
--refresh-interval	Устанавливает желаемый интервал обновления в секундах. Применяется к командам monitor и collect
-o, --output	Устанавливает имя выходного файла. Применяется к команде collect
--format	Устанавливает выходной формат. Допускается csv или json. Применяется к команде collect

dotnet-trace

Трассировки — это записи с отметками времени возникновения событий в вашей программе, таких как вызов метода или запрос к базе данных.

Трассировки могут также включать метрики производительности и специальные события, равно как содержать локальный контекст, подобный значениям локальных переменных. Традиционно .NET Framework и инфраструктуры вроде ASP.NET использовали ETW. В .NET 5 трассировки приложения записываются с помощью ETW в случае функционирования в среде Windows и LTTng при работе в среде Linux.

Для установки инструмента введите следующую команду:

```
dotnet tool install --global dotnet-trace
```

Чтобы начать запись событий программы, введите такую команду:

```
dotnet-trace collect --process-id <<ИдентификаторПроцесса>>
```

Команда запускает инструмент `dotnet-trace` со стандартным профилем, который собирает события центрального процессора и исполняющей среды .NET и записывает их в файл по имени `trace.nettrace`. Указывать другие профили можно посредством переключателя `--profile: gc-verbose` отслеживает сборку мусора и выборочно выделение памяти под объекты, а `gc-collect` — сборку мусора с низкими накладными расходами. Переключатель `-o` позволяет задавать другое имя выходного файла.

По умолчанию вывод производится в файл `.netperf`, который можно анализировать прямо на машине Windows с помощью инструмента `PerfView`. В качестве альтернативы инструмент `dotnet-trace` можно проинструктировать о необходимости создания файла, совместимого с бесплатной онлайновой службой анализа `Speedscope` (<https://speedscope.app>). Для создания файла `Speedscope` (`.speedscope.json`) используйте параметр `--format speedscope`.



Самая последняя версия инструмента `PerfView` доступна для загрузки по ссылке <https://github.com/microsoft/perfview>. Версия, поставляемая в составе Windows 10, может не поддерживать файлы `.netperf`.

Поддерживаются перечисленные ниже команды.

Команда	Предназначение
<code>collect</code>	Начинает запись информации о счетчике в файл
<code>ps</code>	Отображает список процессов <code>dotnet</code> , пригодных для мониторинга
<code>list-profiles</code>	Выводит список заранее построенных профилей трассировки с описанием поставщиков и фильтров в каждом
<code>convert <file></code>	Выполняет преобразование из формата <code>.nettrace</code> (<code>.netperf</code>) в альтернативный формат. В настоящее время единственным вариантом является <code>speedscope</code>

Специальные события трассировки

Ваше приложение может выпускать специальные события, определив специальный класс `EventSource`:

```
[EventSource (Name = "MyTestSource")]
public sealed class MyEventSource : EventSource
{
    public static MyEventSource Instance = new MyEventSource ();
    MyEventSource() : base (EventSourceSettings.EtwSelfDescribingEventFormat)
    {
    }

    public void Log (string message, int someNumber)
    {
        WriteEvent (1, message, someNumber);
    }
}
```

Метод `WriteEvent` перегружен для приема различных комбинаций простых типов (в основном строк и целых чисел). Затем вы можете вызывать его следующим образом:

```
MyEventSource.Instance.Log ("Something", 123);
```

При запуске `dotnet-trace` вы должны указать имя либо имена любых источников специальных событий, которые хотите записывать:

```
dotnet-trace collect --process-id <<ИдентификаторПроцесса>>
--providers MyTestSource
```

dotnet-dump

Дамп, иногда называемый дампом ядра, представляет собой моментальный снимок состояния виртуальной памяти процесса. Можно по запросу создавать дамп работающего процесса или сконфигурировать операционную систему для генерации дампа в случае аварийного отказа приложения.

Показанная ниже команда включает создание дампа ядра при аварийном отказе приложения в среде Ubuntu Linux (необходимые шаги могут отличаться между разновидностями Linux):

```
ulimit -c unlimited
```

В среде Windows с помощью редактора реестра (`regedit.exe`) понадобится создать или отредактировать следующий раздел в реестре локальной машины:

```
SOFTWARE\Microsoft\Windows\Windows Error Reporting\LocalDumps
```

Внутрь этого раздела нужно добавить ключ с именем, совпадающим с именем исполняемого файла (скажем, `foo.exe`), и поместить в него перечисленные далее ключи:

- `DumpFolder` (типа `REG_EXPAND_SZ`) со значением, указывающим путь, куда желательно сохранять файлы дампов;
- `DumpType` (типа `REG_DWORD`) со значением 2 для запрашивания полного дампа;
- (необязательно) `DumpCount` (типа `REG_DWORD`) со значением, указывающим максимальное количество файлов дампов, по достижении которого более старые файлы начнут удаляться.

Чтобы установить инструмент dotnet-dump, введите такую команду:

```
dotnet tool install --global dotnet-dump
```

После его установки вот как можно инициировать создание дампа по запросу (не заканчивая процесс):

```
dotnet-dump collect --process-id <<ИдентификаторПроцесса>>
```

Следующая команда запускает интерактивную оболочку для анализа файла дампа:

```
dotnet-dump analyze <<ФайлДампа>>
```

Если исключение привело к прекращению работы приложения, тогда с применением команды printexceptions (сокращенно pe) можно отобразить детали сгенерированного исключения. Оболочка dotnet-dump поддерживает множество дополнительных команд, список которых можно вывести с использованием команды help.



Параллелизм и асинхронность

Большинству приложений приходится иметь дело сразу с несколькими действиями, происходящими одновременно (*параллелизм*). Настоящую главу мы начнем с рассмотрения важнейших предпосылок, а именно — основ многопоточности и задач, после чего подробно обсудим принципы асинхронности и асинхронные функции C#.

В главе 21 мы продолжим более детальный анализ многопоточности, а в главе 22 раскроем связанную тему параллельного программирования.

Введение

Ниже приведены самые распространенные сценарии применения параллелизма.

- **Написание отзывчивых пользовательских интерфейсов.** Для обеспечения приемлемого времени отклика в приложениях WPF, мобильных приложениях и приложениях Windows Forms длительно выполняющиеся задачи должны запускаться параллельно с кодом, реализующим пользовательский интерфейс.
- **Обеспечение одновременной обработки запросов.** Клиентские запросы могут поступать на сервер одновременно, а потому они должны обрабатываться параллельно для обеспечения масштабируемости. В случае использования инфраструктуры ASP.NET Core или Web API исполняющая среда делает это автоматически. Тем не менее, вы по-прежнему должны заботиться о совместно используемом состоянии (например, учитывать последствия применения статических переменных для кеширования).
- **Параллельное программирование.** Код, в котором присутствуют интенсивные вычисления, может выполняться быстрее на многоядерных/много-процессорных компьютерах, если рабочая нагрузка распределяется между ядрами (данной теме посвящена глава 22).

- **Упреждающее выполнение.** На многоядерных машинах иногда удается улучшить производительность, предсказывая то, что возможно понадобится сделать, и выполняя это действие заранее. В LINQPad такой прием используется для ускорения создания новых запросов. Вариацией может быть запуск нескольких алгоритмов параллельно для решения одной и той же задачи. Тот из них, который завершится первым, “выигрывает” — прием эффективен, когда нельзя узнать заранее, какой алгоритм будет выполняться быстрее всех.

Общий механизм, с помощью которого программа может выполнять код одновременно, называется *многопоточностью*. Многопоточность поддерживается как средой CLR, так и операционной системой (ОС), и в рамках параллелизма является фундаментальной концепцией. Таким образом, крайне важно четко понимать основы многопоточной обработки и в особенности влияние потоков на *совместно используемое состояние*.

Многопоточная обработка

Поток — это путь выполнения, который может проходить независимо от других таких путей.

Каждый поток запускается внутри процесса ОС, который предоставляет изолированную среду для выполнения программы. В *однопоточной* программе внутри изолированной среды процесса функционирует только один поток, поэтому он получает монопольный доступ к среде. В *многопоточной* программе внутри единственного процесса запускается множество потоков, совместно используя одну и ту же среду выполнения (скажем, память). Отчасти это одна из причин, почему полезна многопоточность: например, один поток может извлекать данные в фоновом режиме, в то время как другой поток — отображать их по мере поступления. Такие данные называются *совместно используемым состоянием*.

Создание потока

Клиентская программа (консольная, WPF, UWP или Windows Forms) запускается в единственном потоке, который создается автоматически операционной системой (“главный” поток). Здесь он и будет существовать как однопоточное приложение, если только вы не создадите дополнительные потоки (прямо или косвенно)¹.

Создать и запустить новый поток можно за счет создания объекта `Thread` и вызова его метода `Start`. Простейший конструктор `Thread` принимает делегат `ThreadStart`: метод без параметров, который указывает, где должно начинаться выполнение. Вот пример:

¹ “За кулисами” среда CLR создает другие потоки, предназначенные для сборки мусора и финализации.

```

// Напоминание. Во всех примерах главы предполагается
// импортирование следующих пространств имен:
using System;
using System.Threading;
Thread t = new Thread (WriteY);      // Начать новый поток,
t.Start();                          // выполняющий WriteY()

// Одновременно делать что-то в главном потоке
for (int i = 0; i < 1000; i++) Console.Write ("x");
void WriteY()
{
    for (int i = 0; i < 1000; i++) Console.Write ("y");
}

```

Ниже показан типичный вывод:

```

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyy
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
yyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyy
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
yyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyyy
...
```

Главный поток создает новый поток *t*, в котором запускает метод, многократно выводящий символ “у”. В то же самое время главный поток многократно выводит символ “х” (рис. 14.1). На компьютере с одноядерным процессором ОС должна выделять каждому потоку кванты времени (обычно размером 20 миллисекунд в среде Windows) для эмуляции параллелизма, что дает в результате повторяющиеся блоки вывода “х” и “у”. На многоядерной или многопроцессорной машине два потока могут выполняться по-настоящему параллельно (конкурируя с другими активными процессами в системе), хотя в рассматриваемом примере все равно будут получаться повторяющиеся блоки вывода “х” и “у” из-за тонкостей работы механизма, которым класс Console обрабатывает параллельные запросы.

Главный поток

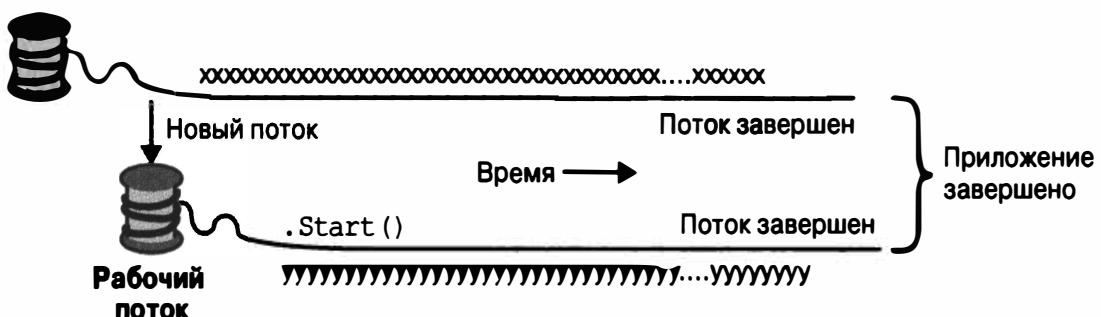


Рис. 14.1. Начало нового потока



Говорят, что поток **вытесняется** в точках, где его выполнение пересекается с выполнением кода в другом потоке. К этому термину часто прибегают при объяснении, почему что-то пошло не так, как было задумано!

После запуска свойство IsAlive потока возвращает true до тех пор, пока не будет достигнута точка, где поток завершается. Поток заканчивается, когда завершает выполнение делегат, переданный конструктору класса Thread. После завершения поток не может быть запущен повторно.

Каждый поток имеет свойство Name, которое можно установить для сопровождения отладки. Это особенно полезно в Visual Studio, т.к. имя потока отображается в окне Threads (Потоки) и в панели инструментов Debug Location (Местоположение отладки). Установить имя потока можно только один раз; попытки изменить его позже приведут к генерации исключения.

Статическое свойство Thread.CurrentThread возвращает поток, выполняющийся в текущее время:

```
Console.WriteLine (Thread.CurrentThread.Name);
```

Join и Sleep

С помощью метода Join можно организовать ожидание окончания другого потока:

```
Thread t = new Thread (Go);
t.Start();
t.Join();
Console.WriteLine ("Thread t has ended!");           // Поток t завершен!
void Go() { for (int i = 0; i < 1000; i++) Console.Write ("y"); }
```

Код выводит на консоль символ "y" тысячу раз и затем сразу же строку "Thread t has ended!". При вызове метода Join можно указывать тайм-аут, выраженный в миллисекундах или в виде структуры TimeSpan. Тогда метод будет возвращать true, если поток был завершен, или false, если истекло время тайм-аута.

Метод Thread.Sleep приостанавливает текущий поток на заданный период:

```
Thread.Sleep (TimeSpan.FromHours (1));           // Ожидать 1 час
Thread.Sleep (500);                            // Ожидать 500 мс
```

Вызов Thread.Sleep(0) немедленно прекращает текущий квант времени потока, добровольно передавая контроль над центральным процессором (ЦП) другим потокам. Метод Thread.Yield() делает то же самое, но уступает контроль только потокам, функционирующими на том же самом процессоре.



Вызов Sleep(0) или Yield() в производственном коде иногда полезен для расширенной настройки производительности. Это также великолепный диагностический инструмент для поиска проблем, связанных с безопасностью к потокам: если вставка вызова Thread.Yield() в любое место кода нарушает работу программы, то в ней почти наверняка присутствует ошибка.

На период ожидания Sleep или Join поток блокируется.

Блокирование

Поток считается заблокированным, если его выполнение приостановлено по некоторой причине, такой как вызов метода `Sleep` или ожидание завершения другого потока через вызов `Join`. Заблокированный поток немедленно *уступает* свой квант процессорного времени и далее не потребляет процессорное время, пока удовлетворяется условие блокировки. Проверить, заблокирован ли поток, можно с помощью его свойства `ThreadState`:

```
bool blocked = (someThread.ThreadState & ThreadState.WaitSleepJoin) != 0;
```



Свойство `ThreadState` является перечислением флагов, комбинирующим три “уровня” данных в побитовой манере. Однако большинство значений являются избыточными, неиспользуемыми или устаревшими. Следующий расширяющий метод ограничивает `ThreadState` одним из четырех полезных значений: `Unstarted`, `Running`, `WaitSleepJoin` и `Stopped`:

```
public static ThreadState Simplify (this ThreadState ts)
{
    return ts & (ThreadState.Unstarted |
        ThreadState.WaitSleepJoin |
        ThreadState.Stopped);
}
```

Свойство `ThreadState` удобно для диагностических целей, но непригодно для синхронизации, т.к. состояние потока может измениться в промежутке между проверкой `ThreadState` и обработкой данной информации.

Когда поток блокируется или деблокируется, ОС производит *переключение контекста*. С ним связаны небольшие накладные расходы, обычно составляющие одну или две микросекунды.

Интенсивный ввод-вывод или интенсивные вычисления

Операция, которая большую часть своего времени тратит на ожидание, пока что-то произойдет, называется операцией с *интенсивным вводом-выводом*; примером может служить загрузка веб-страницы или вызов метода `Console.ReadLine`. (Операции с интенсивным вводом-выводом обычно включают в себя ввод или вывод, но это не жесткое требование: вызов метода `Thread.Sleep` также считается операцией с интенсивным вводом-выводом.) И напротив, операция, которая большую часть своего времени затрачивает на выполнение вычислений с привлечением ЦП, называется операцией с *интенсивными вычислениями*.

Блокирование или зацикливание

Операция с интенсивным вводом-выводом работает одним из двух способов. Она либо *синхронно* ожидает завершения определенной операции в текущем потоке (такой как `Console.ReadLine`, `Thread.Sleep` или `Thread.Join`), либо

работает асинхронно, инициируя обратный вызов, когда интересующая операция завершается спустя какое-то время (более подробно об этом позже).

Операции с интенсивным вводом-выводом, которые ожидают синхронным образом, большую часть своего времени тратят на блокирование потока. Они также могут периодически “прокручиваться” в цикле:

```
while (DateTime.Now < nextStartTime)  
    Thread.Sleep (100);
```

Оставляя в стороне тот факт, что существуют более эффективные средства (вроде таймеров и сигнализирующих конструкций), еще одна возможность предусматривает зацикливание потока:

```
while (DateTime.Now < nextStartTime);
```

В общем случае это крайне неэкономное расходование процессорного времени: среда CLR и ОС предполагают, что поток выполняет важные вычисления, и надлежащим образом выделяют ресурсы. В сущности, мы превращаем код, который должен быть операцией с интенсивным вводом-выводом, в операцию с интенсивными вычислениями.



Относительно вопроса зацикливания или блокирования следует отметить пару нюансов. Во-первых, очень *кратковременное* зацикливание может быть эффективным, когда ожидается скорое (возможно в пределах нескольких микросекунд) удовлетворение некоторого условия, поскольку оно избегает накладных расходов и задержки, связанной с переключением контекста. Платформа .NET предлагает специальные методы и классы для содействия зацикливанию (см. информацию по ссылке [SpinLock and SpinWait](http://albahari.com/threading/) на странице <http://albahari.com/threading/>).

Во-вторых, затраты на блокирование не являются *нулевыми*. Дело в том, что за время своего существования каждый поток связывает около 1 Мбайт памяти и служит источником текущих накладных расходов на администрирование со стороны среды CLR и ОС. По этой причине блокирование может быть ненадежным в контексте программ с интенсивным вводом-выводом, которые нуждаются в поддержке сотен или тысяч параллельных операций. Взамен такие программы должны использовать подход, основанный на обратных вызовах, что полностью освободит поток на время ожидания. Таково (отчасти) целевое назначение асинхронных шаблонов, которые мы обсудим позже.

Локальное или совместно используемое состояние

Среда CLR назначает каждому потоку собственный стек в памяти, так что локальные переменные хранятся отдельно. В следующем примере мы определяем метод с локальной переменной, после чего вызываем его одновременно в главном потоке и во вновь созданном потоке:

```

new Thread (Go).Start();           // Вызвать Go в новом потоке
Go();                            // Вызвать Go в главном потоке

void Go()
{
    // Объявить и использовать локальную переменную cycles
    for (int cycles = 0; cycles < 5; cycles++) Console.Write ('?');
}

```

В стеке каждого потока создается отдельная копия переменной `cycles`, так что вывод вполне предсказуемо содержит десять знаков вопроса.

Потоки совместно используют данные, если они имеют общую ссылку на один и тот же экземпляр:

```

bool _done = false;

new Thread (Go).Start();
Go();

void Go()
{
    if (!_done) { _done = true; Console.WriteLine ("Done"); }
}

```

Оба потока совместно используют переменную `_done`, поэтому слово “Done” выводится один раз, а не два.

Локальные переменные, захваченные лямбда-выражением, тоже могут быть совместно используемыми:

```

bool done = false;
ThreadStart action = () =>
{
    if (!done) { done = true; Console.WriteLine ("Done"); }
};
new Thread (action).Start();
action();

```

Тем не менее, для совместного использования данных между потоками чаще применяются поля. В следующем примере в обоих потоках метод `Go` вызывается на том же самом экземпляре `ThreadTest`, так что они совместно используют поле `_done`:

```

var tt = new ThreadTest();
new Thread (tt.Go).Start();
tt.Go();

class ThreadTest
{
    bool _done;

    public void Go()
    {
        if (!_done) { _done = true; Console.WriteLine ("Done"); }
    }
}

```

Статические поля предлагают еще один способ совместного использования данных между потоками:

```

class ThreadTest
{
    static bool _done; // Статические поля совместно используются между всеми
                      // потоками в том же самом домене приложения

    static void Main()
    {
        new Thread (Go).Start();
        Go();
    }

    static void Go()
    {
        if (!_done) { _done = true; Console.WriteLine ("Done"); }
    }
}

```

Все четыре примера иллюстрируют еще одну ключевую концепцию: безопасность в отношении потоков (или наоборот — ее отсутствие). Вывод в действительности не определен: возможно (хотя и маловероятно), что слово “Done” будет выведено дважды. Однако если мы поменяем местами порядок следования операторов в методе Go, то вероятность двукратного вывода слова “Done” значительно возрастет:

```

static void Go()
{
    if (!_done) { Console.WriteLine ("Done"); _done = true; }
}

```

Проблема в том, что один поток может оценивать оператор `if` точно в то же самое время, когда второй поток выполняет оператор `WriteLine` — до того, как он получит шанс установить поле `_done` в `true`.



Приведенный пример демонстрирует одну из многочисленных ситуаций, в которых *совместно используемое записываемое состояние* может привести к возникновению определенной разновидности несистематических ошибок, характерных для многопоточности. В следующем разделе мы покажем, как с помощью блокировки устранить проблемы; тем не менее, по возможности лучше вообще избегать применения совместно используемого состояния. Позже мы объясним, как в этом могут помочь шаблоны асинхронного программирования.

Блокировка и безопасность потоков



Блокировка и безопасность в отношении потоков являются обширными темами. Полное их обсуждение приведено в разделах “Монопольное блокирование” и “Блокирование и безопасность к потокам” главы 21.

Исправить предыдущий пример можно, получив *монопольную блокировку* на период чтения и записи совместно используемого поля. Для этой цели в языке C# предусмотрен оператор `lock`:

```

class ThreadSafe
{
    static bool _done;
    static readonly object _locker = new object();
    static void Main()
    {
        new Thread (Go).Start();
        Go();
    }
    static void Go()
    {
        lock (_locker)
        {
            if (!_done) { Console.WriteLine ("Done"); _done = true; }
        }
    }
}

```

Когда два потока одновременно соперничают за блокировку (что может возникать с любым объектом ссылочного типа; `_locker` в рассматриваемом случае), один из потоков ожидает, или блокируется, до тех пор, пока блокировка не станет доступной. В таком случае гарантируется, что только один поток может войти в данный блок кода за раз, и строка `Done` будет выведена лишь однократно. Код, защищенный подобным образом (от неопределенности в многопоточном контексте), называется *безопасным в отношении потоков*.



Даже действие автоинкрементирования переменной не является безопасным к потокам: выражение `x++` выполняется на лежащем в основе процессоре как отдельные операции чтения, инкремента и записи. Таким образом, если два потока выполняют `x++` одновременно за пределами блокировки, то переменная `x` в итоге может быть инкрементирована один раз, а не два (или, что еще хуже, в определенных обстоятельствах переменная `x` может быть вообще *разрушена*, получив смесь битов старого и нового содержимого).

Блокировка не является панацеей для обеспечения безопасности потоков — довольно легко забыть заблокировать доступ к полю и тогда блокировка сама может создать проблемы (наподобие состояния взаимоблокировки).

Хорошим примером применения блокировки может служить доступ к совместно используемому кешу внутри памяти для часто эксплуатируемых объектов базы данных в приложении ASP.NET. Приложение такого вида очень просто заставить работать правильно без возникновения взаимоблокировки. Пример будет приведен в разделе “Безопасность к потокам в серверах приложений” главы 21.

Передача данных потоку

Иногда требуется передать аргументы начальному методу потока. Проще всего это сделать с использованием лямбда-выражения, которое вызывает данный метод с желаемыми аргументами:

```
Thread t = new Thread ( () => Print ("Hello from t!") );
t.Start();

void Print (string message) => Console.WriteLine (message);
```

Такой подход позволяет передавать методу любое количество аргументов. Можно даже поместить всю реализацию в лямбда-функцию с множеством операторов:

```
new Thread (() =>
{
    Console.WriteLine ("I'm running on another thread!");
    Console.WriteLine ("This is so easy!");
}).Start();
```

Альтернативный (менее гибкий) прием предусматривает передачу аргумента методу Start класса Thread:

```
Thread t = new Thread (Print);
t.Start ("Hello from t!");

void Print (object messageObj)
{
    string message = (string) messageObj; // Здесь необходимо приведение
    Console.WriteLine (message);
}
```

Код работает из-за того, что конструктор класса Thread перегружен для приема одного из двух делегатов:

```
public delegate void ThreadStart();
public delegate void ParameterizedThreadStart (object obj);
```

Лямбда-выражения и захваченные переменные

Как уже должно быть понятно, лямбда-выражение является наиболее удобным и мощным способом передачи данных потоку. Однако следует соблюдать осторожность, чтобы случайно не изменить *захваченные переменные* после запуска потока. Например, рассмотрим следующий код:

```
for (int i = 0; i < 10; i++)
    new Thread (() => Console.Write (i)).Start();
```

Вывод будет недетерминированным! Вот типичный результат:

```
0223557799
```

Проблема в том, что на протяжении всего времени жизни цикла переменная i ссылается на *ту же самую ячейку* в памяти. Следовательно, каждый поток вызывает метод Console.Write с переменной, значение которой может измениться в ходе его выполнения! Решение заключается в применении временной переменной, как показано ниже:

```
for (int i = 0; i < 10; i++)
{
    int temp = i;
    new Thread (() => Console.Write (temp)).Start();
}
```

Теперь все цифры от 0 до 9 будут выводиться в точности по одному разу. (Порядок вывода по-прежнему не определен, т.к. потоки могут запускаться в непредсказуемые моменты времени.)



Данная проблема аналогична проблеме, описанной в разделе “Захваченные переменные” главы 8. Она в основном обусловлена правилами языка C# для захвата переменных внутри циклов `for` в многопоточном сценарии.

Переменная `temp` является локальной по отношению к каждой итерации цикла. Таким образом, каждый поток захватывает отличающуюся ячейку памяти, и проблемы не возникают. Проблему в приведенном ранее коде проще проиллюстрировать с помощью показанного далее примера:

```
string text = "t1";
Thread t1 = new Thread ( () => Console.WriteLine (text) );
text = "t2";
Thread t2 = new Thread ( () => Console.WriteLine (text) );
t1.Start(); t2.Start();
```

Поскольку оба лямбда-выражения захватывают одну и ту же переменную `text`, строка `t2` выводится дважды.

Обработка исключений

Любые блоки `try/catch/finally`, действующие во время создания потока, не играют никакой роли в потоке, когда он начинает свое выполнение. Взгляните на следующую программу:

```
try
{
    new Thread (Go).Start();
}
catch (Exception ex)
{
    // Сюда мы никогда не попадем!
    Console.WriteLine ("Exception!"); // Исключение!
}

void Go() { throw null; } // Генерирует исключение NullReferenceException
```

Оператор `try/catch` здесь безрезультатен, и вновь созданный поток будет обременен необработанным исключением `NullReferenceException`. Такое поведение имеет смысл, если принять во внимание тот факт, что каждый поток обладает независимым путем выполнения.

Чтобы исправить ситуацию, обработчик событий потребуется переместить внутрь метода `Go`:

```
new Thread (Go).Start();

void Go()
{
```

```
try
{
    ...
    throw null; // Исключение NullReferenceException будет перехвачено ниже
    ...
}
catch (Exception ex)
{
    // Обычно необходимо зарегистрировать исключение в журнале
    // и/или сигнализировать другому потоку об отсоединении
    ...
}
```

В производственных приложениях необходимо предусмотреть обработчики исключений для всех методов входа в потоки — в частности как это делается в главном потоке (обычно на более высоком уровне в стеке выполнения). Необработанное исключение приведет к прекращению работы всего приложения, да еще и с отображением безобразного диалогового окна!



При написании таких блоков обработки исключений вы редко будете *игнорировать ошибку*: обычно вы предусмотрите регистрацию деталей исключения в журнале. Для клиентского приложения, возможно, вы отобразите диалоговое окно, позволяющее пользователю автоматически отправить подробные сведения веб-серверу. Затем, по всей видимости, вы решите перезапустить приложение, поскольку существует возможность того, что непредвиденное исключение оставило приложение в недопустимом состоянии.

Централизованная обработка исключений

В приложениях WPF, UWP и Windows Forms можно подписываться на “глобальные” события обработки исключений — `Application.DispatcherUnhandledException` и `Application.ThreadException`. Они инициируются после возникновения необработанного исключения в любой части программы, которая вызвана в цикле сообщений (сказанное относится ко всему коду, выполняющемуся в главном потоке, пока активен экземпляр `Application`). Прием полезен в качестве резервного средства для регистрации и сообщения об ошибках (хотя он неприменим для необработанных исключений, которые возникают в созданных вами рабочих потоках). Обработка упомянутых событий предотвращает аварийное завершение программы, хотя впоследствии может быть принято решение о ее перезапуске во избежание потенциального разрушения состояния, к которому может привести необработанное исключение.

Потоки переднего плана или фоновые потоки

По умолчанию потоки, создаваемые явно, являются *потоками переднего плана*. Потоки переднего плана удерживают приложение в активном состоянии до тех пор, пока хотя бы один из них выполняется, но *фоновые потоки* этого не делают. После того, как все потоки переднего плана прекратят свою работу, заканчивается и приложение, а любые все еще выполняющиеся фоновые потоки будут принудительно завершены.



Состояние переднего плана или фоновое состояние потока не имеет никакого отношения к его *приоритету* (выделению времени на выполнение).

Выяснить либо изменить фоновое состояние потока можно с использованием его свойства `IsBackground`:

```
static void Main (string[] args)
{
    Thread worker = new Thread ( () => Console.ReadLine() );
    if (args.Length > 0) worker.IsBackground = true;
    worker.Start();
}
```

Если запустить такую программу без аргументов, тогда рабочий поток предполагает, что она находится в фоновом состоянии, и будет ожидать в операторе `ReadLine` нажатия пользователем клавиши `<Enter>`. Тем временем главный поток завершится, но приложение останется запущенным, потому что поток переднего плана все еще активен. С другой стороны, если методу `Main` передается аргумент, то рабочему потоку назначается фоновое состояние, и программа завершается почти сразу после завершения главного потока (прекращая выполнение метода `ReadLine`).

Когда процесс прекращает работу подобным образом, любые блоки `finally` в стеке выполнения фоновых потоков пропускаются. Если в программе задействованы блоки `finally` (или `using`) для проведения очистки вроде удаления временных файлов, то вы можете избежать этого, явно ожидая окончание таких фоновых потоков вплоть до завершения приложения, либо за счет присоединения к потоку, либо с помощью сигнализирующей конструкции (см. раздел “Передача сигналов” далее в главе). В любом случае должен быть указан тайм-аут, чтобы можно было уничтожить поток, который отказывается завершаться, иначе приложение не сможет быть нормально закрыто без привлечения пользователем диспетчера задач (или команды `kill` в Unix).

Потоки переднего плана не требуют такой обработки, но вы должны позаботиться о том, чтобы избежать ошибок, которые могут привести к отказу завершения потока. Обычной причиной отказа в корректном завершении приложений является наличие активных фоновых потоков.

Приоритет потока

Свойство `Priority` потока определяет, сколько времени на выполнение получит данный поток относительно других активных потоков в ОС, со следующей шкалой значений:

```
enum ThreadPriority { Lowest, BelowNormal, Normal, AboveNormal, Highest }
```

Это становится важным, когда одновременно активно несколько потоков. Увеличение приоритета потока должно производиться осторожно, т.к. может привести к торможению других потоков. Если нужно, чтобы поток имел больший приоритет, чем потоки в других процессах, тогда потребуется также увели-

чить приоритет процесса с применением класса `Process` из пространства имен `System.Diagnostics`:

```
using Process p = Process.GetCurrentProcess();
p.PriorityClass = ProcessPriorityClass.High;
```

Прием может нормально работать для потоков, не относящихся к пользовательскому интерфейсу, которые выполняют минимальную работу и нуждаются в низкой задержке (т.е. возможности реагировать очень быстро). В приложениях с интенсивными вычислениями (особенно в тех, которые имеют пользовательский интерфейс) увеличение приоритета процесса может приводить к торможению других процессов и замедлению работы всего компьютера.

Передача сигналов

Иногда нужно, чтобы поток ожидал получения уведомления (либо уведомлений) от другого потока (потоков). Это называется *передачей сигналов*. Простейшей сигнализирующей конструкцией является класс `ManualResetEvent`. Вызов метода `WaitOne` класса `ManualResetEvent` блокирует текущий поток до тех пор, пока другой поток не “откроет” сигнал, вызвав метод `Set`. В приведенном ниже примере мы запускаем поток, который ожидает события `ManualResetEvent`. Он остается заблокированным в течение двух секунд до тех пор, пока главный поток не выдаст *сигнал*:

```
var signal = new ManualResetEvent (false);
new Thread (() =>
{
    Console.WriteLine ("Waiting for signal..."); // Ожидание сигнала...
    signal.WaitOne();
    signal.Dispose();
    Console.WriteLine ("Got signal!");           // Сигнал получен!
}).Start();

Thread.Sleep(2000);
signal.Set();                                // "Открыть" сигнал
```

После вызова метода `Set` сигнал остается “открытым”; для его “закрытия” понадобится вызвать метод `Reset`.

Класс `ManualResetEvent` — одна из нескольких сигнализирующих конструкций, предоставляемых средой CLR; все они подробно рассматриваются в главе 21.

Многопоточность в обогащенных клиентских приложениях

В приложениях WPF, UWP и Windows Forms выполнение длительных по времени операций в главном потоке снижает отзывчивость приложения, потому что главный поток обрабатывает также цикл сообщений, который отвечает за визуализацию и поддержку клавиатуры и мыши.

Популярный подход предусматривает настройку “рабочих” потоков для выполнения длительных по времени операций. Код в рабочем потоке запускает длительную операцию и по ее завершении обновляет пользовательский интер-

фейс. Тем не менее, все обогащенные клиентские приложения поддерживают потоковую модель, в которой элементы управления пользовательского интерфейса могут быть доступны только из создавшего их потока (обычно главного потока пользовательского интерфейса). Нарушение данного правила приводит либо к непредсказуемому поведению, либо к генерации исключения.

Следовательно, когда нужно обновить пользовательский интерфейс из рабочего потока, запрос должен быть перенаправлен потоку пользовательского интерфейса (формально это называется *маршализацией*). Вот как выглядит низкоуровневый способ реализации такого действия (позже мы обсудим другие решения, которые на нем основаны):

- в приложении WPF вызовите метод `BeginInvoke` или `Invoke` на объекте `Dispatcher` элемента;
- в приложении UWP вызовите метод `RunAsync` или `Invoke` на объекте `Dispatcher`;
- в приложении Windows Forms вызовите метод `BeginInvoke` или `Invoke` на элементе управления.

Все упомянутые методы принимают делегат, ссылающийся на метод, который требуется запустить. Методы `BeginInvoke/RunAsync` работают путем постановки этого делегата в *очередь сообщений* потока пользовательского интерфейса (та же очередь, которая обрабатывает события, поступающие от клавиатуры, мыши и таймера). Метод `Invoke` делает то же самое, но затем блокируется до тех пор, пока сообщение не будет прочитано и обработано потоком пользовательского интерфейса. По указанной причине метод `Invoke` позволяет получить возвращаемое значение из метода. Если возвращаемое значение не требуется, то методы `BeginInvoke/RunAsync` предпочтительнее из-за того, что они не блокируют вызывающий компонент и не привносят возможность возникновения взаимоблокировки (см. раздел “Взаимоблокировки” в главе 21).



Вы можете представлять себе, что при вызове метода `Application.Run` выполняется следующий псевдокод:

```
while (приложение не завершено)
{
    Ожидать появления чего-нибудь в очереди сообщений
    Что-то получено: к какому виду сообщений оно относится?
        Сообщение клавиатуры/мыши -> запустить обработчик событий
        Пользовательское сообщение BeginInvoke -> выполнить делегат
        Пользовательское сообщение Invoke -> выполнить делегат
        и отправить результат
}
```

Цикл такого вида позволяет рабочему потоку подготовить делегат для выполнения в потоке пользовательского интерфейса.

В целях демонстрации предположим, что имеется окно WPF с текстовым полем по имени `txtMessage`, содержимое которого должно быть обновлено рабочим потоком после выполнения длительной задачи (эмулируемой с помощью вызова метода `Thread.Sleep`).

Ниже приведен необходимый код:

```
partial class MyWindow : Window
{
    public MyWindow()
    {
        InitializeComponent();
        new Thread(Work).Start();
    }

    void Work()
    {
        Thread.Sleep(5000); // Эмулировать длительно выполняющуюся задачу
        UpdateMessage("The answer");
    }

    void UpdateMessage(string message)
    {
        Action action = () => txtMessage.Text = message;
        Dispatcher.BeginInvoke(action);
    }
}
```

После запуска показанного кода немедленно появляется окно. Спустя пять секунд текстовое поле обновляется. Для случая Windows Forms код будет похож, но только в нем вызывается метод BeginInvoke объекта Form:

```
void UpdateMessage(string message)
{
    Action action = () => txtMessage.Text = message;
    this.BeginInvoke(action);
}
```

Множество потоков пользовательского интерфейса

Допускается иметь множество потоков пользовательского интерфейса, если каждый из них владеет своим окном. Основным сценарием может служить приложение с несколькими высокоуровневыми окнами, которое часто называют приложением с однодокументным интерфейсом (Single Document Interface — SDI), например, Microsoft Word. Каждое окно SDI обычно отображает себя как отдельное “приложение” в панели задач и по большей части оно функционально изолировано от других окон SDI. За счет представления каждому такому окну собственного потока пользовательского интерфейса окна становятся более отзывчивыми.

Контексты синхронизации

В пространстве имён System.ComponentModel определен абстрактный класс SynchronizationContext, который делает возможным обобщение маршализации потоков.

В обогащенных API-интерфейсах для мобильных и настольных приложений (UWP, WPF и Windows Forms) определены и созданы экземпляры подклассов SynchronizationContext, которые можно получить через статическое свой-

ство `SynchronizationContext.Current` (при выполнении в потоке пользовательского интерфейса). Захват этого свойства позволяет позже “отправлять” сообщения элементам управления пользовательского интерфейса из рабочего потока:

```
partial class MyWindow : Window
{
    SynchronizationContext _uiSyncContext;
    public MyWindow()
    {
        InitializeComponent();
        // Захватить контекст синхронизации для текущего потока
        // пользовательского интерфейса:
        _uiSyncContext = SynchronizationContext.Current;
        new Thread(Work).Start();
    }
    void Work()
    {
        Thread.Sleep(5000); // Эмулировать длительно выполняющуюся задачу
        UpdateMessage("The answer");
    }
    void UpdateMessage(string message)
    {
        // Маршализовать делегат потоку пользовательского интерфейса:
        _uiSyncContext.Post(_ => txtMessage.Text = message, null);
    }
}
```

Удобство заключается в том, что один и тот же подход работает со всеми обогащенными API-интерфейсами.

Вызов метода `Post` эквивалентен вызову `BeginInvoke` на объекте `Dispatcher` или `Control`; есть также метод `Send`, который является эквивалентом `Invoke`.

Пул потоков

Всякий раз, когда запускается поток, несколько сотен микросекунд тратится на организацию таких элементов, как новый стек локальных переменных. Снизить эти накладные расходы позволяет *пул потоков*, предлагая накопитель заранее созданных многократно применяемых потоков. Организация пула потоков жизненно важна для эффективного параллельного программирования и реализации мелкомодульного параллелизма; пул потоков позволяет запускать короткие операции без накладных расходов, связанных с начальной настройкой потока.

При использовании потоков из пула следует учитывать несколько моментов.

- Невозможность установки свойства `Name` потока из пула затрудняет отладку (хотя при отладке в окне `Threads` среды Visual Studio к потоку можно присоединять описание).
- Потоки из пула всегда являются *фоновыми*.
- Блокирование потоков из пула может привести к снижению производительности (см. раздел “Чистота пула потоков” далее в главе).

Приоритет потока из пула можно свободно изменять — когда поток возвращается обратно в пул, будет восстановлен его первоначальный приоритет.

Для выяснения, является ли текущий поток потоком из пула, предназначено свойство `Thread.CurrentThread.IsThreadPoolThread`.

Вход в пул потоков

Простейший способ явного запуска какого-то кода в потоке из пула предполагает применение метода `Task.Run` (мы рассмотрим этот прием более подробно в следующем разделе):

```
// Класс Task находится в пространство имен System.Threading.Tasks  
Task.Run (() => Console.WriteLine ("Hello from the thread pool"));
```

Поскольку до выхода версии .NET Framework 4.0 задачи не существовали, общепринятой альтернативой был вызов метода `ThreadPool.QueueUserWorkItem`:

```
ThreadPool.QueueUserWorkItem (notUsed => Console.WriteLine ("Hello"));
```



Перечисленные ниже компоненты неявно используют пул потоков:

- серверы приложений ASP.NET Core и Web API;
- классы `System.Timers.Timer` и `System.Threading.Timer`;
- конструкции параллельного программирования, которые будут описаны в главе 22;
- (унаследованный) класс `BackgroundWorker`.

Чистота пула потоков

Пул потоков содействует еще одной функции, которая гарантирует то, что временный излишек интенсивной вычислительной работы не приведет к *превышению лимита ЦП*. Превышение лимита — это условие, при котором активных потоков имеется больше, чем ядер ЦП, и операционная система вынуждена выделять потокам кванты времени. Превышение лимита наносит ущерб производительности, т.к. выделение квантов времени требует интенсивных переключений контекста и может приводить к недействительности кешей ЦП, которые стали очень важными в обеспечении производительности современных процессоров.

Среда CLR избегает превышения лимита в пуле потоков за счет постановки задач в очередь и настройки их запуска. Она начинает с запуска такого количества параллельных задач, которое соответствует числу аппаратных ядер, и затем регулирует уровень параллелизма по алгоритму поиска экстремума, непрерывно подгоняя рабочую нагрузку в определенном направлении. Если производительность улучшается, тогда среда CLR продолжает двигаться в том же направлении (а иначе — в противоположном). В результате обеспечивается продвижение по оптимальной кривой производительности даже при наличии соперничающих процессов на компьютере.

Стратегия, реализованная в CLR, хорошо функционирует в случае удовлетворения следующих двух условий:

- элементы работы являются в основном кратковременными (менее 250 мс либо в идеале менее 100 мс), так что CLR имеет много возможностей для измерения и корректировки;
- в пуле не доминируют задания, которые большую часть своего времени являются заблокированными.

Блокирование ненадежно, поскольку дает среде CLR ложное представление о том, что оно загружает ЦП. Среда CLR достаточно интеллектуальна, чтобы обнаружить это и скомпенсировать (за счет внедрения дополнительных потоков в пул), хотя такое действие может сделать пул уязвимым к последующему превышению лимита. Также может быть введена задержка, потому что среда CLR регулирует скорость внедрения новых потоков, особенно на раннем этапе времени жизни приложения (тем более в клиентских ОС, где она отдает предпочтение низкому потреблению ресурсов).

Поддержание чистоты пула потоков особенно важно, когда требуется в полной мере задействовать ЦП (например, через API-интерфейсы параллельного программирования, рассматриваемые в главе 22).

Задачи

Поток — это низкоуровневый инструмент для организации параллельной обработки и, будучи таковым, он обладает описанными ниже ограничениями.

- Несмотря на простоту передачи данных запускаемому потоку, не существует простого способа получить “возвращаемое значение” обратно из потока, для которого выполняется метод `Join`. Потребуется предусмотреть какое-то совместно используемое поле. И если операция генерирует исключение, то его перехват и распространение будут сопряжены с аналогичными трудностями.
- После завершения потоку нельзя сообщить о том, что необходимо запустить что-нибудь еще; взамен к нему придется присоединяться с помощью метода `Join` (блокируя собственный поток в процессе).

Указанные ограничения препятствуют реализации мелкомодульного параллелизма; другими словами они затрудняют формирование более крупных параллельных операций за счет комбинирования мелких операций (как будет показано в последующих разделах, это очень важно при асинхронном программировании). В свою очередь возникает более высокая зависимость от ручной синхронизации (блокировки, выдачи сигналов и т.д.) и проблем, которые ее сопровождают.

Прямое применение потоков также оказывает влияние на производительность, как обсуждалось ранее в разделе “Пул потоков”. И если требуется запустить сотни или тысячи параллельных операций с интенсивным вводом-выводом, то подход на основе потоков повлечет за собой затраты сотен или тысяч мегабайтов памяти исключительно в качестве накладных расходов, связанных с потоками.

Класс Task, реализующий задачу, помогает решить все упомянутые проблемы. В сравнении с потоком тип Task — абстракция более высокого уровня, т.к. он представляет параллельную операцию, которая может быть или не быть подкреплена потоком. Задачи поддерживают возможность *композиции* (их можно соединять вместе с использованием *продолжения*). Они могут работать с *пулом потоков* в целях снижения задержки во время запуска, а с помощью класса TaskCompletionSource задачи позволяют действовать подход с обратными вызовами, при котором потоки вообще не будут ожидать завершения операций с интенсивным вводом-выводом.

Типы Task появились в версии .NET Framework 4.0 как часть библиотеки параллельного программирования. Однако с тех пор они были усовершенствованы (за счет применения *объектов ожидания (awaiter)*), чтобы функционировать столь же эффективно в более универсальных сценариях реализации параллелизма, и имеют поддерживающие типы для асинхронных функций C#.



В настоящем разделе мы не затрагиваем функциональные возможности задач, предназначенные для параллельного программирования — они подробно рассматриваются в главе 22.

Запуск задачи

Простейший способ запуска задачи, подкрепленной потоком, предусматривает вызов статического метода Task.Run (класс Task находится в пространстве имен System.Threading.Tasks). Упомянутому методу нужно просто передать делегат Action:

```
Task.Run (() => Console.WriteLine ("Foo"));
```



По умолчанию задачи используют потоки из пула, которые являются фоновыми потоками. Это означает, что когда главный поток завершается, то завершаются и любые созданные вами задачи. Следовательно, чтобы запускать приводимые здесь примеры из консольного приложения, потребуется блокировать главный поток после старта задачи (скажем, ожидая завершения задачи или вызывая метод Console.ReadLine):

```
Task.Run (() => Console.WriteLine ("Foo"));
Console.ReadLine();
```

В сопровождающих книгу примерах для LINQPad вызов Console.ReadLine опущен, т.к. процесс LINQPad удерживает фоновые потоки в активном состоянии.

Вызов метода Task.Run в подобной манере похож на запуск потока следующим образом (за исключением влияния пула потоков, о котором речь пойдет чуть позже):

```
new Thread (() => Console.WriteLine ("Foo")).Start();
```

Метод Task.Run возвращает объект Task, который можно применять для мониторинга хода работ, почти как в случае объекта Thread. (Тем не менее, обратите внимание, что мы не вызываем метод Start после вызова Task.Run, т.к. метод Run создает “горячие” задачи; взамен можно воспользоваться конструктором класса Task и создавать “холодные” задачи, хотя на практике так поступают редко.)

Отслеживать состояние выполнения задачи можно с помощью ее свойства Status.

Wait

Вызов метода Wait на объекте задачи приводит к блокированию до тех пор, пока она не будет завершена, и эквивалентен вызову метода Join на объекте потока:

```
Task task = Task.Run (() =>
{
    Thread.Sleep (2000);
    Console.WriteLine ("Foo");
});
Console.WriteLine (task.IsCompleted); // False
task.Wait(); // Блокируется вплоть до завершения задачи
```

Метод Wait позволяет дополнительно указывать тайм-аут и признак отмены для раннего завершения ожидания (см. раздел “Отмена” далее в главе).

Длительно выполняющиеся задачи

По умолчанию среда CLR запускает задачи в потоках из пула, что идеально в случае кратковременных задач с интенсивными вычислениями. Для длительно выполняющихся и блокирующих операций (как в предыдущем примере) использованию потоков из пула можно воспрепятствовать, как показано ниже:

```
Task task = Task.Factory.StartNew (() => ...,
                                         TaskCreationOptions.LongRunning);
```



Запуск одной длительно выполняющейся задачи в потоке из пула не приведет к проблеме; производительность может пострадать, когда параллельно запускается несколько длительно выполняющихся задач (особенно таких, которые производят блокирование). И в этом случае обычно существуют более эффективные решения, нежели указание TaskCreationOptions.LongRunning:

- если задачи являются интенсивными в плане ввода-вывода, то вместо потоков следует применять класс TaskCompletionSource и асинхронные функции, которые позволяют реализовать параллельное выполнение с обратными вызовами (продолжениями);
- если задачи являются интенсивными в плане вычислений, то отрегулировать параллелизм для таких задач позволит очередь производителей/потребителей, избегая ограничения других потоков и процессов (см. раздел “Реализация очереди производителей/потребителей” в главе 22).

Возвращение значений

Класс Task имеет обобщенный подкласс по имени Task<TResult>, который позволяет задаче выдавать возвращаемое значение. Для получения объекта Task<TResult> можно вызвать метод Task.Run с делегатом Func<TResult> (или совместимым лямбда-выражением) вместо делегата Action:

```
Task<int> task = Task.Run (() => { Console.WriteLine ("Foo"); return 3; });
// ...
```

Позже можно получить результат, запросив свойство Result. Если задача еще не закончилась, то доступ к этому свойству заблокирует текущий поток до тех пор, пока задача не завершится:

```
int result = task.Result; // Блокирует поток, если задача еще не завершена
Console.WriteLine (result); // 3
```

В следующем примере создается задача, которая использует LINQ для подсчета количества простых чисел в первых трех миллионах (начиная с 2) целочисленных значений:

```
Task<int> primeNumberTask = Task.Run (() =>
    Enumerable.Range (2, 3000000).Count (n =>
        Enumerable.Range (2, (int) Math.Sqrt (n)-1).All (i => n % i > 0)));
Console.WriteLine ("Task running...");
Console.WriteLine ("The answer is " + primeNumberTask.Result);
```

Код выводит строку “Task running..” (Задача выполняется...) и спустя несколько секунд выдает ответ 216816.



Класс Task<TResult> можно воспринимать как “будущее”, поскольку он инкапсулирует свойство Result, которое станет доступным позже во времени.

Исключения

В отличие от потоков задачи без труда распространяют исключения. Таким образом, если код внутри задачи генерирует необработанное исключение (другими словами, если задача *отказывает*), то это исключение автоматически повторно сгенерируется при вызове метода Wait или доступе к свойству Result класса Task<TResult>:

```
// Запустить задачу, которая генерирует исключение NullReferenceException:
Task task = Task.Run (() => { throw null; });
try
{
    task.Wait ();
}
catch (AggregateException aex)
{
    if (aex.InnerException is NullReferenceException)
        Console.WriteLine ("Null!");
    else
        throw;
}
```

(Среда CLR помещает исключение в оболочку AggregateException для нормальной работы в сценариях параллельного программирования; мы обсудим данный аспект в главе 22.)

Проверить, отказалась ли задача, можно без повторной генерации исключения посредством свойств IsFaulted и IsCanceled класса Task. Если оба свойства возвращают `false`, то ошибки не возникали; если `IsCanceled` равно `true`, то для задачи было сгенерировано исключение `OperationCanceledException` (см. раздел “Отмена” в главе 22); если `IsFaulted` равно `true`, то было сгенерировано исключение другого типа и на ошибку укажет свойство `Exception`.

Исключения и автономные задачи

В автономных задачах, работающих по принципу “установить и забыть” (для которых не требуется взаимодействие через метод `Wait` или свойство `Result` либо продолжение, делающее то же самое), общепринятой практикой является явное написание кода обработки исключений во избежание молчаливого отказа (в частности, как с потоком).



Игнорировать исключения нормально в ситуации, когда исключение только указывает на неудачу при получении результата, который больше не интересует. Например, если пользователь отменяет запрос на загрузку веб-страницы, то мы не должны переживать, если выяснится, что веб-страница не существует.

Игнорировать исключения проблематично, когда исключение указывает на ошибку в программе, по двум причинам:

- ошибка может оставить программу в недопустимом состоянии;
- в результате ошибки позже могут возникнуть другие исключения, и отказ от регистрации первоначальной ошибки может затруднить диагностику.

Подписаться на необнаруженные исключения на глобальном уровне можно через статическое событие `TaskScheduler.UnobservedTaskException`; обработка этого события и регистрация ошибки нередко имеют смысл.

Есть пара интересных нюансов, касающихся того, какое исключение считать необнаруживаемым.

- Задачи, ожидающие с указанием тайм-аута, будут генерировать необнаруженное исключение, если ошибки возникают *после истечения интервала тайм-аута*.
- Действие по проверке свойства `Exception` задачи после ее отказа помечает исключение как обнаруженное.

Продолжение

Продолжение сообщает задаче о том, что после завершения она должна продолжиться и делать что-то другое. Продолжение обычно реализуется посредством обратного вызова, который выполняется один раз после завершения

операции. Существуют два способа присоединения признака продолжения к задаче. Первый из них особенно важен, поскольку применяется асинхронными функциями C#, что вскоре будет показано. Мы можем продемонстрировать его на примере с подсчетом простых чисел, который был реализован в разделе “Возвращение значений” ранее в главе:

```
Task<int> primeNumberTask = Task.Run (() =>
    Enumerable.Range (2, 3000000).Count (n =>
        Enumerable.Range (2, (int)Math.Sqrt(n)-1).All (i => n % i > 0)));
var awaite = primeNumberTask.GetAwaiter();
awaite.OnCompleted (() =>
{
    int result = awaite.GetResult();
    Console.WriteLine (result); // Выводит значение result
});
```

Вызов метода `GetAwaiter` на объекте задачи возвращает *объект ожидания*, метод `OnCompleted` которого сообщает *предыдущей* задаче (`primeNumberTask`) о необходимости выполнить делегат, когда она завершится (или откажется). Признак продолжения допускается присоединять к уже завершенным задачам; в таком случае продолжение будет запланировано для немедленного выполнения.



Объект ожидания (`awaiter`) — это любой объект, открывающий доступ к двум методам, которые мы только что видели (`OnCompleted` и `GetResult`), и к булевскому свойству по имени `IsCompleted`. Никакого интерфейса или базового класса для унификации указанных членов не предусмотрено (хотя метод `OnCompleted` является частью интерфейса `INotifyCompletion`). Мы объясним важность данного шаблона в разделе “Асинхронные функции в C#” далее в главе.

Если предшествующая задача терпит отказ, то исключение генерируется повторно, когда код продолжения вызывает метод `awaiter.GetResult`. Вместо вызова `GetResult` мы могли бы просто обратиться к свойству `Result` предшествующей задачи. Преимущество вызова `GetResult` связано с тем, что в случае отказа предшествующей задачи исключение генерируется напрямую без помещения в оболочку `AggregateException`, позволяя писать более простые и чистые блоки `catch`.

Для необобщенных задач метод `GetResult` не имеет возвращаемого значения. Его польза состоит единственно в повторной генерации исключений.

Если присутствует контекст синхронизации, тогда метод `OnCompleted` его автоматически захватывает и отправляет ему признак продолжения. Это очень удобно в обогащенных клиентских приложениях, т.к. признак продолжения возвращается обратно потоку пользовательского интерфейса. Тем не менее, в случае библиотек подобное обычно нежелательно, потому что относительно затратный возврат в поток пользовательского интерфейса должен происходить только раз при покидании библиотеки, а не между вызовами методов. Следовательно, его можно аннулировать с помощью метода `ConfigureAwait`:

```
var awaite = primeNumberTask.ConfigureAwait (false).GetAwaiter();
```

Когда контекст синхронизации отсутствует (или применяется `ConfigureAwait` `Await(false)`), продолжение будет (в общем случае) выполняться в потоке из пула.

Другой способ присоединить продолжение предполагает вызов метода `ContinueWith` задачи:

```
primeNumberTask.ContinueWith (antecedent =>
{
    int result = antecedent.Result;
    Console.WriteLine (result); // Выводит 123
});
```

Сам метод `ContinueWith` возвращает объект `Task`, который полезен, если планируется присоединение дальнейших признаков продолжения. Однако если задача отказывает, тогда в приложениях с пользовательским интерфейсом придется иметь дело напрямую с исключением `AggregateException` и предусмотреть дополнительный код для маршализации продолжения (см. раздел “Планировщики задач” в главе 22). В контекстах, не связанных с пользовательским интерфейсом, потребуется указывать `TaskContinuationOptions.ExecuteSynchronously`, если продолжение должно выполняться в том же потоке, иначе произойдет возврат в пул потоков. Метод `ContinueWith` особенно удобен в сценариях параллельного программирования; мы рассмотрим это подробно в разделе “Продолжение” главы 22.

TaskCompletionSource

Ранее уже было указано, что метод `Task.Run` создает задачу, которая запускает делегат в потоке из пула (или не из пула). Еще один способ создания задачи заключается в использовании класса `TaskCompletionSource`.

Класс `TaskCompletionSource` позволяет создавать задачу из любой операции, которая начинается и через некоторое время заканчивается. Он работает путем предоставления “подчиненной” задачи, которой вы управляете вручную, указывая, когда операция завершилась или отказалась. Это идеально для работы с интенсивным вводом-выводом: вы получаете все преимущества задач (с их возможностями передачи возвращаемых значений, исключений и признаков продолжения), не блокируя поток на период выполнения операции.

Для применения класса `TaskCompletionSource` нужно просто создать его экземпляр. Данный класс открывает доступ к свойству `Task`, возвращающему объект задачи, для которой можно организовать ожидание и присоединить признак продолжения — как делается с любой другой задачей. Тем не менее, такая задача полностью управляет объектом `TaskCompletionSource` с помощью следующих методов:

```
public class TaskCompletionSource<TResult>
{
    public void SetResult (TResult result);
    public void SetException (Exception exception);
    public void SetCanceled();
    public bool TrySetResult (TResult result);
    public bool TrySetException (Exception exception);
```

```

public bool TrySetCanceled();
public bool TrysetCanceled (CancellationToken cancellationToken);
...
}

```

Вызов одного из перечисленных методов *передает сигнал* задаче, помещая ее в состояние завершения, отказа или отмены (последнее состояние мы рассмотрим в разделе “Отмена” далее в главе). Предполагается, что вы будете вызывать любой из этих методов в точности один раз: в случае повторного вызова методы SetResult, SetException и SetCanceled сгенерируют исключение, а методы Try* возвратят false.

В следующем примере после пятисекундного ожидания выводится число 42:

```

var tcs = new TaskCompletionSource<int>();
new Thread (() => { Thread.Sleep (5000); tcs.SetResult (42); })
    { IsBackground = true }
    .Start();
Task<int> task = tcs.Task;           // "Подчиненная" задача
Console.WriteLine (task.Result);     // 42

```

Можно реализовать собственный метод Run с использованием класса TaskCompletionSource:

```

Task<TResult> Run<TResult> (Func<TResult> function)
{
    var tcs = new TaskCompletionSource<TResult>();
    new Thread (() =>
    {
        try { tcs.SetResult (function()); }
        catch (Exception ex) { tcs.SetException (ex); }
    }).Start();
    return tcs.Task;
}
...
Task<int> task = Run (() => { Thread.Sleep (5000); return 42; });

```

Вызов данного метода эквивалентен вызову Task.Factory.StartNew с параметром TaskCreationOptions.LongRunning для запроса потока не из пула.

Реальная мощь класса TaskCompletionSource заключается в возможности создания задач, не связывающих потоки. Например, рассмотрим задачу, которая ожидает пять секунд и затем возвращает число 42. Мы можем реализовать ее без потока с применением класса Timer, который с помощью CLR (и в свою очередь ОС) инициирует событие каждые x миллисекунд (таймеры еще будут рассматриваться в главе 21):

```

Task<int> GetAnswerToLife()
{
    var tcs = new TaskCompletionSource<int>();
    // Создать таймер, который инициирует событие раз в 5000 мс:
    var timer = new System.Timers.Timer (5000) { AutoReset = false };
    timer.Elapsed += delegate { timer.Dispose(); tcs.SetResult (42); };
    timer.Start();
    return tcs.Task;
}

```

Таким образом, наш метод возвращает объект задачи, которая завершается спустя пять секунд с результатом 42. Присоединив к задаче продолжение, мы можем вывести ее результат, не блокируя ни одного потока:

```
var awariter = GetAnswerToLife().GetAwaiter();
awariter.OnCompleted (() => Console.WriteLine (awariter.GetResult()));
```

Мы могли бы сделать код более полезным и превратить его в универсальный метод `Delay`, параметризовав время задержки и избавившись от возвращаемого значения. Это означало бы возвращение объекта `Task` вместо `Task<int>`. Тем не менее, необобщенной версии `TaskCompletionSource` не существует, а потому мы не можем напрямую создавать необобщенный объект `Task`. Обойти ограничение довольно просто: поскольку класс `Task<TResult>` является производным от `Task`, мы создаем `TaskCompletionSource<какой-то-тип>` и затем неявно преобразуем получаемый экземпляр `Task<какой-то-тип>` в `Task`, примерно так:

```
var tcs = new TaskCompletionSource<object>();
Task task = tcs.Task;
```

Теперь можно реализовать универсальный метод `Delay`:

```
Task Delay (int milliseconds)
{
    var tcs = new TaskCompletionSource<object>();
    var timer = new System.Timers.Timer (milliseconds) { AutoReset = false };
    timer.Elapsed += delegate { timer.Dispose(); tcs.SetResult (null); };
    timer.Start();
    return tcs.Task;
}
```



В версии .NET 5 появился необобщенный класс `TaskCompletionSource`, так что если вы нацелите проект на .NET 5 или последующую версию, то сможете вместо `TaskCompletionSource<object>` указывать `TaskCompletionSource`.

Ниже показано, как использовать данный метод для вывода числа 42 после пятисекундной паузы:

```
Delay (5000).GetAwaiter().OnCompleted (() => Console.WriteLine (42));
```

Такое применение класса `TaskCompletionSource` без потока означает, что поток будет занят, только когда запускается продолжение, т.е. спустя пять секунд. Мы можем продемонстрировать это, запустив 10 000 таких операций одновременно и не столкнувшись с ошибкой или чрезмерным потреблением ресурсов:

```
for (int i = 0; i < 10000; i++)
    Delay (5000).GetAwaiter().OnCompleted (() => Console.WriteLine (42));
```



Таймеры инициируют свои обратные вызовы на потоках из пула, так что через пять секунд пул потоков получит 10 000 запросов вызова `SetResult(null)` на `TaskCompletionSource`. Если запросы поступают быстрее, чем они могут быть обработаны, тогда пул потоков отреагирует постановкой их в очередь и последующей обработкой на оптимальном уровне параллелизма для ЦП. Это идеально в ситуации, когда привязанные к потокам задания являются кратковременными, что в данном случае справедливо: привязанное к потоку задание просто вызывает метод `SetResult` и либо осуществляет отправку признака продолжения контексту синхронизации (в приложении с пользовательским интерфейсом), либо выполняет само продолжение (`Console.WriteLine(42)`).

Task.Delay

Только что реализованный метод `Delay` достаточно полезен своей доступностью в качестве статического метода класса `Task`:

```
Task.Delay(5000).GetAwaiter().OnCompleted(() => Console.WriteLine(42));
```

или:

```
Task.Delay(5000).ContinueWith(ant => Console.WriteLine(42));
```

Метод `Task.Delay` является *асинхронным* эквивалентом метода `Thread.Sleep`.

Принципы асинхронности

Мы завершили демонстрацию `TaskCompletionSource` написанием *асинхронных* методов. В данном разделе мы объясним, что собой представляют асинхронные операции, и покажем, как они приводят к асинхронному программированию.

Сравнение синхронных и асинхронных операций

Синхронная операция выполняет свою работу *перед* возвратом управления вызывающему коду.

Асинхронная операция может выполнять большую часть или всю свою работу *после* возврата управления вызывающему коду.

Большинство создаваемых и вызываемых вами методов будут *синхронными*. Примерами могут служить `List<T>.Add`, `Console.WriteLine` и `Thread.Sleep`. Асинхронные методы менее распространены и инициируют *параллелизм*, т.к. они продолжают работать параллельно с вызывающим кодом. Асинхронные методы обычно быстро (или немедленно) возвращают управление вызывающему компоненту, потому их также называют *неблокирующими методами*.

Большинство асинхронных методов, которые мы видели до сих пор, могут быть описаны как *универсальные методы*:

- `Thread.Start`;
- `Task.Run`;
- методы, которые присоединяют признаки продолжения к задачам.

В добавок некоторые методы из числа рассмотренных в разделе “Контексты синхронизации” ранее в главе (`Dispatcher.BeginInvoke`, `Control.BeginInvoke` и `SynchronizationContext.Post`) являются асинхронными, как и методы, которые были написаны в разделе “`TaskCompletionSource`”, включая `Delay`.

Что собой представляет асинхронное программирование

Принцип асинхронного программирования состоит в том, что длительно выполняющиеся (или потенциально длительно выполняющиеся) функции реализуются асинхронным образом. Он отличается от традиционного подхода синхронной реализации длительно выполняющихся функций с последующим их вызовом в новом потоке или в задаче для введения параллелизма по мере необходимости.

Отличие от синхронного подхода заключается в том, что параллелизм инициируется *внутри* длительно выполняющейся функции, а не *за ее пределами*. В результате появляются два преимущества.

- Параллельное выполнение с интенсивным вводом-выводом может быть реализовано без связывания потоков (как было продемонстрировано в разделе “`TaskCompletionSource`” ранее в главе), улучшая показатели масштабируемости и эффективности.
- Обогащенные клиентские приложения в итоге содержат меньше кода в рабочих потоках, что упрощает достижение безопасности в отношении потоков.

В свою очередь это приводит к двум различающимся сценариям использования асинхронного программирования. Первый из них связан с написанием (обычно серверных) приложений, которые эффективно обрабатывают большой объем параллельных операций ввода-вывода. Проблемой здесь является не обеспечение безопасности к потокам (т.к. совместно используемое состояние обычно минимально), а достижение эффективности потоков; в частности, отсутствие потребления одного потока на сетевой запрос. Следовательно, в таком контексте выигрыш от асинхронности получают только операции с интенсивным вводом-выводом.

Второй сценарий применения касается упрощения поддержки безопасности в отношении потоков внутри обогащенных клиентских приложений. Он особенно актуален с ростом размера программы, поскольку для борьбы со сложностью мы обычно проводим рефакторинг крупных методов в методы меньших размеров, получая в результате цепочки методов, которые вызывают друг друга (*графы вызовов*).

Если любая операция внутри традиционного графа синхронных вызовов является длительно выполняющейся, тогда мы должны запускать целый график вызовов в рабочем потоке, чтобы обеспечить отзывчивость пользовательского

интерфейса. Таким образом, мы в конечном итоге получаем единственную параллельную операцию, которая охватывает множество методов (*крупномодульный параллелизм*), что требует учета безопасности к потокам для каждого метода в графе.

В случае графа *асинхронных* вызовов мы не должны запускать поток до тех пор, пока это не станет действительно необходимым — как правило, в нижней части графа (или вообще не запускать поток для операций с интенсивным вводом-выводом). Все остальные методы могут выполняться полностью в потоке пользовательского интерфейса со значительно упрощенной поддержкой безопасности в отношении потоков. В результате получается *мелкомодульный параллелизм* — последовательность небольших параллельных операций, между которыми выполнение возвращается в поток пользовательского интерфейса.



Чтобы извлечь из этого выгоду, операции с интенсивным вводом-выводом и интенсивными вычислениями должны быть реализованы асинхронным образом; хорошее эмпирическое правило предусматривает асинхронную реализацию любой операции, выполнение которой может занять более 50 мс.

(Оборотная сторона заключается в том, что *чрезмерно мелкомодульная асинхронность* может нанести ущерб производительности, потому что с асинхронными операциями связаны определенные накладные расходы, как будет показано в разделе “Оптимизация” далее в главе.)

В настоящей главе мы сосредоточим внимание главным образом на более сложном сценарии с обогащенным клиентом. В разделах “Параллелизм и TCP” и “Реализация HTTP-сервера” главы 16 будут приведены два примера, иллюстрирующие сценарий с интенсивным вводом-выводом.



Инфраструктура UWP поддерживает асинхронное программирование до момента, когда синхронные версии некоторых длительно выполняющихся методов либо не доступны, либо генерируют исключения. Взамен потребуется вызывать асинхронные методы, возвращающие объекты задач (или объекты, которые могут быть преобразованы в задачи посредством расширяющего метода `AsTask`).

Асинхронное программирование и продолжение

Задачи идеально подходят для асинхронного программирования, т.к. они поддерживают признаки продолжения, которые являются жизненно важными в реализации асинхронности (взгляните на метод `Delay`, реализованный в разделе “`TaskCompletionSource`” ранее в главе). При написании метода `Delay` мы использовали класс `TaskCompletionSource`, который предлагает стандартный способ реализации асинхронных методов с интенсивным вводом-выводом “нижнего уровня”.

В случае методов с интенсивными вычислениями для инициирования параллелизма, связанного с потоками, мы применяем метод `Task.Run`. Асинхронный

метод создается просто за счет возвращения вызывающему компоненту объекта задачи. Асинхронное программирование отличается тем, что мы стремимся поступать подобным образом на как можно более низком уровне графа вызовов. Тогда высокоуровневые методы в обогащенных клиентских приложениях могут быть оставлены в потоке пользовательского интерфейса и получать доступ к элементам управления и совместно используемому состоянию, не порождая проблем с безопасностью к потокам. В целях иллюстрации рассмотрим показанный ниже метод, который вычисляет и подсчитывает простые числа, используя все доступные ядра (класс `ParallelEnumerable` обсуждается в главе 22):

```
int GetPrimesCount (int start, int count)
{
    return
        ParallelEnumerable.Range (start, count).Count (n =>
            Enumerable.Range (2, (int)Math.Sqrt(n)-1).All (i => n % i > 0));
}
```

Детали того, как работает алгоритм, не особенно важны; имеет значение лишь то, что метод требует некоторого времени на выполнение. Мы можем продемонстрировать это, написав другой метод, который вызывает `GetPrimesCount`:

```
void DisplayPrimeCounts()
{
    for (int i = 0; i < 10; i++)
        Console.WriteLine (GetPrimesCount (i*1000000 + 2, 1000000) +
            " primes between " + (i*1000000) + " and " + ((i+1)*1000000-1));
    // " простые числа между " + (i*1000000) + " и " + ((i+1)*1000000-1));
    Console.WriteLine ("Done!");
}
```

Вот как выглядит вывод:

```
78498 primes between 0 and 999999
70435 primes between 1000000 and 1999999
67883 primes between 2000000 and 2999999
66330 primes between 3000000 and 3999999
65367 primes between 4000000 and 4999999
64336 primes between 5000000 and 5999999
63799 primes between 6000000 and 6999999
63129 primes between 7000000 and 7999999
62712 primes between 8000000 and 8999999
62090 primes between 9000000 and 9999999
```

Теперь у нас есть *граф вызовов* с методом `DisplayPrimeCounts`, обращающимся к методу `GetPrimesCount`. Для простоты внутри `DisplayPrimeCounts` применяется метод `Console.WriteLine`, хотя в реальности, скорее всего, будут обновляться элементы управления пользовательского интерфейса в обогащенном клиентском приложении, что демонстрируется позже. Крупномодульный параллелизм для такого графа вызовов можно инициировать следующим образом:

```
Task.Run (() => DisplayPrimeCounts());
```

В случае асинхронного подхода с мелкомодульным параллелизмом мы начинаяем с написания асинхронной версии метода `GetPrimesCount`:

```
Task<int> GetPrimesCountAsync (int start, int count)
{
    return Task.Run (() =>
        ParallelEnumerable.Range (start, count).Count (n =>
            Enumerable.Range (2, (int) Math.Sqrt (n) - 1).All (i => n % i > 0));
}
```

Важность языковой поддержки

Теперь мы должны модифицировать метод `DisplayPrimeCounts` так, чтобы он вызывал `GetPrimesCountAsync`. Именно здесь в игру вступают ключевые слова `await` и `async` языка C#, поскольку поступить по-другому намного сложнее, чем может показаться. Если мы просто изменим цикл, как показано ниже:

```
for (int i = 0; i < 10; i++)
{
    var awaier = GetPrimesCountAsync (i * 1000000 + 2, 1000000).GetAwaiter();
    awaier.OnCompleted (() =>
        Console.WriteLine (awaier.GetResult () + " primes between... "));
}
Console.WriteLine ("Done");
```

то цикл быстро пройдет через 10 итераций (методы не являются блокирующими) и все 10 операций будут выполняться параллельно (с ранним выводом строки “Done”).



Выполнять приведенные задачи параллельно в данном случае нежелательно, т.к. их внутренние реализации уже распараллелены; это приведет лишь к более длительному ожиданию первых результатов (и нарушению упорядочения).

Однако существует намного более распространенная причина для последовательного выполнения задач — ситуация, когда задача Б зависит от результатов выполнения задачи А. Например, при выборке веб-страницы DNS-поиск должен предшествовать HTTP-запросу.

Для обеспечения последовательного выполнения следующую итерацию цикла нужно запускать из самого продолжения, что означает устранение цикла `for` и реализацию рекурсивного вызова в продолжении:

```
void DisplayPrimeCounts ()
{
    DisplayPrimeCountsFrom (0);
}

void DisplayPrimeCountsFrom (int i)
{
    var awaier = GetPrimesCountAsync (i * 1000000 + 2, 1000000).GetAwaiter();
    awaier.OnCompleted (() =>
```

```

        Console.WriteLine (awaiter.GetResult() + " primes between...");  

        if (i++ < 10) DisplayPrimeCountsFrom (i);  

        else Console.WriteLine ("Done");  

    });
}

```

Все становится еще хуже, если необходимо сделать асинхронным *сам* метод `DisplayPrimesCount`, возвращая объект задачи, которая отправляет сигнал о своем завершении. Достижение такой цели требует создания объекта `TaskCompletionSource`:

```

Task DisplayPrimeCountsAsync()  

{  

    var machine = new PrimesStateMachine();  

    machine.DisplayPrimeCountsFrom (0);  

    return machine.Task;  

}  

class PrimesStateMachine  

{  

    TaskCompletionSource<object> _tcs =  

        new TaskCompletionSource<object>();  

    public Task Task { get { return _tcs.Task; } }  

    public void DisplayPrimeCountsFrom (int i)  

    {  

        var awariter = GetPrimesCountAsync (i*1000000+2, 1000000).GetAwaiter();  

        awariter.OnCompleted (() =>  

        {  

            Console.WriteLine (awariter.GetResult());  

            if (i++ < 10) DisplayPrimeCountsFrom (i);  

            else { Console.WriteLine ("Done"); _tcs.SetResult (null); }  

        });
    }
}

```

К счастью, всю работу подобного рода делают *асинхронные функции C#*. Благодаря новым ключевым словам `async` и `await` нам придется написать только следующий код:

```

async Task DisplayPrimeCountsAsync()  

{  

    for (int i = 0; i < 10; i++)  

        Console.WriteLine (await GetPrimesCountAsync (i*1000000 + 2, 1000000) +  

            " primes between " + (i*1000000) + " and " + ((i+1)*1000000-1));  

    Console.WriteLine ("Done!");
}

```

Таким образом, ключевые слова `async` и `await` очень важны для реализации асинхронности без чрезмерной сложности. Давайте посмотрим, как они работают.



Взглянуть на данную проблему можно и по-другому: императивные конструкции циклов (`for`, `foreach` и т.д.) не очень хорошо сочетаются с признаками продолжения, поскольку они полагаются на *текущее локальное состояние* метода (т.е. сколько раз цикл планирует выполняться).

Хотя ключевые слова `async` и `await` предлагают одно решение, иногда решить проблему удается другим способом, заменяя императивные конструкции циклов их *функциональными* эквивалентами (другими словами, запросами LINQ). Это является основой библиотеки *Reactive Extensions (Rx)* и может оказаться удачным вариантом, когда в отношении результата нужно выполнить операции запросов или скомбинировать несколько последовательностей. Недостаток связан с тем, что во избежание блокировки инфраструктура Rx опирается на последовательностях с *активным* источником, которые могут оказаться концептуально сложными.

Асинхронные функции в C#

Ключевые слова `async` и `await` позволяют писать асинхронный код, который обладает той же самой структурой и простотой, что и синхронный код, а также устранять необходимость во вспомогательном коде, присущем асинхронному программированию.

Ожидание

Ключевое слово `await` упрощает присоединение признаков продолжения. Рассмотрим базовый сценарий. Приведенные ниже строки:

```
var результат = await выражение;
оператор(ы);
```

компилятор развернет в следующий функциональный эквивалент:

```
var awaiter = выражение.GetAwaiter();
awaiter.OnCompleted(() =>
{
    var результат = awaiter.GetResult();
    оператор(ы);
});
```



Компилятор также выпускает код для замыкания продолжения в случае синхронного завершения (см. раздел “Оптимизация” далее в главе) и для обработки разнообразных нюансов, которые мы затронем в последующих разделах.

В целях демонстрации вернемся к ранее написанному асинхронному методу, который вычисляет и подсчитывает простые числа:

```
Task<int> GetPrimesCountAsync (int start, int count)
{
    return Task.Run(() =>
        ParallelEnumerable.Range(start, count).Count(n =>
            Enumerable.Range(2, (int)Math.Sqrt(n)-1).All(i => n % i > 0)));
}
```

Используя ключевое слово `await`, его можно вызвать следующим образом:

```
int result = await GetPrimesCountAsync (2, 1000000);
Console.WriteLine (result);
```

Чтобы код скомпилировался, к содержащему такой вызов методу понадобится добавить модификатор `async`:

```
async void DisplayPrimesCount ()
{
    int result = await GetPrimesCountAsync (2, 1000000);
    Console.WriteLine (result);
}
```

Модификатор `async` сообщает компилятору о необходимости трактовать `await` как ключевое слово, а не идентификатор, что привело бы к неоднозначности внутри данного метода (это гарантирует успешную компиляцию кода, написанного до выхода версии C# 5, где слово `await` использовалось в качестве идентификатора). Модификатор `async` может применяться только к методам (и лямбда-выражениям), которые возвращают `void` либо (как будет показано позже) тип `Task` или `Task<TResult>`.



Модификатор `async` подобен модификатору `unsafe` в том, что он не дает никакого эффекта на сигнатуре или открытых метаданных метода, а воздействует, только когда находится *внутри* метода. По этой причине не имеет смысла использовать `async` в интерфейсе. Однако вполне законно, например, вводить `async` при переопределении виртуального метода, не являющегося асинхронным, при условии сохранения сигнатуры метода в неизменном виде.

Методы с модификатором `async` называются *асинхронными функциями*, т.к. сами они обычно асинхронны. Чтобы увидеть почему, давайте посмотрим, каким образом процесс выполнения проходит через асинхронную функцию.

Встретив выражение `await`, процесс выполнения (обычно) производит возврат в вызывающий код — почти как оператор `yield return` в итераторе. Но перед возвратом исполняющая среда присоединяет к ожидающей задаче признак продолжения, который гарантирует, что когда задача завершится, управление перейдет обратно в метод и продолжит с места, где оно его оставило. Если задача отказывает, тогда ее исключение генерируется повторно, а в противном случае выражению `await` присваивается возвращаемое значение задачи. Все сказанное можно резюмировать, просмотрев логическое расширение только что рассмотренного асинхронного метода:

```
void DisplayPrimesCount ()
{
    var awaiter = GetPrimesCountAsync (2, 1000000).GetAwaiter();
    awaiter.OnCompleted (() =>
    {
        int result = awaiter.GetResult();
        Console.WriteLine (result);
    });
}
```

Выражение, к которому применяется `await`, обычно является задачей; тем не менее, компилятор устроит любой объект с методом `GetAwaiter`, который возвращает *объект ожидания* (реализующий метод `INotifyCompletion.OnCompleted` и имеющий должным образом типизированный метод `GetResult` и свойство `bool IsCompleted`).

Обратите внимание, что выражение `await` оценивается как относящееся к типу `int`; причина в том, что ожидаемым выражением было `Task<int>` (метод `GetAwaiter().GetResult` которого возвращает тип `int`). Ожидание необобщенной задачи вполне законно и генерирует выражение `void`:

```
await Task.Delay (5000);
Console.WriteLine ("Five seconds passed!");
```

Захват локального состояния

Реальная мощь выражений `await` заключается в том, что они могут находиться практически в любом месте кода. В частности, выражение `await` может присутствовать на месте любого выражения (внутри асинхронной функции) кроме оператора `lock` или контекста `unsafe`.

В следующем примере `await` располагается в цикле:

```
async void DisplayPrimeCounts()
{
    for (int i = 0; i < 10; i++)
        Console.WriteLine (await GetPrimesCountAsync (i*1000000+2, 1000000));
}
```

При первом выполнении метода `GetPrimesCountAsync` управление возвращается вызывающему коду из-за выражения `await`. Когда метод завершается (или отказывает), выполнение возобновляется с места, где оно его покинуло, с сохраненными значениями локальных переменных и счетчиков циклов.

В отсутствие ключевого слова `await` простейшим эквивалентом мог бы служить пример, реализованный в разделе “Важность языковой поддержки” ранее в главе. Однако компилятор реализует более общую стратегию преобразования таких методов в конечные автоматы (очень похоже на то, как он поступает с итераторами).

В возобновлении выполнения после выражения `await` компилятор полагается на признаки продолжения (согласно шаблону объектов ожидания). Это значит, что в случае запуска в потоке пользовательского интерфейса контекст синхронизации гарантирует, что выполнение будет возобновлено в том же самом потоке. В противном случае выполнение возобновляется в любом потоке, где задача была завершена. Смена потока не оказывает влияния на порядок выполнения и несущественна, если только вы каким-то образом не зависите от родства потоков, возможно, из-за использования локального хранилища потока (см. раздел “Локальное хранилище потока” в главе 21). Здесь уместна аналогия с ситуацией, когда вы ловите такси, чтобы добраться из одного места в другое. При наличии контекста синхронизации в вашем распоряжении всегда будет один и тот же таксомотор, а без контекста синхронизации таксомоторы каждый раз, возможно, окажутся разными. Хотя путешествие в любом случае будет в основном тем же самым.

Ожидание в пользовательском интерфейсе

Мы можем продемонстрировать асинхронные функции в более практическом контексте, реализовав простой пользовательский интерфейс, который остается отзывчивым во время вызова метода с интенсивными вычислениями. Давайте начнем с синхронного решения:

```
class TestUI : Window
{
    Button _button = new Button { Content = "Go" };
    TextBlock _results = new TextBlock();
    public TestUI()
    {
        var panel = new StackPanel();
        panel.Children.Add (_button);
        panel.Children.Add (_results);
        Content = panel;
        _button.Click += (sender, args) => Go();
    }
    void Go()
    {
        for (int i = 1; i < 5; i++)
            _results.Text += GetPrimesCount (i * 1000000, 1000000) +
                " primes between " + (i*1000000) + " and " + ((i+1)*1000000-1) +
                Environment.NewLine;
    }
    int GetPrimesCount (int start, int count)
    {
        return ParallelEnumerable.Range (start, count).Count (n =>
            Enumerable.Range (2, (int) Math.Sqrt(n)-1).All (i => n % i > 0));
    }
}
```

После щелчка на кнопке Go (Запуск) приложение перестает быть отзывчивым на время, необходимое для выполнения кода с интенсивными вычислениями. Решение превращается в асинхронное за два шага. Первый шаг связан с переключением на асинхронную версию метода GetPrimesCount, который применялся в предыдущем примере:

```
Task<int> GetPrimesCountAsync (int start, int count)
{
    return Task.Run (() =>
        ParallelEnumerable.Range (start, count).Count (n =>
            Enumerable.Range (2, (int) Math.Sqrt(n)-1).All (i => n % i > 0)));
}
```

Второй шаг предусматривает изменение метода Go для вызова метода GetPrimesCountAsync:

```
async void Go()
{
    _button.IsEnabled = false;
    for (int i = 1; i < 5; i++)
        _results.Text += await GetPrimesCountAsync (i * 1000000, 1000000) +
            " primes between " + (i*1000000) + " and " + ((i+1)*1000000-1) +
            Environment.NewLine;
    _button.IsEnabled = true;
}
```

Приведенный выше код демонстрирует простоту программирования с использованием асинхронных функций: все делается как при синхронном подходе, но вместо блокирования функций и их ожидания посредством `await` производится вызов асинхронных функций. В рабочем потоке запускается только код внутри метода `GetPrimesCountAsync`; код в методе Go “арендует” время у потока пользовательского интерфейса. Можно было бы сказать, что метод Go выполняется *псевдопараллельно* с циклом сообщений (т.е. его выполнение пересекается с другими событиями, которые обрабатывает поток пользовательского интерфейса). Благодаря такому псевдопараллелизму единственной точкой, где может возникнуть вытеснение, является выполнение `await`. В итоге обеспечение безопасности к потокам упрощается: в данном случае может возникнуть только одна проблема — *реентерабельность* (из-за повторного щелчка на кнопке во время выполнения метода Go, чего мы избегаем, делая кнопку недоступной). Подлинный параллелизм происходит ниже в стеке вызовов, внутри кода, вызываемого методом `Task.Run`. Чтобы извлечь преимущества из такой модели, по-настоящему параллельный код избегает доступа к совместно используемому состоянию или элементам управления пользовательского интерфейса.

Рассмотрим еще один пример, в котором вместо вычисления простых чисел загружается несколько веб-страниц с суммированием их длин. В .NET доступно множество асинхронных методов, возвращающих задачи, один из которых определен в классе `WebClient` внутри пространства имен `System.Net`. Метод `DownloadDataTaskAsync` асинхронно загружает URI в байтовый массив, возвращая объект `Task<byte[]>`, так что в результате ожидания можно получить массив `byte[]`. Давайте перепишем метод Go:

```
async void Go()
{
    _button.IsEnabled = false;
    string[] urls = "www.albahari.com www.oreilly.com www.linqpad.net".Split();
    int totalLength = 0;
    try
    {
        foreach (string url in urls)
        {
            var uri = new Uri ("http://" + url);
            byte[] data = await new WebClient().DownloadDataTaskAsync (uri);
            _results.Text += "Length of " + url + " is " + data.Length +
                            Environment.NewLine; // длина загруженных данных
            totalLength += data.Length;
        }
        _results.Text += "Total length: " + totalLength; // общая длина
    }
    catch (WebException ex)
    {
        _results.Text += "Error: " + ex.Message; // ошибка
    }
    finally { _button.IsEnabled = true; }
}
```

И снова код отражает то, как он был бы реализован синхронным образом, включая применение блоков `catch` и `finally`. Хотя после первого `await` управление возвращается вызывающему коду, блок `finally` не выполняется вплоть до логического завершения метода (после выполнения всего его кода либо по причине раннего возвращения из-за оператора `return` или возникновения необработанного исключения).

Полезно посмотреть, что в точности происходит. Для начала необходимо вернуться к псевдокоду, который выполняет цикл сообщений в потоке пользовательского интерфейса:

```
Установить для этого потока контекст синхронизации WPF
while (приложение не завершено)
{
    Ожидать появления чего-нибудь в очереди сообщений
    Что-то получено: к какому виду сообщений оно относится?
    Сообщение клавиатуры/мыши -> запустить обработчик событий
    Пользовательское сообщение BeginInvoke/Invoke -> выполнить делегат
}
```

Обработчики событий, присоединяемые к элементам пользовательского интерфейса, выполняются через такой цикл сообщений. Когда запускается наш метод `Go`, выполнение продолжается до выражения `await`, после чего управление возвращается в цикл сообщений (освобождая пользовательский интерфейс для реагирования на дальнейшие события). Однако расширение компилятором выражения `await` гарантирует, что перед возвращением продолжение настроено так, чтобы выполнение возобновлялось там, где оно было прекращено до завершения задачи. И поскольку ожидание с помощью `await` происходит в потоке пользовательского интерфейса, то признак продолжения отправляется контексту синхронизации, который выполняет его через цикл сообщений, сохраняя выполнение всего метода `Go` псевдопараллельным с потоком пользовательского интерфейса. Подлинный параллелизм (с интенсивным вводом-выводом) происходит внутри реализации метода `DownloadDataTaskAsync`.

Сравнение с крупномодульным параллелизмом

До выхода версии C# 5 асинхронное программирование было затруднено не только из-за отсутствия языковой поддержки, но и потому, что асинхронная функциональность в .NET Framework открывалась через неуклюжие шаблоны EAP и APM (см. раздел “Устаревшие шаблоны” далее в главе), а не через методы, возвращающие объекты задач.

Популярным обходным путем являлся крупномодульный параллелизм (для чего даже был предусмотрен тип по имени `BackgroundWorker`). Мы можем продемонстрировать крупномодульную асинхронность на исходном синхронном примере с методом `GetPrimesCount`, изменив обработчик событий кнопки, как показано ниже:

```
...
button.Click += (sender, args) =>
{
    button.IsEnabled = false;
    Task.Run(() => Go());
};
```

(Мы решили использовать метод Task.Run вместо класса BackgroundWorker из-за того, что BackgroundWorker никак бы не упростил данный конкретный пример.) В любом случае конечный результат состоит в том, что целый граф синхронных вызовов (Go и GetPrimesCount) выполняется в рабочем потоке. И поскольку метод Go обновляет элементы пользовательского интерфейса, в код придется добавить вызовы Dispatcher.BeginInvoke:

```
void Go()
{
    for (int i = 1; i < 5; i++)
    {
        int result = GetPrimesCount (i * 1000000, 1000000);
        Dispatcher.BeginInvoke (new Action (() =>
            results.Text += result + " primes between " + (i*1000000) +
            " and " + ((i+1)*1000000-1) + Environment.NewLine));
    }
    Dispatcher.BeginInvoke (new Action (() => _button.IsEnabled = true));
}
```

В отличие от асинхронной версии цикл сам выполняется в рабочем потоке. Это может казаться безобидным, но даже в таком простом случае применение многопоточности привело к возникновению условия состязаний. (Смогли его заметить? Если нет, тогда запустите программу: условие состязаний почти наверняка станет очевидным.)

Реализация отмены и сообщения о ходе работ создает больше возможностей для ошибок, связанных с нарушением безопасности к потокам, как делает любой дополнительный код в методе. Например, предположим, что верхний предел для цикла не закодирован жестко, а поступает из вызова метода:

```
for (int i = 1; i < GetUpperBound(); i++)
```

Далее представим, что метод GetUpperBound читает значение из конфигурационного файла, который ленивым образом загружается с диска при первом вызове. Весь этот код теперь выполняется в рабочем потоке — код, который весьма вероятно не является безопасным к потокам. В том и заключается опасность запуска рабочих потоков на высоких уровнях внутри графа вызовов.

Написание асинхронных функций

Что касается любой асинхронной функции, то возвращаемый тип void можно заменить типом Task, чтобы сделать сам метод *пригодным* для асинхронного выполнения (и ожидания с помощью await). Никаких других изменений вносить не придется:

```
async Task PrintAnswerToLife()      // Вместо void можно возвращать Task
{
    await Task.Delay (5000);
    int answer = 21 * 2;
    Console.WriteLine (answer);
}
```

Обратите внимание, что в теле метода мы не возвращаем объект задачи явным образом. Компилятор произведет задачу, которая будет отправлять сигнал о завершении данного метода (или о возникновении необработанного исключения). В итоге упрощается создание цепочек асинхронных вызовов:

```
async Task Go()
{
    await PrintAnswerToLife();
    Console.WriteLine ("Done");
}
```

Так как метод Go объявлен с возвращаемым типом Task, сам Go допускает ожидание посредством await.

Компилятор расширяет асинхронные функции, возвращающие задачи, в код, использующий класс TaskCompletionSource для создания задачи, которая затем отправляет сигнал о завершении или отказе.

Оставив в стороне нюансы, мы можем развернуть метод PrintAnswerToLife в такой функциональный эквивалент:

```
Task PrintAnswerToLife()
{
    var tcs = new TaskCompletionSource<object>();
    var awaier = Task.Delay (5000).GetAwaiter();
    awaier.OnCompleted (() =>
    {
        try
        {
            awaier.GetResult();      // Сгенерировать повторно любые исключения
            int answer = 21 * 2;
            Console.WriteLine (answer);
            tcs.SetResult (null);
        }
        catch (Exception ex) { tcs.SetException (ex); }
    });
    return tcs.Task;
}
```

Следовательно, всякий раз, когда возвращающий задачу асинхронный метод завершается, управление переходит обратно к месту его ожидания (благодаря признаку продолжения).



В сценарии с обогащенным клиентом управление перемещается с этой точки обратно в поток пользовательского интерфейса (если оно еще в нем не находится). В противном случае выполнение продолжается в любом потоке, куда был направлен признак продолжения, что означает отсутствие задержки при подъеме по графу асинхронных вызовов кроме первого “прыжка”, если он был инициирован потоком пользовательского интерфейса.

Возвращение Task<TResult>

Возвращать объект Task<TResult> можно, если в теле метода возвращается тип TResult:

```
async Task<int> GetAnswerToLife()
{
    await Task.Delay (5000);
    int answer = 21 * 2;
    return answer;      // Метод имеет возвращаемый тип Task<int>,
                        // поэтому возвратить int
}
```

Внутренне это приводит к тому, что объекту TaskCompletionSource отправляется сигнал со значением, отличающимся от null. Мы можем продемонстрировать работу метода GetAnswerToLife, вызвав его из метода PrintAnswerToLife (который в свою очередь вызывается из Go):

```
async Task Go()
{
    await PrintAnswerToLife();
    Console.WriteLine ("Done");
}

async Task PrintAnswerToLife()
{
    int answer = await GetAnswerToLife();
    Console.WriteLine (answer);
}

async Task<int> GetAnswerToLife()
{
    await Task.Delay (5000);
    int answer = 21 * 2;
    return answer;
}
```

В сущности, мы преобразовали исходный метод PrintAnswerToLife в два метода — с той же легкостью, как если бы программировали синхронным образом. Сходство с синхронным программированием является умышленным; вот синхронный эквивалент нашего графа вызовов, для которого вызов метода Go дает тот же самый результат после блокирования на протяжении пяти секунд:

```
void Go()
{
    PrintAnswerToLife();
    Console.WriteLine ("Done");
}

void PrintAnswerToLife()
{
    int answer = GetAnswerToLife();
    Console.WriteLine (answer);
}

int GetAnswerToLife()
{
    Thread.Sleep (5000);
    int answer = 21 * 2;
    return answer;
}
```



Тем самым также иллюстрируется базовый принцип проектирования с применением асинхронных функций в C#.

1. Напишите синхронные версии своих методов.
2. Замените вызовы *синхронных* методов вызовами *асинхронных* методов и примените к ним `await`.
3. За исключением методов “верхнего уровня” (обычно обработчиков событий для элементов управления пользовательского интерфейса) поменяйте возвращаемые типы асинхронных методов на `Task` или `Task<TResult>`, чтобы они поддерживали `await`.

Способность компилятора производить задачи для асинхронных функций означает, что явно создавать объект `TaskCompletionSource` придется главным образом только в (относительно редком) случае методов нижнего уровня, которые инициируют параллелизм с интенсивным вводом-выводом. (Для методов, инициирующих параллелизм с интенсивными вычислениями, создается задача с помощью метода `Task.Run`.)

Выполнение графа асинхронных вызовов

Чтобы ясно увидеть, как все выполняется, полезно реорганизовать код следующим образом:

```
async Task Go()
{
    var task = PrintAnswerToLife();
    await task; Console.WriteLine ("Done");
}

async Task PrintAnswerToLife()
{
    var task = GetAnswerToLife();
    int answer = await task; Console.WriteLine (answer);
}

async Task<int> GetAnswerToLife()
{
    var task = Task.Delay (5000);
    await task; int answer = 21 * 2; return answer;
}
```

Метод `Go` вызывает метод `PrintAnswerToLife`, который вызывает метод `GetAnswerToLife`, а тот в свою очередь вызывает метод `Delay` и затем ожидает. Наличие `await` приводит к тому, что управление возвращается методу `PrintAnswerToLife`, который сам ожидает, возвращая управление методу `Go`, который тоже ожидает и возвращает управление вызывающему коду. Все происходит синхронно в потоке, вызвавшем метод `Go`; это короткая *синхронная фаза выполнения*.

Спустя пять секунд запускается продолжение на `Delay` и управление возвращается методу `GetAnswerToLife` в потоке из пула. (Если мы начинали в потоке пользовательского интерфейса, то управление возвратится в него.) Затем выполняются оставшиеся операторы в методе `GetAnswerToLife`, после чего за-

дача `Task<int>` данного метода завершается с результатом 42 и инициируется продолжение в методе `PrintAnswerToLife`, что приведет к выполнению оставшихся операторов в этом методе. Процесс продолжается до тех пор, пока задача метода `Go` не выдаст сигнал о своем завершении.

Поток выполнения соответствует показанному ранее графу синхронных вызовов, т.к. мы следуем шаблону, при котором к каждому асинхронному методу сразу после вызова применяется `await`. В результате создается последовательный поток без параллелизма или перекрывающегося выполнения внутри графа вызовов. Каждое выражение `await` образует “брешь” в выполнении, после которой программа возобновляет работу с того места, где она остановила.

Параллелизм

Вызов асинхронного метода без его ожидания позволяет коду, который за ним следует, выполняться параллельно. В приведенных ранее примерах вы могли отметить наличие кнопки, обработчик события которой вызывал метод `Go` так, как показано ниже:

```
_button.Click += (sender, args) => Go();
```

Несмотря на то что `Go` является асинхронным методом, мы не можем применить к нему `await`, и это действительно то, что соответствует параллелизму, необходимому для поддержки отзывчивого пользовательского интерфейса.

Тот же самый принцип можно использовать для запуска двух асинхронных операций параллельно:

```
var task1 = PrintAnswerToLife();
var task2 = PrintAnswerToLife();
await task1; await task2;
```

(За счет ожидания обеих операций впоследствии мы “заканчиваем” параллелизм в данной точке. Позже мы покажем, как комбинатор задач `WhenAll` помогает в реализации такого шаблона.)

Параллелизм, организованный подобным образом, получается независимо от того, инициированы ли операции в потоке пользовательского интерфейса, хотя существует отличие в том, как он проявляется. В обоих случаях мы получаем тот же самый “подлинный” параллелизм в операциях нижнего уровня, которые его инициируют (таких как `Task.Delay` или код, предоставленный методу `Task.Run`). Методы, находящиеся выше в стеке вызовов, будут по-настоящему параллельными, только если операция была инициирована без наличия контекста синхронизации; иначе они окажутся псевдопараллельными (и упростят обеспечение безопасности к потокам), согласно чему единственным местом, где может произойти вытеснение, является оператор `await`. Это позволяет, например, определить совместно используемое поле `_x` и инкрементировать его в методе `GetAnswerToLife` без блокирования:

```
async Task<int> GetAnswerToLife()
{
    _x++;
    await Task.Delay (5000);
    return 21 * 2;
}
```

(Тем не менее, мы не можем предполагать, что `_x` имеет одно и то же значение до и после `await`.)

Асинхронные лямбда-выражения

Точно так же как обычные *именованные* методы могут быть асинхронными:

```
async Task NamedMethod()
{
    await Task.Delay (1000);
    Console.WriteLine ("Foo");
}
```

асинхронными способны быть и *неименованные* методы (лямбда-выражения и анонимные методы), если они предварены ключевым словом `async`:

```
Func<Task> unnamed = async () =>
{
    await Task.Delay (1000);
    Console.WriteLine ("Foo");
};
```

Вызывать и применять `await` к ним можно одинаково:

```
await NamedMethod();
await unnamed();
```

Асинхронные лямбда-выражения можно использовать при подключении обработчиков событий:

```
myButton.Click += async (sender, args) =>
{
    await Task.Delay (1000);
    myButton.Content = "Done";
};
```

Это более лаконично, чем приведенный ниже код, который обеспечивает тот же самый результат:

```
myButton.Click += ButtonHandler;
...
async void ButtonHandler (object sender, EventArgs args)
{
    await Task.Delay (1000);
    myButton.Content = "Done";
};
```

Асинхронные лямбда-выражения могут также возвращать тип `Task<TResult>`:

```
Func<Task<int>> unnamed = async () =>
{
    await Task.Delay (1000);
    return 123;
};
int answer = await unnamed();
```

Асинхронные потоки данных

С помощью `yield return` вы можете писать итератор, а с помощью `await` — асинхронную функцию. Асинхронные потоки (появившиеся в C# 8) объединяют эти концепции и позволяют реализовать итератор, который ожидает, выдавая элементы асинхронным образом. Такая поддержка основана на следующей паре интерфейсов, которые представляют собой асинхронные аналоги интерфейсов перечисления, описанных в разделе “Перечисление и итераторы” главы 4:

```
public interface IAsyncEnumerable<out T>
{
    IAsyncEnumerator<T> GetAsyncEnumerator (...);
}

public interface IAsyncEnumerator<out T> : IAsyncDisposable
{
    T Current { get; }
    ValueTask<bool> MoveNextAsync ();
}
```

`ValueTask<T>` — это структура, которая является оболочкой для `Task<T>` и по поведению похожа на `Task<T>`, но обеспечивает более эффективное выполнение, когда задача завершается синхронно (что часто может происходить при перечислении последовательности). Обсуждение отличий ищите в разделе “`ValueTask<T>`” далее в главе. Интерфейс `IAsyncDisposable` представляет собой асинхронную версию `IDisposable`; он предоставляет возможность выполнения очистки, если вы решите вручную реализовывать интерфейсы:

```
public interface IAsyncDisposable
{
    ValueTask DisposeAsync ();
}
```



Действие по извлечению каждого элемента из последовательности (`MoveNextAsync`) является асинхронной операцией, поэтому асинхронные потоки подходят, когда элементы поступают постепенно (например, как при обработке данных из видеопотока). Напротив, следующий тип лучше подходит, когда задерживается последовательность *как единое целое*, но когда элементы поступают, то поступают все вместе:

```
Task<IEnumerable<T>>
```

Чтобы сгенерировать асинхронный поток, необходимо написать метод, в котором объединены принципы итераторов и асинхронных методов. Другими словами, метод должен включать и `yield return`, и `await`, а также возвращать `IAsyncEnumerable<T>`:

```
async IAsyncEnumerable<int> RangeAsync (
    int start, int count, int delay)
{
```

```

for (int i = start; i < start + count; i++)
{
    await Task.Delay (delay);
    yield return i;
}
}

```

Для применения асинхронного потока нужно использовать оператор `await foreach`:

```

await foreach (var number in RangeAsync (0, 10, 500))
    Console.WriteLine (number);

```

Обратите внимание, что данные поступают постоянно каждые 500 мс (или в реальности, когда они становятся доступными). Сравните это с похожей конструкцией, использующей `Task<IEnumerable<T>>`, для которой данные не возвращаются до тех пор, пока не будет доступной последняя порция данных:

```

static async Task<IEnumerable<int>> RangeTaskAsync (int start, int count,
                                                       int delay)
{
    List<int> data = new List<int>();
    for (int i = start; i < start + count; i++)
    {
        await Task.Delay (delay);
        data.Add (i);
    }
    return data;
}

```

А вот как использовать асинхронный поток посредством оператора `foreach`:

```

foreach (var data in await RangeTaskAsync(0, 10, 500))
    Console.WriteLine (data);

```

Запрашивание `IAsyncEnumerable<T>`

В NuGet-пакете `System.Linq.Async` определены операции LINQ, работающие с `IAsyncEnumerable<T>`, которые позволяют писать запросы во многом подобно тому, как делалось бы с применением `IEnumerable<T>`.

Например, мы можем написать запрос LINQ для метода `RangeAsync`, определенного в предыдущем разделе, следующим образом:

```

IAsyncEnumerable<int> query =
    from i in RangeAsync (0, 10, 500)
    where i % 2 == 0                                // Только четные числа.
    select i * 10;                                    // Умножить на 10.

await foreach (var number in query)
    Console.WriteLine (number);

```

В результате выводятся числа 0, 20, 40 и т.д.



Если вы знакомы с библиотекой Rx, то можете также извлечь преимущества из ее (более мощных) операций запросов, вызывая расширяющий метод `ToObservable`, который преобразует реализацию `IAsyncEnumerable<T>` в `IObservable<T>`. Кроме того, доступен расширяющий метод `ToAsyncEnumerable`, предназначенный для преобразования в обратном направлении.

`IAsyncEnumerable<T>` в ASP.NET Core

Действия контроллера ASP.NET Core теперь могут возвращать `IAsyncEnumerable<T>`. Такие методы должны быть помечены как `async`. Например:

```
[HttpGet]
public async IAsyncEnumerable<string> Get()
{
    using var dbContext = new BookContext();
    await foreach (var title in dbContext.Books
        .Select(b => b.Title)
        .AsAsyncEnumerable())
    {
        yield return title;
    }
}
```

Асинхронные методы в WinRT

В случае разработки приложений UWP вам придется иметь дело с типами WinRT, определенными в ОС. Эквивалентом `Task` в WinRT является тип `IAsyncAction`, а эквивалентом `Task<TResult>` — тип `IAsyncOperation<TResult>`. Для операций, которые сообщают о ходе работ, эквивалентами будут `IAsyncActionWithProgress<TProgress>` и `IAsyncOperationWithProgress<TResult, TProgress>`. Все они определены в пространстве имен `Windows.Foundation`.

Выполнять преобразование в тип `Task` или `Task<TResult>` либо из него можно с помощью расширяющего метода `AsTask`:

```
Task<StorageFile> fileTask = KnownFolders.DocumentsLibrary.CreateFileAsync
    ("test.txt") .AsTask();
```

Или же можно реализовать ожидание напрямую:

```
StorageFile file = await KnownFolders.DocumentsLibrary.CreateFileAsync
    ("test.txt");
```



Из-за ограничений системы типов СОМ интерфейсы `IAsyncActionWithProgress<TProgress>` и `IAsyncOperationWithProgress<TResult, TProgress>` не основаны на `IAsyncAction`, как можно было бы ожидать. Взамен оба интерфейса унаследованы от общего базового типа по имени `IAsyncInfo`.

Метод `AsTask` также перегружен для приема признака отмены (см. раздел “Отмена” далее в главе). Он также принимает объект `IProgress<T>`, когда соединяется в цепочку с вариантами `WithProgress` (см. раздел “Сообщение о ходе работ” далее в главе).

Асинхронность и контексты синхронизации

Ранее уже было показано, что наличие контекста синхронизации играет важную роль в смысле отправки признаков продолжения. В случае асинхронных функций, возвращающих `void`, существует пара других, более тонких способов взаимодействия с контекстами синхронизации. Они являются не прямым результатом расширений, производимых компилятором C#, а функцией типов `AsyncMethodBuilder` из пространства имен `System.CompilerServices`, которое компилятор использует при расширении асинхронных функций.

Отправка исключений

В обогащенных клиентских приложениях общепринято полагаться на событие централизованной обработки исключений (`Application.DispatcherUnhandledException` в WPF) для учета необработанных исключений, сгенерированных в потоке пользовательского интерфейса. В приложениях ASP.NET Core похожую работу делает специальный фильтр `ExceptionFilterAttribute` в методе `ConfigureServices` из `Startup.cs`. Внутренне они функционируют, инициируя события пользовательского интерфейса (или конвейера методов обработки страниц в случае ASP.NET Core) в собственном блоке `try/catch`.

Асинхронные функции верхнего уровня затрудняют это. Рассмотрим следующий обработчик события щелчка на кнопке:

```
async void ButtonClick (object sender, RoutedEventArgs args)
{
    await Task.Delay(1000);
    throw new Exception ("Will this be ignored?"); //Будет ли это проигнорировано?
}
```

Когда на кнопке осуществляется щелчок и обработчик событий запускается, после оператора `await` управление обычно возвращается в цикл сообщений, и сгенерированное секунду спустя исключение не может быть перехвачено блоком `catch` в цикле сообщений.

Чтобы устранить проблему, структура `AsyncVoidMethodBuilder` перехватывает необработанные исключения (в асинхронных функциях, возвращающих `void`) и отправляет их контексту синхронизации, если он присутствует, гарантируя то, что события глобальной обработки исключений по-прежнему инициируются.



Компилятор применяет упомянутую логику только к асинхронным функциям, возвращающим `void`. Следовательно, если изменить `ButtonClick` для возвращения типа `Task` вместо `void`, тогда необработанное исключение приведет к отказу результирующей задачи, поскольку ему некуда больше двигаться (в результате давая *необнаруженнное исключение*).

Интересный нюанс связан с тем, что нет никакой разницы, где генерируется исключение — до или после `await`. Таким образом, в следующем примере исключение отправляется контексту синхронизации (если он существует), но не вызывающему коду:

```
async void Foo() { throw null; await Task.Delay(1000); }
```

(При отсутствии контекста синхронизации исключение будет распространяться в пуле потоков и приведет к завершению работы приложения.)

Причина, по которой исключение не возвращается обратно вызывающему компоненту, связана с обеспечением предсказуемости и согласованности. В следующем примере исключение `InvalidOperationException` всегда будет иметь один и тот же эффект отказа результирующей задачи независимо от того, как выглядит какое-то-Условие:

```
async Task Foo()
{
    if (какое-то-Условие) await Task.Delay (100);
    throw new InvalidOperationException();
}
```

Итераторы работают аналогично:

```
IEnumerable<int> Foo() { throw null; yield return 123; }
```

В приведенном примере исключение никогда не возвращается прямо вызывающему коду: с исключением имеет дело только перечисляемая последовательность.

OperationStarted и OperationCompleted

Если контекст синхронизации присутствует, то асинхронные функции, возвращающие `void`, также вызывают его метод `OperationStarted` при входе в функцию и метод `OperationCompleted`, когда функция завершается.

Переопределение таких методов удобно при написании специального контекста синхронизации для проведения модульного тестирования асинхронных методов, возвращающих `void`. Данная тема обсуждается в блоге, посвященном параллельному программированию в .NET (<https://devblogs.microsoft.com/pfxteam>).

Оптимизация

Синхронное завершение

Возврат из асинхронной функции может произойти *перед* организацией ожидания. Рассмотрим следующий метод, который обеспечивает кеширование в процессе загрузки веб-страниц:

```
static Dictionary<string, string> _cache = new Dictionary<string, string>();
async Task<string> GetWebPageAsync (string uri)
{
    string html;
    if (_cache.TryGetValue (uri, out html)) return html;
    return _cache [uri] =
        await new WebClient ().DownloadStringTaskAsync (uri);
}
```

Если URI присутствует в кеше, тогда управление возвращается вызывающему коду безо всякого ожидания, и метод возвращает объект задачи, которая уже сигнализирована. Это называется **синхронным завершением**.

Когда производится ожидание синхронно завершенной задачи, управление не возвращается вызывающему коду и не переходит обратно через признак продолжения — взамен выполнение продолжается со следующего оператора. Компилятор реализует такую оптимизацию, проверяя свойство `IsCompleted` объекта ожидания; другими словами, всякий раз, когда производится ожидание:

```
Console.WriteLine (await GetWebPageAsync ("http://oreilly.com"));
```

компилятор выпускает код для короткого замыкания продолжения в случае синхронного завершения:

```
var awaiter = GetWebPageAsync ().GetAwaiter ();
if (awaiter.IsCompleted)
    Console.WriteLine (awaiter.Result);
else
    awaiter.OnCompleted (() => Console.WriteLine (awaiter.Result));
```



Ожидание асинхронной функции, которая завершается синхронно, все равно связано с (крайне) небольшими накладными расходами — примерно 20 нс на современных компьютерах.

Напротив, переход в пул потоков вызывает переключение контекста — возможно одну или две микросекунды, а переход в цикл обработки сообщений пользовательского интерфейса — минимум в десять раз больше (и еще больше, если пользовательский интерфейс занят).

Вполне законно даже писать асинхронные методы, для которых *никогда* не производится ожидание, хотя компилятор генерирует предупреждение:

```
async Task<string> Foo () { return "abc"; }
```

Такие методы могут быть полезны при переопределении виртуальных/абстрактных методов, если случится так, что ваша реализация не потребует асинхронности. (Примером могут служить методы `ReadAsStringAsync`/`WriteAsStringAsync` класса `MemoryStream`, которые рассматриваются в главе 15.) Другой способ достичь того же результата предусматривает применение метода `Task.FromResult`, который возвращает уже сигнализированную задачу:

```
Task<string> Foo () { return Task.FromResult ("abc"); }
```

Если наш метод `GetWebPageAsync` вызывается из потока пользовательского интерфейса, то он является неявно безопасным к потокам в смысле том, что его можно было бы вызвать несколько раз подряд (инициируя тем самым множество параллельных загрузок) без необходимости в каком-либо блокировании с целью защиты кеша. Однако если бы последовательность обращений относилась к одному и тому же URI, то инициировалось бы множество избыточных загрузок, которые все в конечном итоге обновляли бы одну и ту же запись в кеше (в выигрыше окажется последняя загрузка). Хоть это и не ошибка, но более эффективно было бы сделать так, чтобы последующие обращения к тому же самому URI взамен (асинхронно) ожидали результата выполняющегося запроса.

Существует простой способ достичь указанной цели, не прибегая к блокировкам или сигнализирующими конструкциям.

Вместо кеша строк мы создаем кеш “будущего” (`Task<string>`):

```
static Dictionary<string, Task<string>> _cache =
    new Dictionary<string, Task<string>>();
Task<string> GetWebPageAsync (string uri)
{
    if (_cache.TryGetValue (uri, out var downloadTask)) return downloadTask;
    return _cache [uri] = new WebClient ().DownloadStringTaskAsync (uri);
}
```

(Обратите внимание, что мы не помечаем метод как `async`, поскольку напрямую возвращаем объект задачи, полученный в результате вызова метода класса `WebClient`.)

Теперь при повторяющихся вызовах метода `GetWebPageAsync` с тем же самым URI мы гарантируем получение одного и того же объекта `Task<string>`. (Это обеспечивает и дополнительное преимущество минимизации нагрузки на сборщик мусора.) И если задача завершена, то ожидание не требует больших затрат благодаря описанной выше оптимизации, которую предпринимает компилятор.

Мы могли бы и дальше расширять пример, чтобы сделать его безопасным к потокам без защиты со стороны контекста синхронизации, для чего необходимо блокировать все тело метода:

```
lock (_cache)
    if (_cache.TryGetValue (uri, out var downloadTask))
        return downloadTask;
    else
        return _cache [uri] = new WebClient ().DownloadStringTaskAsync (uri);
}
```

Код работает из-за того, что мы производим блокировку не на время загрузки страницы (это нанесло бы ущерб параллелизму), а в течение небольшого промежутка времени, пока проверяется кеш и при необходимости запускается новая задача, которая обновляет кеш.

ValueTask<T>



Тип `ValueTask<T>` предназначен для сценариев микрооптимизации и вам, возможно, никогда не придется писать методы, которые возвращают этот тип. Тем не менее, все равно нужно знать об изложенных в следующем разделе мерах предосторожности, поскольку некоторые методы .NET возвращают `ValueTask<T>`, а `IAsyncEnumerable<T>` тоже его использует.

Мы только что описали, каким образом компилятор оптимизирует выражение `await` для синхронно завершающей задачи — путем замыкания накоротко продолжения и немедленного перехода к следующему оператору. Если синхронное завершение происходит из-за кеширования, то мы выяснили, что кеширование самой задачи может дать элегантное и эффективное решение.

Однако кешировать задачу во всех сценариях синхронного завершения нецелесообразно. Иногда должна создаваться новая задача, что порождает (кро-

шечную) потенциальную неэффективность. Дело в том, что Task и Task<T> являются ссылочными типами, а потому создание их экземпляров требует выделения памяти в куче и последующей сборки мусора. Экстремальная форма оптимизации предусматривает написание кода без выделения памяти; другими словами, код не создает экземпляры каких-либо ссылочных типов, не увеличивая нагрузку на сборщик мусора. Для поддержки такого шаблона были введены структуры ValueTask и ValueTask<T>, которые компилятор разрешает помещать вместо Task и Task<T>:

```
async ValueTask<int> Foo() { ... }
```

Ожидание ValueTask<T> свободно от выделения памяти, если операция завершается синхронно:

```
int answer = await Foo(); // (Потенциально) свободно от выделения памяти
```

Если операция не завершается синхронно, тогда ValueTask<T> создает “за кулисами” обычный экземпляр Task<T> (которому передает ожидание) и никакого преимущества не достигается.

Экземпляр ValueTask<T> можно преобразовать в обычный экземпляр Task<T>, вызвав метод AsTask.

Кроме того, существует необобщенная версия — ValueTask, которая похожа на Task.

Меры предосторожности при использовании ValueTask<T>

Тип ValueTask<T> относительно необычен в том, что он определен как структура исключительно по соображениям производительности. Таким образом, он обременен неподходящей семантикой типа значения, что может приводить к неожиданностям. Чтобы избежать некорректного поведения, вы должны не допускать следующие действия:

- организовывать ожидание одного и того же экземпляра ValueTask<T> много раз;
- вызывать .GetAwaiter().GetResult(), когда операция не завершена.

Если вам необходимо выполнить указанные действия, тогда вызовите .AsTask() и работайте с результирующим экземпляром Task.



Избежать описанных ловушек проще всего, применяя await напрямую к вызову метода, например:

```
await Foo(); // Безопасно
```

Дверь к ошибочному поведению открывается, когда вы присваиваете значение задачи ValueTask какой-то переменной:

```
ValueTask<int> valueTask = Foo(); // Осторожно!
```

// Использование переменной valueTask теперь может приводить к ошибкам

что можно смягчить, преобразуя непосредственно в обычновенную задачу:

```
Task<int> task = Foo().AsTask(); // Безопасно  
// С переменной task работать безопасно.
```

Избегание чрезмерных возвратов

В методах, которые многократно вызываются в цикле, можно избежать накладных расходов, связанных с повторяющимся возвратом в цикл сообщений пользовательского интерфейса, за счет вызова метода `ConfigureAwaitAwait`. В результате задача не передает признаки продолжения контексту синхронизации, сокращая накладные расходы до затрат на переключение контекста (или намного меньших, если метод, для которого осуществляется ожидание, завершается синхронно):

```
async void A() { ... await B(); ... }

async Task B()
{
    for (int i = 0; i < 1000; i++)
        await C().ConfigureAwait(false);
}

async Task C() { ... }
```

Это означает, что для методов `B` и `C` мы аннулируем простую модель безопасности к потокам в приложениях с пользовательским интерфейсом, согласно которой код выполняется в потоке пользовательского интерфейса и может быть вытеснен только во время выполнения оператора `await`. Однако метод `A` не затрагивается и останется в потоке пользовательского интерфейса, если он в нем был запущен.

Такая оптимизация особенно уместна при написании библиотек: преимущество упрощенной безопасности потоков не требуется, потому что код библиотеки обычно не использует совместно состояние с вызывающим кодом и не обращается к элементам управления пользовательского интерфейса. (В приведенном выше примере также имеет смысл реализовать синхронное завершение метода `C`, если известно, что операция, скорее всего, окажется кратковременной.)

Асинхронные шаблоны

Отмена

Часто важно иметь возможность отмены параллельной операции после ее запуска, скажем, в ответ на пользовательский запрос. Реализовать это проще всего с помощью флага отмены, который можно было бы инкапсулировать в классе следующего вида:

```
class CancellationToken
{
    public bool IsCancellationRequested { get; private set; }
    public void Cancel() { IsCancellationRequested = true; }
    public void ThrowIfCancellationRequested()
    {
        if (IsCancellationRequested)
            throw new OperationCanceledException();
    }
}
```

Затем можно было бы написать асинхронный метод с возможностью отмены:

```
async Task Foo (CancellationToken cancellationToken)
{
    for (int i = 0; i < 10; i++)
    {
        Console.WriteLine (i);
        await Task.Delay (1000);
        cancellationToken.ThrowIfCancellationRequested();
    }
}
```

Когда вызывающий код желает отменить операцию, он обращается к методу Cancel признака отмены, который передается в метод Foo. В результате IsCancellationRequested устанавливается в true, что через короткий промежуток времени приводит к отказу метода Foo с генерацией исключения OperationCanceledException (предопределенный в пространстве имен System класс, который предназначен для данной цели).

Если оставить в стороне безопасность к потокам (мы должны блокировать чтение/запись в IsCancellationRequested), то такой шаблон вполне эффективен, и среда CLR предлагает тип по имени CancellationToken, который очень похож на только что рассмотренный тип. Тем не менее, в нем отсутствует метод Cancel; этот метод открыт в другом типе — CancellationTokenSource. Подобное разделение обеспечивает определенную безопасность: метод, который имеет доступ только к объекту CancellationToken, может проверять, но не инициировать отмену.

Чтобы получить признак отмены, сначала необходимо создать экземпляр CancellationTokenSource:

```
var cancelSource = new CancellationTokenSource();
```

После этого станет доступным свойство Token, которое возвращает объект CancellationToken. В итоге вызвать наш метод Foo можно было бы следующим образом:

```
var cancelSource = new CancellationTokenSource();
Task foo = Foo (cancelSource.Token);
...
... (в какой-то момент позже)
cancelSource.Cancel();
```

Признак отмены поддерживает большинство асинхронных методов в CLR, включая Delay. Если модифицировать метод Foo так, чтобы он передавал свой признак отмены методу Delay, то задача будет завершаться немедленно по запросу (а не секунду спустя):

```
async Task Foo (CancellationToken cancellationToken)
{
    for (int i = 0; i < 10; i++)
    {
        Console.WriteLine (i);
        await Task.Delay (1000, cancellationToken);
    }
}
```

Обратите внимание, что нам больше не понадобится вызывать метод `ThrowIfCancellationRequested`, поскольку это делает `Task.Delay`. Признаки отмены normally распространяются вниз по стеку вызовов (так же как запросы отмены каскадным образом продвигаются *вверх* по стеку вызовов посредством исключений).



UWP полагается на типы WinRT, чьи асинхронные методы при отмене следуют низкоуровневому протоколу, согласно которому вместо принятия `CancellationToken` тип `IAsyncInfo` открывает доступ к методу `Cancel`. Однако метод `AsTaskExtension` перегружен для приема признака отмены, ликвидируя данный разрыв.

Синхронные методы также могут поддерживать отмену (как делает метод `Wait` класса `Task`). В таких случаях инструкция для отмены должна будет поступать асинхронно (скажем, из другой задачи). Например:

```
var cancelSource = new CancellationTokenSource();
Task.Delay(5000).ContinueWith(ant => cancelSource.Cancel());
...
```

В действительности при конструировании `CancellationTokenSource` можно указывать временной интервал, чтобы инициировать отмену по его прошествии (как только что было продемонстрировано). Прием удобен для реализации тайм-аутов, как синхронных, так и асинхронных:

```
var cancelSource = new CancellationTokenSource(5000);
try { await Foo(cancelSource.Token); }
catch(OperationCanceledException ex) { Console.WriteLine("Cancelled"); }
```

Структура `CancellationToken` предоставляет метод `Register`, позволяющий зарегистрировать делегат обратного вызова, который будет запущен при отмене; он возвращает объект, который можно освободить с целью отмены регистрации.

Задачи, генерируемые асинхронными функциями компилятора, автоматически входят в состояние отмены при появлении необработанного исключения `OperationCanceledException` (свойство `IsCanceled` возвращает `true`, а свойство `IsFaulted` — `false`). То же самое происходит и в случае задач, созданных с помощью метода `Task.Run`, конструктору которых передается (тот же признак) `CancellationToken`. Отличие между отказавшей и отмененной задачей в асинхронных сценариях не является важным, т.к. обе они генерируют исключение `OperationCanceledException` во время ожидания; это играет роль в расширенных сценариях параллельного программирования (особенно при условном продолжении). Мы обсудим данную тему в разделе “Отмена задач” главы 22.

Сообщение о ходе работ

Временами желательно, чтобы асинхронная операция во время выполнения сообщала о ходе работ. Простое решение заключается в передаче асинхронному методу делегата `Action`, который запускается всякий раз, когда состояние хода работ меняется:

```

Task Foo (Action<int> onProgressPercentChanged)
{
    return Task.Run (() =>
    {
        for (int i = 0; i < 1000; i++)
        {
            if (i % 10 == 0) onProgressPercentChanged (i / 10);
            // Делать что-нибудь, требующее интенсивных вычислений...
        }
    });
}

```

Вот как его можно вызывать:

```

Action<int> progress = i => Console.WriteLine (i + " %");
await Foo (progress);

```

Хотя такой прием нормально работает в консольном приложении, он не идеален в сценариях обогащенных клиентов, поскольку сообщает о ходе работ из рабочего потока, вызывая потенциальные проблемы с безопасностью к потокам у потребителя. (Фактически мы позволяем побочному эффекту от параллелизма “просочиться” во внешний мир, что нежелательно, т.к. в противном случае метод изолируется, если он вызван в потоке пользовательского интерфейса.)

IProgress<T> и Progress<T>

Для решения описанной выше проблемы среда CLR предлагает пару типов: интерфейс `IProgress<T>` и класс `Progress<T>`, который реализует этот интерфейс. В действительности они предназначены для того, чтобы служить оболочкой делегата, позволяя приложениям с пользовательским интерфейсом безопасно сообщать о ходе работ через контекст синхронизации.

Интерфейс `IProgress<T>` определяет только один метод:

```

public interface IProgress<in T>
{
    void Report (T value);
}

```

Использовать интерфейс `IProgress<T>` легко; наш метод почти не изменяется:

```

Task Foo (IProgress<int> onProgressPercentChanged)
{
    return Task.Run (() =>
    {
        for (int i = 0; i < 1000; i++)
        {
            if (i % 10 == 0) onProgressPercentChanged.Report (i / 10);
            // Делать что-нибудь, требующее интенсивных вычислений...
        }
    });
}

```

Класс `Progress<T>` имеет конструктор, принимающий делегат типа `Action<T>`, который помещается в оболочку:

```

var progress = new Progress<int> (i => Console.WriteLine (i + " %"));
await Foo (progress);

```

(В классе `Progress<T>` также определено событие `ProgressChanged`, на которое можно подписаться вместо передачи делегата `Action` конструктору (или в дополнение к ней).) После создания экземпляра `Progress<int>` захватывается контекст синхронизации, если он существует. Когда метод `Foo` затем обращается к `Report`, делегат вызывается через упомянутый контекст.

Асинхронные методы могут реализовать более сложное сообщение о ходе работ путем замены `int` специальным типом, открывающим доступ к набору свойств.



Если вы знакомы с библиотекой Rx, то заметите, что интерфейс `IProgress<T>` вместе с типом задачи, возвращаемым асинхронной функцией, предоставляют набор средств, который подобен такому набору, предлагаемому интерфейсом `IObserver<T>`. Отличие в том, что тип задачи может открывать доступ к “финальному” возвращаемому значению *в дополнение к значениям (других типов)*, выдаваемым интерфейсом `IProgress<T>`.

Значения, выдаваемые `IProgress<T>`, обычно являются “одноразовыми” (скажем, процент выполненной работы или количество загруженных байтов), тогда как значения, возвращаемые методом `MoveNext` интерфейса `IObserver<T>`, обычно содержат в себе сам результат и поэтому существует веская причина для его вызова.

Асинхронные методы в WinRT также поддерживают возможность сообщения о ходе работ, хотя применяемый протокол сложнее из-за (относительно) слабой системы типов COM. Взамен приема объекта, реализующего `IProgress<T>`, асинхронные методы WinRT, которые сообщают о ходе работ, возвращают вместо `IAsyncAction` и `IAsyncOperation<TResult>` один из следующих интерфейсов:

```
IAsyncActionWithProgress<TProgress>
IAsyncOperationWithProgress<TResult, TProgress>
```

Интересно отметить, что оба интерфейса основаны на `IAsyncInfo` (не на `IAsyncAction` и `IAsyncOperation<TResult>`).

Хорошая новость в том, что расширяющий метод `AsTask` тоже перегружен, чтобы принимать `IProgress<T>` для вышеупомянутых интерфейсов, поэтому потребители .NET могут игнорировать интерфейсы COM и поступать так, как показано ниже:

```
var progress = new Progress<int> (i => Console.WriteLine (i + " %"));
CancellationToken cancelToken = ...
var task = someWinRTobject.FooAsync().AsTask (cancelToken, progress);
```

Асинхронный шаблон, основанный на задачах

В .NET доступны сотни асинхронных методов, возвращающих задачи, к которым можно применять `await` (они относятся главным образом к вводу-выводу). Большинство таких методов (по крайней мере, частично) следуют шаблону, который называется *асинхронным шаблоном, основанным на задачах* (`Task-Based`

Asynchronous Pattern — ТАР), и представляет собой практическую формализацию всего того, что было описано до настоящего момента. Метод ТАР обладает следующими характеристиками:

- возвращает “горячий” (выполняющийся) экземпляр Task или Task<TResult>;
- имеет суффикс Async (за исключением специальных случаев, таких как комбинаторы задач);
- перегружен для приема признака отмены и/или IProgress<T>, если он поддерживает отмену и/или сообщение о ходе работ;
- быстро возвращает управление вызывающему коду (имеет только небольшую начальную синхронную фазу);
- не связывает поток, если является интенсивным в плане ввода-вывода.

Как видите, методы ТАР легко писать с использованием асинхронных функций C#.

Комбинаторы задач

Важным последствием наличия согласованного протокола для асинхронных функций (в соответствии с которым они возвращают объекты задач) является возможность применения и написания **комбинаторов задач** — функций, которые удобно объединяют задачи, не принимая во внимание то, что конкретно делает та или иная задача.

Среда CLR включает два комбинатора задач: Task.WhenAny и Task.WhenAll. При их описании мы будем предполагать, что определены следующие методы:

```
async Task<int> Delay1() { await Task.Delay (1000); return 1; }
async Task<int> Delay2() { await Task.Delay (2000); return 2; }
async Task<int> Delay3() { await Task.Delay (3000); return 3; }
```

WhenAny

Метод Task.WhenAny возвращает объект задачи, которая завершается при завершении любой задачи из набора. В следующем примере задача завершается через одну секунду:

```
Task<int> winningTask = await Task.WhenAny (Delay1(), Delay2(), Delay3());
Console.WriteLine ("Done");
Console.WriteLine (winningTask.Result); // 1
```

Поскольку метод Task.WhenAny сам возвращает объект задачи, мы применяем к его вызову await, что дает в итоге задачу, завершающуюся первой. Приведенный пример является полностью неблокирующими — включая последнюю строку, где производится доступ к свойству Result (т.к. задача winningTask уже будет завершена). Несмотря на это, обычно лучше применять await к winningTask:

```
Console.WriteLine (await winningTask); // 1
```

потому что тогда любое исключение генерируется повторно без помещения в оболочку AggregateException.

На самом деле оба `await` могут находиться в одном операторе:

```
int answer = await await Task.WhenAny (Delay1(), Delay2(), Delay3());
```

Если какая-то из задач кроме завершившейся первой впоследствии откажет, то исключение окажется необнаруженным, если только для объекта задачи не будет организовано ожидание посредством `await` (или не будет произведен доступ к его свойству `Exception`).

Метод `WhenAny` удобен для применения тайм-аутов или отмены к операциям, которые иначе подобное не поддерживают:

```
Task<string> task = SomeAsyncFunc();
Task winner = await (Task.WhenAny (task, Task.Delay(5000)));
if (winner != task) throw new TimeoutException();
string result = await task;    // Извлечь результат или повторно
                                // сгенерировать исключение
```

Обратите внимание, что поскольку в данном случае метод `WhenAny` вызывается с задачами разных типов, выигравшая задача возвращается как простой объект типа `Task` (а не `Task<string>`).

WhenAll

Метод `Task.WhenAll` возвращает объект задачи, которая завершается, когда завершены *все* переданные ему задачи. В следующем примере задача завершается через три секунды (и демонстрируется шаблон *ветвления/присоединения* (`fork/join`)):

```
await Task.WhenAll (Delay1(), Delay2(), Delay3());
```

Похожий результат можно было бы получить без использования `WhenAll`, организовав ожидание `task1`, `task2` и `task3` по очереди:

```
Task task1 = Delay1(); task2 = Delay2(); task3 = Delay3();
await task1; await task2; await task3;
```

Отличие такого подхода (помимо меньшей эффективности из-за требования трех ожиданий вместо одного) связано с тем, что в случае отказа `task1` мы никогда не перейдем к ожиданию задач `task2/task3`, и любые их исключения останутся необнаруженными.

Напротив, метод `Task.WhenAll` не завершается до тех пор, пока не будут завершены все задачи — даже когда возникает отказ. При появлении нескольких отказов их исключения объединяются в экземпляр `AggregateException` задачи (именно здесь класс `AggregateException` становится действительно полезным, потому что вы должны быть заинтересованы в получении всех исключений). Тем не менее, ожидание комбинированной задачи обеспечивает генерацию только первого исключения, так что для просмотра всех исключений понадобится поступить следующим образом:

```
Task task1 = Task.Run (() => { throw null; } );
Task task2 = Task.Run (() => { throw null; } );
Task all = Task.WhenAll (task1, task2);
try { await all; }
```

```

catch
{
    Console.WriteLine (all.Exception.InnerExceptions.Count); // 2
}

```

Вызов `WhenAll` с задачами типа `Task<TResult>` возвращает `Task<TResult[]>`, предоставляя объединенные результаты всех задач. При ожидании все сводится к `TResult[]`:

```

Task<int> task1 = Task.Run (() => 1);
Task<int> task2 = Task.Run (() => 2);
int[] results = await Task.WhenAll (task1, task2); // { 1, 2 }

```

В качестве практического примера рассмотрим параллельную загрузку веб-страниц по нескольким URI с подсчетом их суммарной длины:

```

async Task<int> GetTotalSize (string[] uris)
{
    IEnumerable<Task<byte[]>> downloadTasks = uris.Select (uri =>
        new WebClient().DownloadDataTaskAsync (uri));
    byte[][] contents = await Task.WhenAll (downloadTasks);
    return contents.Sum (c => c.Length);
}

```

Однако здесь присутствует некоторая неэффективность, связанная с тем, что во время загрузки мы излишне удерживаем байтовый массив до тех пор, пока не будет завершена каждая задача. Было бы более эффективно сразу же после загрузки сворачивать байтовые массивы в их длины. Для этого очень удобно применять асинхронные лямбда-выражения, потому что нам необходимо передавать выражение `await` в операцию запроса `Select` из LINQ:

```

async Task<int> GetTotalSize (string[] uris)
{
    IEnumerable<Task<int>> downloadTasks = uris.Select (async uri =>
        (await new WebClient().DownloadDataTaskAsync (uri)).Length);
    int[] contentLengths = await Task.WhenAll (downloadTasks);
    return contentLengths.Sum();
}

```

Специальные комбинаторы

Временами удобно создавать собственные комбинаторы задач. Простейший “комбинатор” принимает одиночную задачу вроде приведенной ниже, что позволяет организовать ожидание любой задачи с использованием тайм-аута:

```

async static Task<TResult> WithTimeout<TResult> (this Task<TResult> task,
    TimeSpan timeout)
{
    Task winner = await Task.WhenAny (task, Task.Delay (timeout))
        .ConfigureAwait (false);
    if (winner != task) throw new TimeoutException();
    return await task.ConfigureAwait (false); // Извлечь результат или
                                                // повторно сгенерировать исключение
}

```

Поскольку это в значительной степени “библиотечный метод”, который не имеет доступа к внешнему совместно используемому состоянию, при ожидании мы используем `ConfigureAwait(false)`, чтобы избежать потенциального возврата в контекст синхронизации пользовательского интерфейса. Мы можем еще больше повысить эффективность, отменяя `Task.Delay`, когда задача завершается вовремя (что позволяет устраниить небольшие накладные расходы, связанные с таймером):

```
async static Task<TResult> WithTimeout<TResult> (this Task<TResult> task,
                                                    TimeSpan timeout)
{
    var cancelSource = new CancellationTokenSource();
    var delay = Task.Delay(timeout, cancelSource.Token);
    Task winner = await Task.WhenAny(task, delay).ConfigureAwait(false);
    if (winner == task)
        cancelSource.Cancel();
    else
        throw new TimeoutException();
    return await task.ConfigureAwait(false); // Извлечь результат или
                                              // повторно сгенерировать исключение
}
```

Следующий комбинатор позволяет “отменить” задачу посредством `CancellationToken`:

```
static Task<TResult> WithCancellation<TResult> (this Task<TResult> task,
                                                    CancellationToken cancellationToken)
{
    var tcs = new TaskCompletionSource<TResult>();
    var reg = cancellationToken.Register(() => tcs.TrySetCanceled());
    task.ContinueWith(ant =>
    {
        reg.Dispose();
        if (ant.IsCanceled)
            tcs.TrySetCanceled();
        else if (ant.IsFaulted)
            tcs.TrySetException(ant.Exception.InnerException);
        else
            tcs.TrySetResult(ant.Result);
    });
    return tcs.Task;
}
```

Комбинаторы задач могут оказаться сложными в написании, иногда требуя применения сигнализирующих конструкций, которые будут раскрыты в главе 21. На самом деле это хорошо, т.к. способствует вынесению сложности, связанной с параллелизмом, за пределы бизнес-логики и ее помещению в многократно используемые методы, которые могут быть протестированы в изоляции.

Следующий комбинатор работает подобно `WhenAll` за исключением того, что если любая из задач отказывает, то результирующая задача откажет немедленно:

```

async Task<TResult[]> WhenAllOrError<TResult>
    (params Task<TResult>[] tasks)
{
    var killJoy = new TaskCompletionSource<TResult[]>();
    foreach (var task in tasks)
        task.ContinueWith (ant =>
    {
        if (ant.IsCanceled)
            killJoy.TrySetCanceled();
        else if (ant.IsFaulted)
            killJoy.TrySetException (ant.Exception.InnerException);
    });
    return await await Task.WhenAny (killJoy.Task, Task.WhenAll (tasks))
        .ConfigureAwait (false);
}

```

Мы начинаем с создания экземпляра `TaskCompletionSource`, единственной работой которого является завершение всего в случае, если какая-то задача отказывает. Таким образом, мы никогда не вызываем его метод `SetResult`, а только методы `TrySetCanceled` и `TrySetException`. В данном случае метод `ContinueWith` более удобен, чем `GetAwaiter().OnCompleted`, потому что мы не обращаемся к результатам задач и в этой точке не хотим возврата в поток пользовательского интерфейса.

Асинхронное блокирование

В разделе “Асинхронные семафоры и блокировки” главы 21 будет описано, как использовать класс `SemaphoreSlim` для блокирования или ограничения параллелизма асинхронным образом.

Устаревшие шаблоны

В .NET задействованы и другие шаблоны асинхронности, которые применялись до появления задач и асинхронных функций. Теперь они редко востребованы, поскольку асинхронность на основе задач стала доминирующим шаблоном.

Модель асинхронного программирования

Самый старый шаблон назывался *моделью асинхронного программирования* (Asynchronous Programming Model — APM) и использовал пару методов, имена которых начинаются с `Begin` и `End`, а также интерфейс по имени `IAsyncResult`. В целях иллюстрации мы возьмем класс `Stream` из пространства имен `System.IO` и рассмотрим его метод `Read`. Вначале взглянем на синхронную версию:

```
public int Read (byte[] buffer, int offset, int size);
```

Вероятно, вы уже в состоянии предугадать, каким образом выглядит асинхронная версия на основе задач:

```
public Task<int> ReadAsync (byte[] buffer, int offset, int size);
```

Теперь давайте посмотрим на версию APM:

```
public IAsyncResult BeginRead (byte[] buffer, int offset, int size,
                               AsyncCallback callback, object state);
public int EndRead (IAsyncResult asyncResult);
```

Вызов метода BeginXXX инициирует операцию, возвращая объект IAsyncResult, который действует в качестве признака для асинхронной операции. Когда операция завершается (или отказывает), запускается делегат AsyncCallback:

```
public delegate void AsyncCallback (IAsyncResult ar);
```

Компонент, поддерживающий этот делегат, затем вызывает метод EndXXX, который предоставляет возвращаемое значение операции, а также повторно генерирует исключение, если операция потерпела неудачу.

Шаблон APM не только неудобен в применении, но также неожиданно сложен в плане корректной реализации. Проще всего иметь дело с методами APM, вызывая метод адаптера Task.Factory.FromAsync, который преобразует пару методов APM в объект Task. Внутренне он использует TaskCompletionSource, чтобы предоставить объект задачи, которой отправляется сигнал, когда операция APM завершается или отказывает.

Метод FromAsync требует передачи следующих параметров:

- делегат, указывающий метод BeginXXX;
- делегат, указывающий метод EndXXX;
- дополнительные аргументы, которые будут передаваться данным методам.

Метод FromAsync перегружен для приема типов делегатов и аргументов, которые соответствуют практически всем сигнатурам асинхронных методов, определенным в .NET. Например, исходя из предположения, что stream имеет тип Stream, а buffer — тип byte[], мы можем записать так:

```
Task<int> readChunk = Task<int>.Factory.FromAsync (
    stream.BeginRead, stream.EndRead, buffer, 0, 1000, null);
```

Асинхронный шаблон на основе событий

Асинхронный шаблон на основе событий (Event-Based Asynchronous Pattern — EAP) появился в 2005 году с целью предоставления более простой альтернативы шаблону APM, особенно в сценариях с пользовательским интерфейсом. Тем не менее, он был реализован лишь в небольшом количестве типов, наиболее примечательным из которых является WebClient в пространстве имен System.Net. Следует отметить, что EAP — это просто шаблон; никаких специальных типов для его поддержки не предусмотрено. По существу шаблон предусматривает то, что класс предлагает семейство членов, которые внутренне управляют параллелизмом, примерно как в показанном далее коде.

```
// Это члены класса WebClient:
public byte[] DownloadData (Uri address);           // Синхронная версия
public void DownloadDataAsync (Uri address);
```

```
public void DownloadDataAsync (Uri address, object userToken);
public event DownloadDataCompletedEventHandler DownloadDataCompleted;
public void CancelAsync (object userState); // Отменяет операцию
public bool IsBusy { get; } // Указывает, выполняется ли операция
```

Методы *Asyc инициируют выполнение операции асинхронным образом. Когда операция завершается, генерируется событие *Completed (с автоматической отправкой захваченному контексту синхронизации, если он имеется). Такое событие передает объект аргументов события, содержащий перечисленные ниже элементы:

- флаг, который указывает, была ли операция отменена (за счет вызова потребителем метода CancelAsync);
- объект Error, указывающий исключение, которое было сгенерировано (если было);
- объект userToken, если он предоставлялся при вызове метода *Asyc.

Типы EAP могут также определять событие сообщения о ходе работ, которое инициируется всякий раз, когда состояние хода работ изменяется (и вдобавок отправляется в контекст синхронизации):

```
public event DownloadProgressChangedEventHandler DownloadProgressChanged;
```

Реализация шаблона EAP требует написания большого объема стереотипного кода, делая этот шаблон неудобным с композиционной точки зрения.

BackgroundWorker

Универсальной реализацией шаблона EAP является класс BackgroundWorker из пространства имен System.ComponentModel. Он позволяет обогащенным клиентским приложениям запускать рабочий поток и сообщать о процентае выполненной работы без необходимости в явном захвате контекста синхронизации. Вот пример:

```
var worker = new BackgroundWorker { WorkerSupportsCancellation = true };
worker.DoWork += (sender, args) =>
{ // Выполняется в рабочем потоке
    if (args.Cancel) return;
    Thread.Sleep(1000);
    args.Result = 123;
};
worker.RunWorkerCompleted += (sender, args) =>
{ // Выполняется в потоке пользовательского интерфейса
    // Здесь можно безопасно обновлять элементы управления
    // пользовательского интерфейса...
    if (args.Cancelled)
        Console.WriteLine ("Cancelled"); // Отменено
    else if (args.Error != null)
        Console.WriteLine ("Error: " + args.Error.Message); // Ошибка
    else
        Console.WriteLine ("Result is: " + args.Result); // Результат
};
worker.RunWorkerAsync(); // Захватывает контекст синхронизации
// и запускает операцию
```

Метод RunWorkerAsync запускает операцию, инициируя событие DoWork в рабочем потоке из пула. Он также захватывает контекст синхронизации, и когда операция завершается (или отказывает), через данный контекст генерируется событие RunWorkerCompleted (подобно признаку продолжения).

Класс BackgroundWorker порождает крупномодульный параллелизм, при котором событие DoWork инициируется полностью в рабочем потоке. Если в этом обработчике событий нужно обновлять элементы управления пользовательского интерфейса (помимо отправки сообщения о проценте выполненных работ), тогда придется использовать Dispatcher.BeginInvoke или похожий метод.

Класс BackgroundWorker более подробно описан в статье по ссылке www.albahari.com/threading.



Потоки данных и ввод-вывод

В настоящей главе описаны фундаментальные типы, предназначенные для ввода и вывода в .NET, с акцентированием внимания на следующих темах:

- потоковая архитектура .NET и предоставление ею согласованного программного интерфейса для чтения и записи с применением разнообразных типов ввода-вывода;
- классы для манипулирования файлами и каталогами на диске;
- специализированные потоки для сжатия, именованные каналы и размещенные в памяти файлы.

Внимание в главе сконцентрировано на типах из пространства имен `System.IO`, где реализована функциональность ввода-вывода самого низкого уровня.

Потоковая архитектура

Потоковая архитектура .NET основана на трех концепциях: опорные хранилища, декораторы и адаптеры (рис. 15.1).

Опорное хранилище представляет собой конечную точку, которая делает ввод и вывод полезными, скажем, файл или сетевое подключение. Точнее, это один или оба следующих компонента:

- источник, с которого могут последовательно читаться байты;
- приемник, куда байты могут последовательно записываться.

Тем не менее, опорное хранилище не может использоваться, если программисту не открыт доступ к нему. Стандартным классом .NET, который предназначен для такой цели, является `Stream`; он предоставляет стандартный набор методов, позволяющих выполнять чтение, запись и позиционирование.

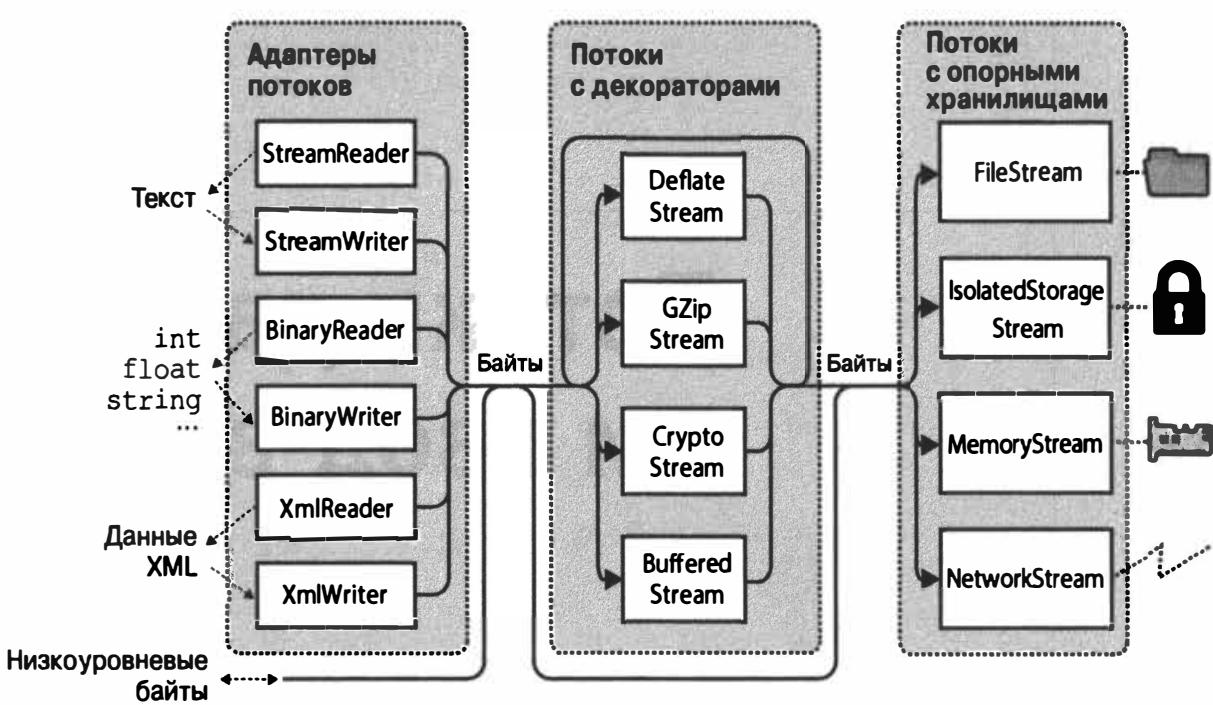


Рис. 15.1. Потоковая архитектура

Опорное хранилище представляет собой конечную точку, которая делает ввод и вывод полезными, скажем, файл или сетевое подключение. Точнее, это один или оба следующих компонента:

- источник, с которого могут последовательно читаться байты;
- приемник, куда байты могут последовательно записываться.

Тем не менее, опорное хранилище не может использоваться, если программисту не открыт доступ к нему. Стандартным классом .NET, который предназначен для такой цели, является `Stream`; он предоставляет стандартный набор методов, позволяющих выполнять чтение, запись и позиционирование. В отличие от массива, где все опорные данные существуют в памяти одновременно, поток имеет дело с данными последовательно — либо по одному байту за раз, либо в блоках управляемого размера. Следовательно, поток может потреблять мало памяти независимо от размера его опорного хранилища.

Потоки делятся на две категории.

- **Потоки с опорными хранилищами.** Потоки, которые жестко привязаны к определенному типу опорного хранилища, такие как `FileStream` или `NetworkStream`.
- **Потоки с декораторами.** Потоки, которые наполняют другие потоки, каким-то образом трансформируя данные, например, `DeflateStream` или `CryptoStream`.

Потоки с декораторами обладают перечисленными ниже архитектурными преимуществами:

- они освобождают потоки с опорными хранилищами от необходимости самостоятельной реализации таких возможностей, как сжатие и шифрование;
- потоки не страдают от изменения интерфейса, когда они декорированы;
- декораторы можно подключать во время выполнения;

- декораторы можно соединять в цепочки (скажем, декоратор сжатия можно соединить с декоратором шифрования).

Потоки с опорными хранилищами и потоки с декораторами имеют дело исключительно с байтами. Хотя это гибко и эффективно, приложения часто работают на более высоких уровнях, таких как текст или XML. Адаптеры преодолевают такой разрыв, помещая поток в оболочку класса со специализированными методами, которые типизированы для конкретного формата. Например, средство чтения текста открывает доступ к методу `ReadLine`, а средство записи XML — к методу `WriteAttributes`.



Адаптер помещает поток внутрь оболочки в точности как декоратор. Однако в отличие от декоратора адаптер *сам по себе не является потоком*; он обычно полностью скрывает байт-ориентированные методы.

Подведем итоги: потоки с опорными хранилищами предоставляют низкоуровневые данные; потоки с декораторами обеспечивают прозрачные двоичные трансформации вроде шифрования; адаптеры предлагают типизированные методы для работы с типами более высокого уровня, такими как строки и XML. Связи между ними были проиллюстрированы на рис. 15.1. Чтобы сформировать цепочку, необходимо просто передать один объект конструктору другого класса.

Использование потоков

Абстрактный класс `Stream` является базовым для всех потоков. В нем определены методы и свойства для трех фундаментальных операций: *чтение, запись и поиск*, а также для выполнения административных задач, подобных закрытию, сбросыванию и конфигурированию тайм-аутов (табл. 15.1).

Таблица 15.1. Члены класса Stream

Категория	Члены
Чтение	<code>public abstract bool CanRead { get; }</code> <code>public abstract int Read (byte[] buffer, int offset, int count)</code> <code>public virtual int ReadByte();</code>
Запись	<code>public abstract bool CanWrite { get; }</code> <code>public abstract void Write (byte[] buffer, int offset, int count);</code> <code>public virtual void WriteByte (byte value);</code>
Поиск	<code>public abstract bool CanSeek { get; }</code> <code>public abstract long Position { get; set; }</code> <code>public abstract void SetLength (long value);</code> <code>public abstract long Length { get; }</code> <code>public abstract long Seek (long offset, SeekOrigin origin);</code>
Закрытие/ сбросывание	<code>public virtual void Close();</code> <code>public void Dispose();</code> <code>public abstract void Flush();</code>
Тайм-ауты	<code>public virtual bool CanTimeout { get; }</code> <code>public virtual int ReadTimeout { get; set; }</code> <code>public virtual int WriteTimeout { get; set; }</code>
Другие	<code>public static readonly Stream Null; // Поток null</code> <code>public static Stream Synchronized (Stream stream);</code>

Доступны также асинхронные версии методов `Read` и `Write`, возвращающие объекты `Task` и дополнительно принимающие признак отмены, плюс перегруженные версии, работающие с типами `Span<T>` и `Memory<T>`, которые описаны в главе 23.

В следующем примере демонстрируется применение файлового потока для чтения, записи и позиционирования:

```
using System;
using System.IO;

// Создать файл по имени test.txt в текущем каталоге:
using (Stream s = new FileStream ("test.txt", FileMode.Create))
{
    Console.WriteLine (s.CanRead);           // True
    Console.WriteLine (s.CanWrite);          // True
    Console.WriteLine (s.CanSeek);           // True

    s.WriteByte (101);
    s.WriteByte (102);
    byte[] block = { 1, 2, 3, 4, 5 };
    s.Write (block, 0, block.Length);        // Записать блок из 5 байтов

    Console.WriteLine (s.Length);            // 7
    Console.WriteLine (s.Position);          // 7
    s.Position = 0;                         // Переместиться обратно в начало

    Console.WriteLine (s.ReadByte());         // 101
    Console.WriteLine (s.ReadByte());         // 102

    // Читать из потока в массив block:
    Console.WriteLine (s.Read (block, 0, block.Length));      // 5

    // Предполагая, что последний вызов Read возвратил 5,
    // мы находимся в конце файла, и Read теперь возвратит 0:
    Console.WriteLine (s.Read (block, 0, block.Length));      // 0
}
```

Асинхронное чтение или запись предусматривает просто вызов метода `ReadAsync`/`WriteAsync` вместо `Read`/`Write` и применение к выражению ключевого слова `await` (как объяснялось в главе 14, к вызываемому методу потребуется также добавить ключевое слово `async`):

```
async static void AsyncDemo()
{
    using (Stream s = new FileStream ("test.txt", FileMode.Create))
    {
        byte[] block = { 1, 2, 3, 4, 5 };
        await s.WriteAsync (block, 0, block.Length); // Выполнить запись
                                                    // асинхронно
        s.Position = 0;                          // Переместиться обратно в начало

        // Читать из потока в массив block:
        Console.WriteLine (await s.ReadAsync (block, 0, block.Length)); // 5
    }
}
```

Асинхронные методы упрощают построение отзывчивых и масштабируемых приложений, которые работают с потенциально медленными потоками данных (особенно сетевыми потоками), не связывая поток управления.



Для краткости мы будем использовать синхронные методы почти во всех примерах настоящей главы; тем не менее, в большинстве сценариев, связанных с сетевым вводом-выводом, мы рекомендуем отдавать предпочтение асинхронным операциям Read/Write.

Чтение и запись

Поток может поддерживать чтение, запись, а также то и другое. Если свойство CanWrite возвращает `false`, тогда поток предназначен только для чтения; если свойство CanRead возвращает `false`, то поток предназначен только для записи.

Метод `Read` получает блок данных из потока и помещает его в массив. Он возвращает количество полученных байтов, которое всегда либо меньше, либо равно значению аргумента `count`. Если оно меньше `count`, то это означает, что достигнут конец потока или поток выдает данные порциями меньшего размера (как часто случается с сетевыми потоками). В любом случае остаток байтов в массиве останется неизменным, сохраняя предыдущие значения.



При работе с методом `Read` можно определенно утверждать, что достигнут конец потока, только когда он возвращает 0. Таким образом, если есть поток из 1000 байтов, тогда следующий код может не прочитать их все в память:

```
// Предполагается, что s является потоком:  
byte[] data = new byte [1000];  
s.Read (data, 0, data.Length);
```

Метод `Read` мог бы прочитать от 1 до 1000 байтов, оставив остаток потока непрочитанным.

Вот корректный способ чтения потока из 1000 байтов:

```
byte[] data = new byte [1000];  
  
// Переменная bytesRead в итоге получит значение 1000,  
// если только сам поток не имеет меньшую длину:  
  
int bytesRead = 0;  
int chunkSize = 1;  
while (bytesRead < data.Length && chunkSize > 0)  
    bytesRead +=  
        chunkSize = s.Read (data, bytesRead, data.Length - bytesRead);
```

Чтобы упростить решение этой задачи, в .NET 7 класс `Stream` включает вспомогательные методы `ReadExactly` и `ReadAtLeast` (а также асинхронные версии каждого из них). Следующий код читает в точности 1000 байтов из потока (генерируя исключение, если поток заканчивается раньше):

```
byte[] data = new byte [1000];  
s.ReadExactly (data); // Прочитать в точности 1000 байтов
```

Последняя строка эквивалентна следующей строке:

```
s.ReadExactly (data, offset:0, count:1000);
```



Тип `BinaryReader` предлагает более простой способ для достижения того же самого результата:

```
byte[] data = new BinaryReader (s).ReadBytes (1000);
```

Если поток имеет длину меньше 1000 байтов, то возвращенный байтовый массив отражает действительный размер потока. Если поток поддерживает поиск, тогда можно прочитать все его содержимое, заменив 1000 выражением `(int)s.Length`.

Мы более подробно опишем тип `BinaryReader` в разделе “АдAPTERЫ ПОТОКОВ” далее в главе.

Метод `ReadByte` проще: он читает одиночный байт, возвращая `-1` для указания на конец массива. На самом деле `ReadByte` возвращает значение типа `int`, а не `byte`, т.к. `-1` типом `byte` не поддерживается.

Методы `Write` и `WriteByte` отправляют данные в поток. Если они не могут отправить указанные байты, то генерируется исключение.



В методах `Read` и `Write` аргумент `offset` ссылается на индекс в массиве `buffer`, с которого начинается чтение или запись, а не на позицию внутри потока.

Поиск

Поток поддерживает возможность позиционирования, если свойство `CanSeek` возвращает `true`. Для потока с возможностью позиционирования (такого как файловый поток) можно запрашивать или модифицировать его свойство `Length` (вызывая метод `SetLength`) и в любой момент изменять свойство `Position`, отражающее позицию, в которой производится чтение или запись. Свойство `Position` принимает значения относительно начала потока; однако метод `Seek` позволяет перемещаться относительно текущей позиции либо относительно конца потока.



Изменение свойства `Position` экземпляра `FileStream` обычно занимает несколько микросекунд. Если вам нужно делать это миллионы раз в цикле, тогда класс `MemoryMappedFile` может оказаться более удачным выбором, чем `FileStream` (как показано в разделе “Размещенные в памяти файлы” далее в главе).

Единственный способ определения длины потока, не поддерживающего возможность позиционирования (вроде потока с шифрованием), заключается в его чтении до самого конца. Более того, если требуется повторно прочитать предшествующую область, то поток придется закрыть и начать работу с новым потоком.

Закрытие и сбрасывание

После применения потоки должны быть освобождены, чтобы освободить лежащие в их основе ресурсы, подобные файловым и сокетным дескрипторам. Самый простой способ предусматривает создание экземпляров потоков внутри блоков `using`. В общем случае потоки поддерживают следующую стандартную семантику освобождения:

- методы `Dispose` и `Close` функционируют идентично;
- многократное освобождение или закрытие потока не вызывает ошибки.

Закрытие потока с декоратором приводит к закрытию и декоратора, и его потока с опорным хранилищем. В случае цепочки декораторов закрытие самого внешнего декоратора (в голове цепочки) закрывает всю цепочку.

Некоторые потоки внутренне буферизируют данные, поступающие в и из опорного хранилища, чтобы снизить количество двухсторонних обменов и тем самым улучшить производительность (хорошим примером служат файловые потоки). Это значит, что данные, записываемые в поток, могут не сразу попасть в опорное хранилище; возможна задержка до тех пор, пока буфер не заполнится. Метод `Flush` обеспечивает принудительную запись любых буферизированных данных. Метод `Flush` вызывается автоматически при закрытии потока, поэтому поступать так, как показано ниже, никогда не придется:

```
s.Flush(); s.Close();
```

Тайм-ауты

Поток поддерживает тайм-ауты чтения и записи, если свойство `CanTimeout` возвращает `true`. Сетевые потоки поддерживают тайм-ауты, а файловые потоки и потоки в памяти — нет. Для потоков, поддерживающих тайм-ауты, свойства `ReadTimeout` и `WriteTimeout` задают желаемый тайм-аут в миллисекундах, причем 0 означает отсутствие тайм-аута. Методы `Read` и `Write` указывают на то, что тайм-аут произошел, генерацией исключения.

Асинхронные методы `ReadAsync/WriteAsync` не поддерживают тайм-ауты; взамен этим методам можно передавать признак отмены.

Безопасность в отношении потоков управления

Как правило, потоки данных не являются безопасными в отношении потоков управления, т.е. два потока управления не могут параллельно выполнять чтение или запись в один и тот же поток данных, не создавая возможность для ошибки. Класс `Stream` предлагает простой обходной путь через статический метод `Synchronized`, который принимает поток данных любого типа и возвращает оболочку, безопасную к потокам управления. Такая оболочка работает за счет получения монопольной блокировки на каждой операции чтения, записи или позиционирования, гарантируя, что в любой момент времени заданную операцию может выполнять только один поток управления. На практике это позволяет множеству потоков управления одновременно дописывать данные в один и тот же поток данных — другие разновидности действий (подобные параллельному чтению) требуют дополнительной блокировки, обеспечивающей доступ каж-

дого потока управления к желаемой части потока данных. Вопросы безопасности в отношении потоков управления подробно обсуждаются в главе 21.



Начиная с версии .NET 6, можно использовать класс RandomAccess для выполнения безопасных к потокам файловых операций ввода-вывода. Класс RandomAccess также позволяет передавать несколько буферов для улучшения показателей производительности.

Потоки с опорными хранилищами

На рис. 15.2 показаны основные потоки с опорными хранилищами, предлагаемые .NET. “Поток null” также доступен через статическое поле Null класса Stream. Потоки null могут быть удобны при написании модульных тестов.

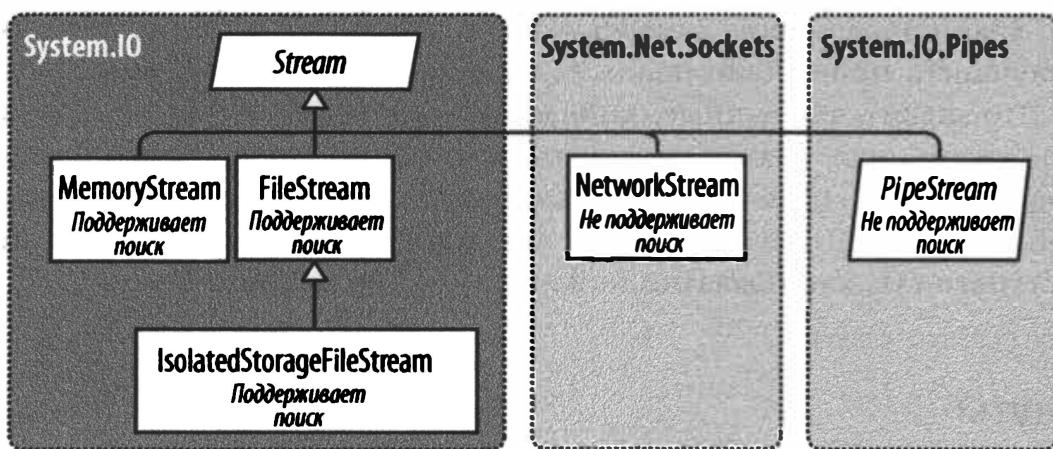


Рис. 15.2. Основные потоки с опорными хранилищами

В последующих разделах мы опишем классы FileStream и MemoryStream, а в финальном разделе настоящей главы — класс IsolatedStorageStream. Класс NetworkStream будет раскрыт в главе 16.

FileStream

Ранее в разделе мы демонстрировали базовое использование класса FileStream для чтения и записи байтов данных. Теперь мы рассмотрим специальные возможности этого класса.



Если вы все еще пользуетесь UWP, тогда файловый ввод-вывод лучше выполнять с помощью типов из пространства имен Windows.Storage (см. дополнительные материалы, доступные на веб-сайте издательства).

Конструирование экземпляра FileStream

Простейший способ создания экземпляра FileStream предполагает использование следующих статических фасадных методов класса File:

```
FileStream fs1 = File.OpenRead ("readme.bin");           // Только для чтения
FileStream fs2 = File.OpenWrite ("writeme.tmp");          // Только для записи
FileStream fs3 = File.Create    ("readwrite.tmp");        // Для чтения и записи
```

Поведение методов `OpenWrite` и `Create` отличается в ситуации, когда файл уже существует. Метод `Create` усекает любое имеющееся содержимое, а метод `OpenWrite` оставляет содержимое незатронутым, устанавливая позицию потока в ноль. Если будет записано меньше байтов, чем ранее существовало в файле, то метод `OpenWrite` оставит смесь старого и нового содержимого.

Создавать экземпляры `FileStream` можно также напрямую. Конструкторы класса `FileStream` предоставляют доступ ко всем средствам, позволяя указывать имя файла или низкоуровневый файловый дескриптор, режимы создания и доступа к файлу, а также параметры для совместного использования, буферизации и безопасности. Приведенный ниже оператор открывает существующий файл для чтения/записи, не перезаписывая его (ключевое слово `using` гарантирует освобождение, когда `fs` покидает область видимости):

```
using var fs = new FileStream ("readwrite.tmp", FileMode.Open);
```

Вскоре мы более подробно рассмотрим перечисление `FileMode`.

Сокращенные методы класса `File`

Следующие статические методы читают целый файл в память за один шаг:

- `File.ReadAllText` (возвращает строку);
- `File.ReadAllLines` (возвращает массив строк);
- `File.ReadAllBytes` (возвращает байтовый массив).

Приведенные ниже статические методы записывают целый файл за один шаг:

- `File.WriteAllText;`
- `File.WriteAllLines;`
- `File.WriteAllBytes;`
- `File.AppendAllText` (удобен для добавления данных в журнальный файл).

Есть также статический метод по имени `File.ReadLines`: он похож на `ReadAllLines` за исключением того, что возвращает лениво оцениваемое перечисление `IEnumerable<string>`. Он более эффективен, т.к. не производит загрузку всего файла в память за один раз. Для потребления результатов идеально подходит LINQ; скажем, следующий код подсчитывает количество строк с длиной, превышающей 80 символов:

```
int longLines = File.ReadLines ("filePath")
    .Count (l => l.Length > 80);
```

Указание имени файла

Имя файла может быть либо абсолютным (скажем, `c:\temp\test.txt` или `/tmp/test.txt` в Unix), либо относительным к текущему каталогу (например, `test.txt` или `temp\test.txt`). Получить доступ либо изменить текущий каталог можно через статическое свойство `Environment.CurrentDirectory`.



Когда программа запускается, текущий каталог может совпадать или не совпадать с каталогом, где находится исполняемый файл программы. По этой причине при поиске во время выполнения дополнительных файлов, упакованных с исполняемым файлом, никогда не следует полагаться на текущий каталог.

Свойство `AppDomain.CurrentDomain.BaseDirectory` возвращает **базовый каталог приложения**, которым в нормальных ситуациях является каталог, содержащий исполняемый файл программы. Чтобы указать имя файла относительно базового каталога, можно вызвать метод `Path.Combine`:

```
string baseFolder = AppDomain.CurrentDomain.BaseDirectory;
string logoPath = Path.Combine(baseFolder, "logo.jpg");
Console.WriteLine(File.Exists(logoPath));
```

Чтение и запись по сети можно выполнять через путь UNC (Universal Naming Convention — соглашение об универсальном назначении имен), такой как `\JoesPC\PicShare\pic.jpg` или `\10.1.1.2\PicShare\pic.jpg`.

(Чтобы получить доступ к общему файловому ресурсу Windows из macOS или Unix, смонтируйте его в своей файловой системе согласно инструкциям, специфичным для вашей операционной системы (ОС), и откройте с использованием обычного пути в коде C#.)

Указание режима файла

Все конструкторы класса `FileStream`, которые принимают имя файла, также требуют указания режима файла — аргумента типа перечисления `FileMode`. На рис. 15.3 показано, как выбрать значение `FileMode`, и варианты дают результаты сордни вызову статического метода класса `File`.

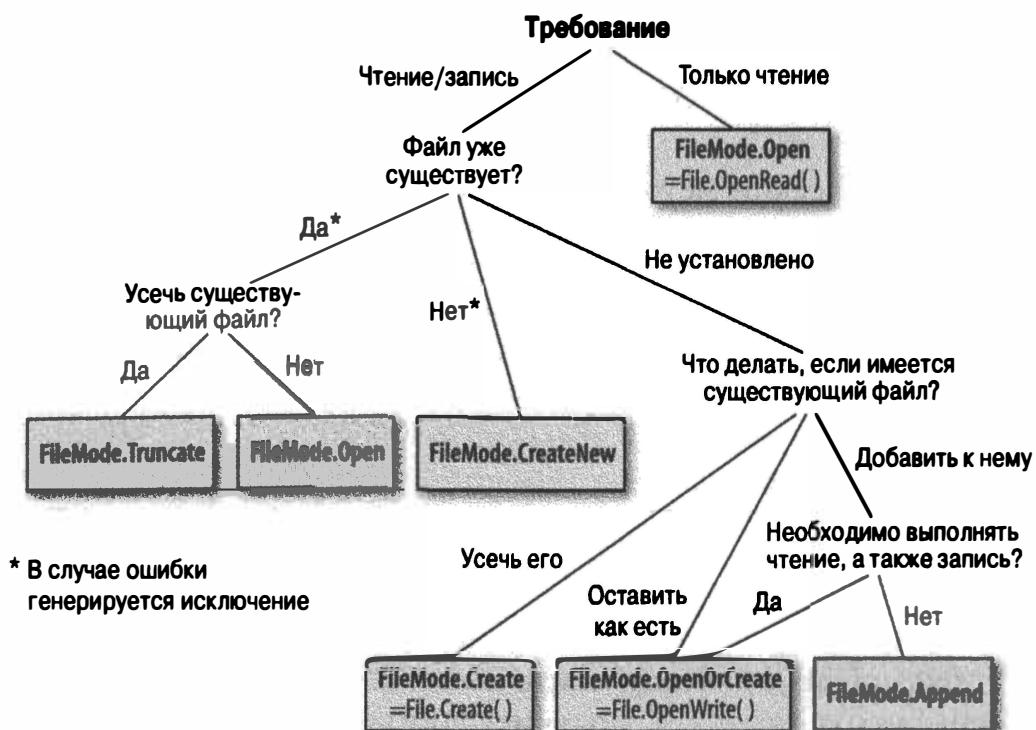


Рис. 15.3. Выбор значения `FileMode`



Метод `File.Create` и значение `FileMode.Create` приведут к генерации исключения, если используются для скрытых файлов. Чтобы перезаписать скрытый файл, потребуется удалить его и затем создать повторно:

```
File.Delete ("hidden.txt");
using var file = File.Create ("hidden.txt");
...
```

Конструирование экземпляра `FileStream` с указанием имени файла и режима `FileMode` дает (с одним исключением) поток с возможностью чтения/записи. Можно запросить понижение уровня доступа, если также предоставить аргумент `FileAccess`:

```
[Flags]
public enum FileAccess { Read = 1, Write = 2, ReadWrite = 3 }
```

Следующий вызов возвращает поток, предназначенный только для чтения, и он эквивалентен вызову метода `File.OpenRead`:

```
using var fs = new FileStream ("x.bin", FileMode.Open, FileAccess.Read);
...
```

Значение `FileMode.Append` считается особым: в таком режиме будет получен поток, предназначенный *только для записи*. Чтобы можно было добавлять, располагая поддержкой чтения-записи, вместо `FileMode.Append` придется указать `FileMode.Open` или `FileMode.OpenOrCreate` и перейти в конец потока:

```
using var fs = new FileStream ("myFile.bin", FileMode.Open);
fs.Seek (0, SeekOrigin.End);
...
```

Расширенные возможности `FileStream`

Ниже описаны другие необязательные аргументы, которые можно задавать при конструировании экземпляра `FileStream`.

- Значение перечисления `FileShare`, которое описывает, какой уровень доступа должен быть выдан другим процессам, чтобы они могли просматривать файл до того, как вы завершите с ним работу (`None`, `Read` (по умолчанию), `ReadWrite` или `Write`).
- Размер внутреннего буфера в байтах (в настоящее время стандартным является размер, составляющий 4 Кбайт).
- Флаг, который указывает, следует ли возложить асинхронный вывод на ОС.
- Значение перечисления флагов `FileOptions` для запроса шифрования ОС (`Encrypted`), автоматического удаления при закрытии временных файлов (`DeleteOnClose`) и подсказки для оптимизации (`RandomAccess` и `SequentialScan`). Имеется также флаг `WriteThrough`, который запрашивает у ОС отключение кеширования при записи; он предназначен для транзакционных файлов или журналов. Флаги, не поддерживаемые имеющейся ОС, молча игнорируются.

Открытие файла со значением `FileShare.ReadWrite` позволяет другим процессам или пользователям одновременно читать и записывать в один и тот же файл. Во избежание хаоса потребуется блокировать определенные области файла перед чтением или записью с помощью следующих методов:

```
// Определены в классе FileStream:  
public virtual void Lock (long position, long length);  
public virtual void Unlock (long position, long length);
```

Метод `Lock` генерирует исключение, если часть или вся запрошенная область файла уже заблокирована.

MemoryStream

В качестве опорного хранилища класс `MemoryStream` использует массив. Отчасти это противоречит замыслу самого потока, поскольку опорное хранилище должно располагаться в памяти целиком. Класс `MemoryStream` все еще полезен, когда необходим произвольный доступ в поток данных, не поддерживающий позиционирование. Если известно, что исходный поток будет иметь поддающийся управлению размер, то вот как его можно скопировать в `MemoryStream`:

```
var ms = new MemoryStream();  
sourceStream.CopyTo (ms);
```

Вызвав метод `ToByteArray`, поток `MemoryStream` можно преобразовать в байтовый массив. Метод `GetBuffer` делает ту же самую работу более эффективно, возвращая прямую ссылку на лежащий в основе массив хранилища; к сожалению, такой массив обычно превышает реальный размер потока.



Закрывать и сбрасывать `MemoryStream` вовсе не обязательно. После закрытия потока `MemoryStream` производить чтение и запись в него больше не удастся, но по-прежнему можно вызывать метод `ToByteArray` для получения лежащих в основе данных. Метод `Flush` в потоке `MemoryStream` вообще ничего не делает.

Дополнительные примеры использования `MemoryStream` можно найти в разделе “Потоки со сжатием” далее в главе и в разделе “Обзор” главы 20.

PipeStream

Класс `PipeStream` предоставляет простой способ взаимодействия одного процесса с другим через протокол каналов ОС. Различают два вида каналов.

- **Анонимный канал.** Делает возможным одностороннее взаимодействие между родительским и дочерним процессами на одном и том же компьютере.
- **Именованный канал (более гибкий).** Делает возможным двунаправленное взаимодействие между произвольными процессами на одном и том же компьютере или на разных компьютерах по сети Windows.

Канал удобен для организации взаимодействия между процессами (*inter-process communication* — IPC) на одном компьютере: он не полагается на сетевой транспорт, что означает отсутствие накладных расходов, связанных с протоколами, и проблем с брандмауэрами.



Каналы основаны на потоках, так что один процесс ожидает получения последовательности байтов, в то время как другой процесс их отправляет. Альтернативой является взаимодействие процессов через блок совместно используемой памяти; мы покажем, как это делать, в разделе “Размещенные в памяти файлы” далее в главе.

Тип `PipeStream` представляет собой абстрактный класс с четырьмя конкретными подтиповыми. Два из них применяются для анонимных каналов и еще два — для именованных каналов.

- **Анонимные каналы.** `AnonymousPipeServerStream` и `AnonymousPipeClientStream`
- **Именованные каналы.** `NamedPipeServerStream` и `NamedPipeClientStream`

Именованные каналы проще в использовании, так что рассмотрим их первыми.

Именованные каналы

В случае именованных каналов участники взаимодействуют через канал с таким же именем. Протокол определяет две отдельные роли: клиент и сервер. Взаимодействие между клиентом и сервером происходит следующим образом.

- Сервер создает экземпляр `NamedPipeServerStream` и вызывает метод `WaitForConnection`.
- Клиент создает экземпляр `NamedPipeClientStream` и вызывает метод `Connect` (необязательно указывая тайм-аут).

Затем для взаимодействия два участника производят чтение и запись в потоки.

В приведенном ниже примере демонстрируется сервер, который отправляет одиночный байт (100) и ожидает получения одиночного байта:

```
using var s = new NamedPipeServerStream ("pipedream");
s.WaitForConnection();
s.WriteByte (100);           // Отправить значение 100
Console.WriteLine (s.ReadByte());
```

А вот соответствующий код клиента:

```
using var s = new NamedPipeClientStream ("pipedream");
s.Connect();
Console.WriteLine (s.ReadByte());
s.WriteByte (200);           // Отправить обратно значение 200
```

Потоки данных именованных каналов по умолчанию являются двунаправленными, так что любой из участников может читать или записывать в свой поток. Это значит, что клиент и сервер должны следовать определенному протоколу для координации своих действий, чтобы оба участника не начали одновременно отправлять или получать данные.

Также должно быть предусмотрено соглашение о длине каждой передачи. В данном смысле приведенный выше пример тривиален, поскольку в каждом направлении передается один байт. Для поддержки сообщений длиннее одного байта каналы предлагают режим передачи *сообщений* (только Windows). Когда он включен, вызывающий метод `Read` участник может узнать о том, что сообщение завершено, проверив свойство `IsMessageComplete`. В целях демонстрации мы начнем с написания вспомогательного метода, который читает целое сообщение из `PipeStream` с включенным режимом передачи сообщений — другими словами, до тех пор, пока свойство `IsMessageComplete` не станет равным `true`:

```
static byte[] ReadMessage (PipeStream s)
{
    MemoryStream ms = new MemoryStream();
    byte[] buffer = new byte [0x1000]; // Читать блоками по 4 Кбайт
    do { ms.Write (buffer, 0, s.Read (buffer, 0, buffer.Length)); }
    while (!s.IsMessageComplete);
    return ms.ToArray();
}
```

(Чтобы сделать код асинхронным, замените `s.Read` конструкцией `await s.ReadAsync()`.)



Просто ожидая возвращения методом `Read` значения 0, нельзя выяснить, завершил ли поток `PipeStream` чтение сообщения. Причина в том, что в отличие от большинства других типов потоков потоки данных каналов и сетевые потоки не имеют четко выраженного окончания. Взамен они временно “опустошаются” между передачами сообщений.

Теперь можно активизировать режим передачи сообщений. На стороне сервера это делается за счет указания `PipeTransmissionMode.Message` во время конструирования потока:

```
using var s = new NamedPipeServerStream ("pipedream", PipeDirection.InOut,
                                         1, PipeTransmissionMode.Message);

s.WaitForConnection();

byte[] msg = Encoding.UTF8.GetBytes ("Hello");
s.Write (msg, 0, msg.Length);

Console.WriteLine (Encoding.UTF8.GetString (ReadMessage (s)));
```

На стороне клиента режим передачи сообщений включается установкой свойства `ReadMode` после вызова метода `Connect`:

```
using var s = new NamedPipeClientStream ("pipedream");
s.Connect();
s.ReadMode = PipeTransmissionMode.Message;
Console.WriteLine (Encoding.UTF8.GetString (ReadMessage (s)));
byte[] msg = Encoding.UTF8.GetBytes ("Hello right back!");
s.Write (msg, 0, msg.Length);
```



Режим передачи сообщений поддерживается только в Windows. На других платформах будет генерироваться исключение PlatformNotSupportedException.

Анонимные каналы

Анонимный канал предоставляет односторонний поток взаимодействия между родительским и дочерним процессами. Вместо использования имени на уровне системы анонимные каналы настраиваются посредством закрытого дескриптора.

Как и именованные каналы, анонимные каналы имеют отдельные роли клиента и сервера. Однако система взаимодействия несколько отличается и происходит следующим образом.

1. Сервер создает экземпляр класса `AnonymousPipeServerStream`, фиксируя направление канала (`PipeDirection`) как `In` или `Out`.
2. Сервер вызывает метод `GetClientHandleAsString`, чтобы получить идентификатор для канала, который затем передается клиенту (обычно в качестве аргумента при запуске дочернего процесса).
3. Дочерний процесс создает экземпляр класса `AnonymousPipeClientStream`, указывая противоположное направление канала (`PipeDirection`).
4. Сервер освобождает локальный дескриптор, который был сгенерирован на шаге 2, вызывая метод `DisposeLocalCopyOfClientHandle`.
5. Родительский и дочерний процессы взаимодействуют, выполняя чтение/запись в поток.

Поскольку анонимные каналы являются односторонними, для двунаправленного взаимодействия сервер должен создать два канала. В приведенной далее консольной программе создаются два канала (ввода и вывода) и запускается дочерний процесс. Затем дочернему процессу отправляется одиночный байт и в ответ принимается тоже одиночный байт:

```
class Program
{
    static void Main (string[] args)
    {
        if (args.Length == 0)
            // Отсутствие аргументов сигнализирует о режиме сервера
            AnonymousPipeServer ();
        else
```

```

    // Для сигнализации о режиме клиента в качестве аргументов
    // мы передаем идентификаторы дескрипторов каналов
    AnonymousPipeClient (args [0], args [1]);
}

static void AnonymousPipeClient (string rxID, string txID)
{
    using var rx = new AnonymousPipeClientStream (PipeDirection.In, rxID);
    using var tx = new AnonymousPipeClientStream (PipeDirection.Out, txID);

    Console.WriteLine ("Client received: " + rx.ReadByte ());
        // Клиент получил:
    tx.WriteByte (200);
}

static void AnonymousPipeServer ()
{
    using var tx = new AnonymousPipeServerStream (
        PipeDirection.Out, HandleInheritability.Inheritable);
    using var rx = new AnonymousPipeServerStream (
        PipeDirection.In, HandleInheritability.Inheritable);

    string txID = tx.GetClientHandleAsString ();
    string rxID = rx.GetClientHandleAsString ();

    // Создать и запустить дочерний процесс.
    // Мы используем тот же самый исполняемый файл консольной программы,
    // но передаем аргументы:
    string thisAssembly = Assembly.GetEntryAssembly ().Location;
    string thisExe = Path.ChangeExtension (thisAssembly, ".exe");
    var args = $"{txID} {rxID}";
    var startInfo = new ProcessStartInfo (thisExe, args);

    startInfo.UseShellExecute = false; // Требуется для дочернего процесса
    Process p = Process.Start (startInfo);

    tx.DisposeLocalCopyOfClientHandle (); // Освободить неуправляемые
    rx.DisposeLocalCopyOfClientHandle (); // ресурсы дескрипторов

    tx.WriteByte (100); // Отправить байт дочернему процессу
    Console.WriteLine ("Server received: " + rx.ReadByte ());
        // Сервер получил:
    p.WaitForExit ();
}
}

```

Как и в случае именованных каналов, клиент и сервер должны координировать свои отправки и получения и согласовывать длину каждой передачи. К сожалению, анонимные каналы не поддерживают режим передачи сообщений, а потому вам придется реализовать собственный протокол для согласования длины сообщений. Одним из решений может быть отправка в первых четырех байтах каждой передачи целочисленного значения, которое определяет длину сообщения, следующего за этими четырьмя байтами. Класс BitConverter предоставляет методы для преобразования между целочисленным типом и массивом из четырех байтов.

BufferedStream

Класс `BufferedStream` декорирует, или помещает в оболочку, другой поток, добавляя возможность буферизации, и является одним из нескольких типов потоков с декораторами, которые определены в .NET; все типы показаны на рис. 15.4.

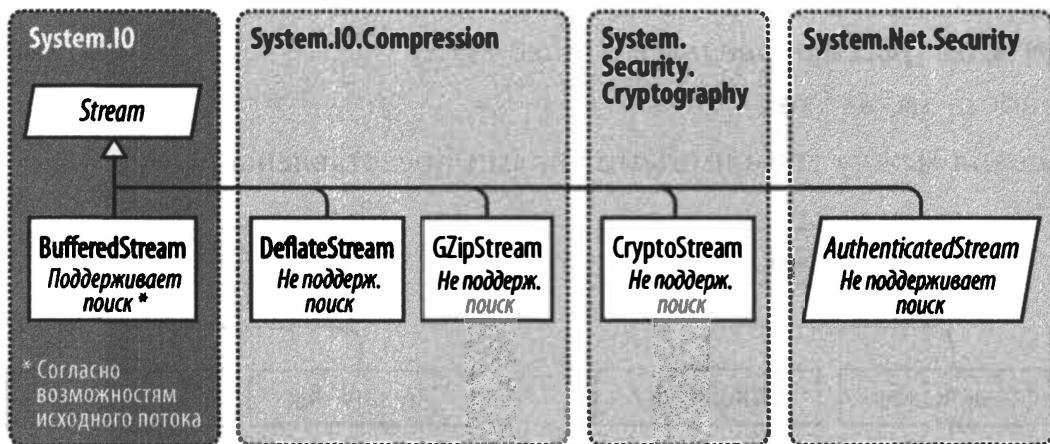


Рис. 15.4. Потоки с декораторами

Буферизация улучшает производительность, сокращая количество двухсторонних обменов с опорным хранилищем. Ниже показано, как поместить поток `FileStream` в `BufferedStream` с буфером 20 000 байтов:

```
// Записать 100 000 байтов в файл:  
File.WriteAllBytes ("myFile.bin", new byte [100000]);  
using FileStream fs = File.OpenRead ("myFile.bin");  
using BufferedStream bs = new BufferedStream (fs, 20000); // Буфер размером  
// 20000 байтов  
  
bs.ReadByte();  
Console.WriteLine (fs.Position); // 20000
```

В приведенном примере благодаря буферизации с опережающим чтением внутренний поток перемещает 20 000 байтов после чтения только одного байта. Вызывать метод `ReadByte` можно было бы еще 19 999 раз, и лишь тогда снова произошло бы обращение к `FileStream`.

Связывание `BufferedStream` с `FileStream`, как в предыдущем примере, не особенно ценно, т.к. класс `FileStream` сам поддерживает встроенную буферизацию. Оно могло понадобиться единственно для расширения буфера уже сконструированного потока `FileStream`.

Закрытие `BufferedStream` автоматически закрывает лежащий в основе поток с опорным хранилищем.

АдAPTERЫ ПОТОКОВ

Класс `Stream` имеет дело только с байтами; для чтения и записи таких типов данных, как строки, целые числа или XML-элементы, потребуется подключить адаптер. Ниже описаны виды адаптеров, предлагаемые .NET.

Текстовые адаптеры (для строковых и символьных данных)

TextReader, TextWriter

StreamReader, StreamWriter

StringReader, StringWriter

Двоичные адаптеры (для примитивных типов вроде int, bool, string и float)

BinaryReader, BinaryWriter

Адаптеры XML (рассматривались в главе 11)

XmlReader, XmlWriter

Отношения между упомянутыми типами представлены на рис. 15.5.

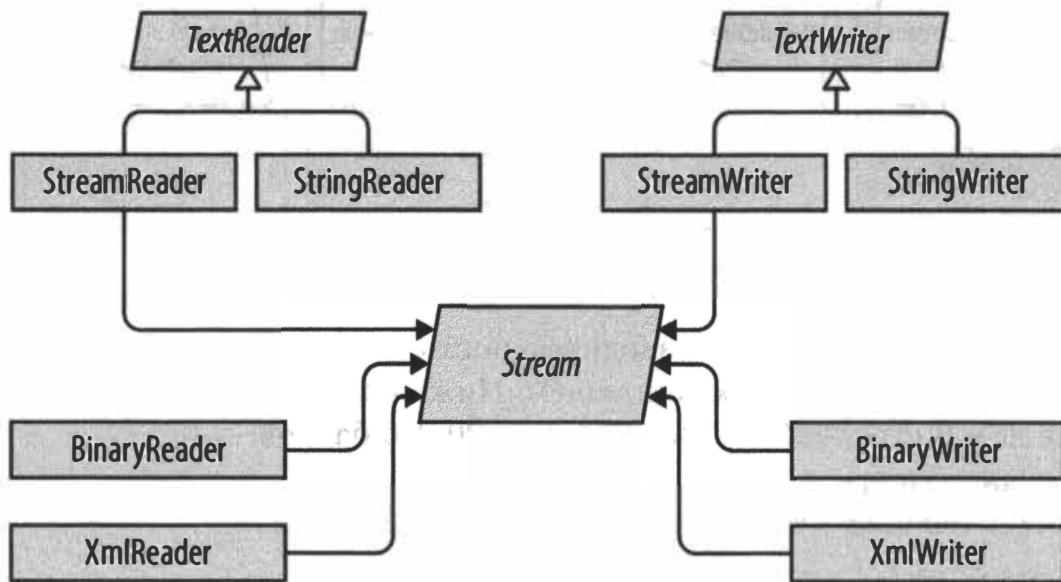


Рис. 15.5. Средства чтения и записи

Текстовые адаптеры

Типы `TextReader` и `TextWriter` являются абстрактными базовыми классами для адаптеров, которые имеют дело исключительно с символами и строками. С каждым из них в .NET связаны две универсальные реализации.

- `StreamReader/StreamWriter`. Применяют для своего хранилища низкоуровневых данных класс `Stream`, транслируя байты потока в символы или строки.
- `StringReader/StringWriter`. Реализуют `TextReader/TextWriter`, используя строки в памяти.

В табл. 15.2 перечислены члены класса `TextReader` по категориям. Метод `Peek` возвращает следующий символ из потока, не перемещая текущую позицию вперед. Метод `Peek` и версия без аргументов метода `Read` возвращают `-1`, если встречается конец потока, и целочисленное значение, которое может быть приведено непосредственно к типу `char`, в противном случае. Перегруженная версия `Read`, принимающая буфер `char[]`, идентична по функциональности методу `ReadBlock`. Метод `ReadLine` производит чтение до тех пор, пока не встретит в последовательности `<CR>` (символ 13), `<LF>` (символ 10) или пару `<CR+LF>`. Затем он возвращает строку с отброшенными символами `<CR>/<LF>`.

Таблица 15.2. Члены класса TextReader

Категория	Члены
Чтение одного символа	public virtual int Peek(); // Результат приводится к char public virtual int Read(); // Результат приводится к char
Чтение множества символов	public virtual int Read (char[] buffer, int index, int count); public virtual int ReadBlock (char[] buffer, int index, int count); public virtual string ReadLine(); public virtual string ReadToEnd();
Закрытие	public virtual void Close(); public void Dispose(); // То же, что и Close
Другие	public static readonly TextReader Null; public static TextReader Synchronized (TextReader reader);



Свойство Environment.NewLine возвращает последовательность новой строки для текущей ОС. В Windows она выглядит как "\r\n" и приближенно моделирует механическую пишущую машинку: возврат каретки (символ 13), за которым следует перевод строки (символ 10). Изменение порядка следования символов на обратный приведет к получению либо двух новых строк, либо вообще ни одной! В Unix и macOS это просто "\n".

Класс TextWriter имеет аналогичные методы для записи (табл. 15.3). Методы Write и WriteLine дополнительно перегружены, чтобы принимать каждый примитивный тип плюс тип object. Такие методы просто вызывают метод ToString на том, что им передается (возможно, через реализацию интерфейса IFormatProvider, указанную или при вызове метода, или при конструировании экземпляра TextWriter).

Таблица 15.3. Члены класса TextWriter

Категория	Члены
Запись одного символа	public virtual void Write (char value);
Запись множества символов	public virtual void Write (string value); public virtual void Write (char[] buffer, int index, int count); public virtual void Write (string format, params object[] arg); public virtual void WriteLine (string value);
Закрытие и сбрасывание	public virtual void Close(); public void Dispose(); // То же, что и Close public virtual void Flush();
Форматирование и кодирование	public virtual IFormatProvider FormatProvider { get; } public virtual string NewLine { get; set; } public abstract Encoding Encoding { get; }
Другие	public static readonly TextWriter Null; public static TextWriter Synchronized (TextWriter writer);

Метод `WriteLine` просто дополняет заданный текст значением `Environment.NewLine`, что можно изменить с помощью свойства `NewLine` (полезно для взаимодействия с файлами в форматах Unix).



Подобно `Stream` классы `TextReader` и `TextWriter` предлагают для своих методов чтения/записи асинхронные версии на основе задач.

StreamReader и StreamWriter

В следующем примере экземпляр `StreamWriter` записывает две строки текста в файл, и затем экземпляр `StreamReader` производит чтение из этого файла:

```
using (FileStream fs = File.Create ("test.txt"))
using (TextWriter writer = new StreamWriter (fs))
{
    writer.WriteLine ("Line1");
    writer.WriteLine ("Line2");
}

using (FileStream fs = File.OpenRead ("test.txt"))
using (TextReader reader = new StreamReader (fs))
{
    Console.WriteLine (reader.ReadLine());           // Line1
    Console.WriteLine (reader.ReadLine());           // Line2
}
```

Поскольку текстовые адAPTERы настолько часто связываются с файлами, для сокращения объема кода класс `File` предоставляет статические методы `CreateText`, `AppendText` и `OpenText`:

```
using (TextWriter writer = File.CreateText ("test.txt"))
{
    writer.WriteLine ("Line1");
    writer.WriteLine ("Line2");
}

using (TextWriter writer = File.AppendText ("test.txt"))
    writer.WriteLine ("Line3");
using (TextReader reader = File.OpenText ("test.txt"))
    while (reader.Peek() > -1)
        Console.WriteLine (reader.ReadLine());      // Line1
                                                // Line2
                                                // Line3
```

Здесь еще иллюстрируется способ осуществления проверки на предмет достижения конца файла (через `reader.Peek()`). Другой способ предполагает чтение до тех пор, пока `reader.ReadLine` не возвратит `null`.

Можно также выполнять чтение и запись других типов данных, подобных целым числам, но из-за того, что `TextWriter` вызывает на них метод `ToString`, при чтении потребуется произвести разбор строки:

```
using (TextWriter w = File.CreateText ("data.txt"))
{
    w.WriteLine (123);                           // Записывает "123"
    w.WriteLine (true);                         // Записывает слово "true"
}
```

```
using (TextReader r = File.OpenText ("data.txt"))
{
    int myInt = int.Parse (r.ReadLine());           // myInt == 123
    bool yes = bool.Parse (r.ReadLine());           // yes == true
}
```

Кодировки символов

Сами по себе `TextReader` и `TextWriter` — всего лишь абстрактные классы, не подключенные ни к потоку, ни к опорному хранилищу. Однако типы `StreamReader` и `StreamWriter` подключены к лежащему в основе байт-ориентированному потоку, поэтому они должны выполнять преобразование между символами и байтами. Они делают это посредством класса `Encoding` из пространства имен `System.Text`, который выбирается при конструировании экземпляра `StreamReader` или `StreamWriter`. Если ничего не выбрано, тогда применяется стандартная кодировка UTF-8.



В случае явного указания кодировки экземпляр `StreamWriter` по умолчанию будет записывать в начале потока префикс для идентификации кодировки. Обычно такое действие нежелательно и предотвратить его можно, конструируя экземпляр класса кодировки следующим образом:

```
var encoding = new UTF8Encoding (
    encoderShouldEmitUTF8Identifier:false,
    throwOnInvalidBytes:true);
```

Второй аргумент сообщает `StreamWriter` (или `StreamReader`) о необходимости генерации исключения, если встречаются байты, которые не имеют допустимой строковой трансляции для их кодировки, что соответствует стандартному поведению, когда кодировка не указана.

Простейшей из всех кодировок является ASCII, т.к. в ней каждый символ представлен одним байтом. Кодировка ASCII отображает первые 127 символов набора Unicode на одиночные байты, охватывая символы, которые находятся на англоязычной клавиатуре. Большинство других символов, включая специализированные и неанглийские символы, не могут быть представлены в ASCII и преобразуются в символ □. Стандартная кодировка UTF-8 может отобразить все выделенные символы Unicode, но она сложнее. Первые 127 символов кодируются в одиночный байт для совместимости с ASCII; остальные символы кодируются в варьирующееся количество байтов (чаще всего в два или три). Взгляните на приведенный ниже код:

```
using (TextWriter w=File.CreateText ("but.txt")) //Использовать стандартную
    w.WriteLine ("but-");                           // кодировку UTF-8

using (Stream s = File.OpenRead ("but.txt"))
    for (int b; (b = s.ReadByte()) > -1;)
        Console.WriteLine (b);
```

За словом “but” выводится не стандартный знак переноса, а символ длинного тире (—), U+2014. Давайте исследуем вывод:

```

98    // б
117   // у
116   // т
226   // байт 1 длинного тире
128   // байт 2 длинного тире
148   // байт 3 длинного тире
13    // <CR>
10    // <LF>

```

Обратите внимание, что значения байтов больше или равны 128 для каждой части многобайтной последовательности

Символ длинного тире находится за пределами первых 127 символов набора Unicode и потому при кодировании в UTF-8 требует более одного байта (трех в данном случае). Кодировка UTF-8 эффективна с западным алфавитом, т.к. большинство популярных символов занимают только один байт. Она также легко понижается до ASCII просто за счет игнорирования всех байтов со значениями больше 127. Недостаток кодировки UTF-8 в том, что поиск внутри потока является ненадежным, поскольку позиция символа не соответствует позиции его байтов в потоке. Альтернативой является кодировка UTF-16 (обозначенная просто как Unicode в классе Encoding). Ниже показано, как записать ту же самую строку с помощью UTF-16:

```

using (Stream s = File.Create ("but.txt"))
using (TextWriter w = new StreamWriter (s, Encoding.Unicode))
    w.WriteLine ("but-");
foreach (byte b in File.ReadAllBytes ("but.txt"))
    Console.WriteLine (b);

```

Вывод будет таким:

```

255 // Маркер порядка байтов 1
254 // Маркер порядка байтов 2
98  // 'б', байт 1
0   // 'б', байт 2
117 // 'у', байт 1
0   // 'у', байт 2
116 // 'т', байт 1
0   // 'т', байт 2
20  // '--', байт 1
32  // '--', байт 2
13  // <CR>, байт 1
0   // <CR>, байт 2
10  // <LF>, байт 1
0   // <LF>, байт 2

```

Формально кодировка UTF-16 использует два или четыре байта на символ (есть около миллиона выделенных или зарезервированных символов Unicode, поэтому двух байтов не всегда достаточно). Но из-за того, что тип char в C# сам имеет ширину только 16 битов, кодировка UTF-16 всегда будет применять в точности два байта на один символ char. В результате упрощается переход по индексу конкретного символа внутри потока.

Кодировка UTF-16 использует двухбайтный префикс для идентификации записи байтовых пар в порядке “старший байт после младшего” или “старший байт перед младшим” (первым идет менее значащий байт или более значащий байт). Применяемый по умолчанию порядок “старший байт после младшего” считается стандартным для систем на основе Windows.

StringReader и StringWriter

АдAPTERы `StringReader` и `StringWriter` вообще не содержат внутри себя поток; взамен в качестве лежащего в основе источника данных они используют строку или экземпляр `StringBuilder`. Это означает, что никакой трансляции байтов не требуется — в действительности классы `StringReader` и `StringWriter` не делают ничего такого, чего нельзя было бы достигнуть с помощью строки или экземпляра `StringBuilder` в паре с индексной переменной. Тем не менее, их преимуществом является совместное использование базового класса с классами `StreamReader/StreamWriter`. Например, пусть имеется строка, содержащая XML-код, и нужно разобрать ее с помощью `XmlReader`. Метод `XmlReader.Create` принимает один из следующих аргументов:

- `URI`
- `Stream`
- `TextReader`

Так каким же образом выполнить XML-разбор строки? Нам повезло, потому что `StringReader` является подклассом `TextReader`. Мы можем создать экземпляр `StringReader` и передать его методу `XmlReader.Create`:

```
XmlReader r = XmlReader.Create (new StringReader (myString));
```

Двоичные адAPTERы

Классы `BinaryReader` и `BinaryWriter` осуществляют чтение и запись собственных типов данных: `bool`, `byte`, `char`, `decimal`, `float`, `double`, `short`, `int`, `long`, `sbyte`, `ushort`, `uint` и `ulong`, а также строк и массивов примитивных типов данных.

В отличие от `StreamReader` и `StreamWriter` двоичные адAPTERы эффективно сохраняют данные примитивных типов, потому что они представлены в памяти. Таким образом, `int` занимает четыре байта, а `double` — восемь байтов. Строки записываются посредством текстовой кодировки (как в случае `StreamReader` и `StreamWriter`), но с префиксами длины, чтобы сделать возможным чтение последовательности строк без необходимости в наличии специальных разделителей.

Предположим, что есть простой тип со следующим определением:

```
public class Person
{
    public string Name;
    public int Age;
    public double Height;
}
```

Применяя двоичные адAPTERы, в класс `Person` можно добавить методы для сохранения его данных в поток и их загрузки из потока:

```
public void SaveData (Stream s)
{
    var w = new BinaryWriter (s);
    w.Write (Name);
```

```

w.Write (Age);
w.Write (Height);
w.Flush();      // Обеспечить очистку буфера BinaryWriter.
                // Мы не будем освобождать/закрывать его, поэтому
}
                // в поток можно записывать другие данные
public void LoadData (Stream s)
{
    var r = new BinaryReader (s);
    Name = r.ReadString();
    Age = r.ReadInt32();
    Height = r.ReadDouble();
}

```

Класс `BinaryReader` может также производить чтение в байтовые массивы. Приведенный ниже код читает все содержимое потока, поддерживающего поиск:

```
byte[] data = new BinaryReader (s).ReadBytes ((int) s.Length);
```

Такой прием более удобен, чем чтение напрямую из потока, поскольку он не требует использования цикла для гарантии того, что все данные были прочитаны.

Закрытие и освобождение адаптеров потоков

Доступны четыре способа уничтожения адаптеров потоков.

1. Закрыть только адаптер.
2. Закрыть адаптер и затем закрыть поток.
3. (Для средств записи.) Сбросить адаптер и затем закрыть поток.
4. (Для средств чтения.) Закрыть только поток.



Для адаптеров методы `Close` и `Dispose` являются синонимичными в точности как в случае потоков.

Первый и второй варианты семантически идентичны, т.к. закрытие адаптера приводит к автоматическому закрытию лежащего в основе потока. Всякий раз, когда вы вкладываете операторы `using` друг в друга, то неявно принимаете второй вариант:

```
using (FileStream fs = File.Create ("test.txt"))
using (TextWriter writer = new StreamWriter (fs))
    writer.WriteLine ("Line");
```

Поскольку освобождение при вложении операторов `using` происходит наизнанку, сначала закрывается адаптер, а затем поток. Более того, если внутри конструктора адаптера сгенерировано исключение, то поток все равно закроется. Благодаря вложенным операторам `using` мало что может пойти не так, как было задумано.



Никогда не закрывайте поток перед закрытием или сбросом его средства записи, иначе любые данные, буферизированные в адаптере, будут потеряны.

Третий и четвертый варианты работают из-за того, что адаптеры относятся к необычной категории *необязательно освобождаемых* объектов. Примером, когда может быть принято решение не освобождать адаптер, является ситуация, при которой работа с адаптером закончена, но внутренний поток необходимо оставить открытым для последующего использования:

```
using (FileStream fs = new FileStream ("test.txt", FileMode.Create))  
{  
    StreamWriter writer = new StreamWriter (fs);  
    writer.WriteLine ("Hello");  
    writer.Flush();  
    fs.Position = 0;  
    Console.WriteLine (fs.ReadByte());  
}
```

Здесь мы записываем в файл, изменяем позицию в потоке и читаем первый байт перед закрытием потока. Если мы освободим StreamWriter, тогда также закроется лежащий в основе объект FileStream, приводя к неудаче последующего чтения. Обязательное условие состоит в том, что мы вызываем метод Flush для обеспечения записи буфера StreamWriter во внутренний поток.



Адаптеры потоков — со своей семантикой необязательного освобождения — не реализуют расширенный шаблон освобождения, при котором финализатор вызывает метод Dispose. Это позволяет отброшенному адаптеру избежать автоматического освобождения при его подхвате сборщиком мусора.

В классах StreamReader/StreamWriter имеется конструктор, который инструктирует поток о необходимости оставаться открытым после освобождения. Следовательно, вот как можно переписать предыдущий пример:

```
using (var fs = new FileStream ("test.txt", FileMode.Create))  
{  
    using (var writer = new StreamWriter (fs, new UTF8Encoding (false, true),  
                                         0x400, true))  
        writer.WriteLine ("Hello");  
  
    fs.Position = 0;  
    Console.WriteLine (fs.ReadByte());  
    Console.WriteLine (fs.Length);  
}
```

ПОТОКИ СО СЖАТИЕМ

В пространстве имен System.IO.Compression доступны два универсальных потока со сжатием: DeflateStream и GZipStream. Оба они применяют популярный алгоритм сжатия, подобный алгоритму, который используется при создании архивов в формате ZIP. Указанные классы отличаются тем, что GZipStream записывает дополнительную информацию в начале и в конце, включая код CRC для обнаружения ошибок. Вдобавок класс GZipStream соответствует стандарту, распознаваемому другим программным обеспечением.

В состав .NET также входит поток `BrotliStream`, который реализует алгоритм сжатия *Brotli*. Класс `BrotliStream` функционирует медленнее классов `DeflateStream` и `GZipStream` более чем в 10 раз, но достигает лучшего коэффициента сжатия. (Падение производительности происходит только при сжатии — распаковка работает очень быстро.)

Все три потока позволяют осуществлять чтение и запись со следующими оговорками:

- при сжатии вы всегда *записываете* в поток;
- при распаковке вы всегда *читаете* из потока.

Классы `DeflateStream`, `GZipStream` и `BrotliStream` являются декораторами; они сжимают или распаковывают данные из другого потока, который указывается при конструировании их экземпляров. В следующем примере мы сжимаем и распаковываем последовательность байтов, применяя `FileStream` в качестве опорного хранилища:

```
using (Stream s = File.Create ("compressed.bin"))
using (Stream ds = new DeflateStream (s, CompressionMode.Compress))
    for (byte i = 0; i < 100; i++)
        ds.WriteByte (i);
using (Stream s = File.OpenRead ("compressed.bin"))
using (Stream ds = new DeflateStream (s, CompressionMode.Decompress))
    for (byte i = 0; i < 100; i++)
        Console.WriteLine (ds.ReadByte()); // Выводит числа от 0 до 99
```

В случае использования `DeflateStream` сжатый файл имеет длину 102 байта: чуть больше размера исходного файла (класс `BrotliStream` обеспечил бы сжатие до 73 байтов). Дело в том, что сжатие плохо работает с “плотными”, неповторяющимися двоичными данными в файлах (и хуже всего с шифрованными данными, которые лишены закономерности по определению). Сжатие успешно работает с большинством текстовых файлов; в приведенном ниже примере мы с помощью алгоритма *Brotli* сжимаем и распаковываем текстовый поток, состоящий из 1000 слов, которые случайным образом выбраны из короткого предложения. Кроме того, в примере демонстрируется соединение в цепочку потока с опорным хранилищем, потока с декоратором и адаптера (как было показано на рис. 15.1 в начале главы), а также применение асинхронных методов:

```
string[] words = "The quick brown fox jumps over the lazy dog".Split();
Random rand = new Random(0); // Предоставить начальное значение
                            // для согласованности

using (Stream s = File.Create ("compressed.bin"))
using (Stream ds = new BrotliStream (s, CompressionMode.Compress))
using (TextWriter w = new StreamWriter (ds))
    for (int i = 0; i < 1000; i++)
        await w.WriteAsync (words [rand.Next (words.Length)] + " ");

Console.WriteLine (new FileInfo ("compressed.bin").Length); // 808

using (Stream s = File.OpenRead ("compressed.bin"))
using (Stream ds = new BrotliStream (s, CompressionMode.Decompress))
using (TextReader r = new StreamReader (ds))
    Console.Write (await r.ReadToEndAsync()); // Вывод показан ниже:
```

```
lazy lazy the fox the quick The brown fox jumps over fox over fox The  
brown brown brown over brown quick fox brown dog dog lazy fox dog brown  
over fox jumps lazy lazy quick The jumps fox jumps The over jumps dog...
```

Класс `BrotliStream` в этом случае эффективно сжимает текст до 808 байтов — меньше, чем один байт на слово. (Для сравнения класс `DeflateStream` сжимает те же самые данные до 885 байтов.)

Сжатие в памяти

Иногда сжатие нужно выполнять полностью в памяти. Ниже показано, как для такой цели использовать класс `MemoryStream`:

```
byte[] data = new byte[1000];           // Мы можем ожидать хороший коэффициент  
                                         // сжатия для пустого массива!  
  
var ms = new MemoryStream();  
using (Stream ds = new DeflateStream (ms, CompressionMode.Compress))  
    ds.Write (data, 0, data.Length);  
  
byte[] compressed = ms.ToArray();  
Console.WriteLine (compressed.Length);      // 11  
  
// Распаковка обратно в массив data:  
ms = new MemoryStream (compressed);  
using (Stream ds = new DeflateStream (ms, CompressionMode.Decompress))  
    for (int i = 0; i < 1000; i += ds.Read (data, i, 1000 - i));
```

Оператор `using` вокруг `DeflateStream` закрывает его рекомендуемым способом, сбрасывая любые незаписанные буферы. Вдобавок также закрывается внутренний поток `MemoryStream`, т.е. для извлечения данных нам придется вызвать метод `ToArray`.

Ниже представлен альтернативный подход, не закрывающий поток `MemoryStream`, в котором используются асинхронные методы чтения и записи:

```
byte[] data = new byte[1000];  
  
MemoryStream ms = new MemoryStream();  
using (Stream ds = new DeflateStream (ms, CompressionMode.Compress, true))  
    await ds.WriteAsync (data, 0, data.Length);  
  
Console.WriteLine (ms.Length);            // 113  
ms.Position = 0;  
using (Stream ds = new DeflateStream (ms, CompressionMode.Decompress))  
    for (int i = 0; i < 1000; i += await ds.ReadAsync (data, i, 1000 - i));
```

Дополнительный флаг, переданный конструктору `DeflateStream`, сообщает о том, что в отношении освобождения лежащего в основе потока не следует соблюдать обычный протокол. Другими словами, поток `MemoryStream` остается открытый, позволяя устанавливать его в нулевую позицию и читать повторно.

Сжатие файлов с помощью `gzip` в Unix

Алгоритм сжатия класса `GZipStream` популярен в системах Unix в качестве формата сжатых файлов. Каждый исходный файл сжимается в отдельный целевой файл с расширением `.gz`.

Следующие методы работают с утилитами командной строки gzip и gunzip в среде Unix:

```
async Task GZip (string sourcefile, bool deleteSource = true)
{
    var gzip = $"{sourcefile}.gz";
    if (File.Exists (gzip))
        throw new Exception ("Gzip file already exists");
        // Файл gzip уже существует

    // Сжатие
    using (FileStream inStream = File.Open (sourcefile, FileMode.Open))
    using (FileStream outStream = new FileStream (gzip, FileMode.CreateNew))
    using (GZipStream gzipStream =
        new GZipStream (outStream, CompressionMode.Compress))
        await inStream.CopyToAsync (gzipStream);

    if (deleteSource) File.Delete (sourcefile);
}

async Task GUnzip (string gzipfile, bool deleteGzip = true)
{
    if (Path.GetExtension (gzipfile) != ".gz")
        throw new Exception ("Not a gzip file");
        // Не файл gzip

    var uncompressedFile = gzipfile.Substring (0, gzipfile.Length - 3);
    if (File.Exists (uncompressedFile))
        throw new Exception ("Destination file already exists");
        // Целевой файл уже существует

    // Распаковка
    using (FileStream uncompressToStream =
        File.Open (uncompressedFile, FileMode.Create))
    using (FileStream zipfileStream = File.Open (gzipfile, FileMode.Open))
    using (var unzipStream =
        new GZipStream (zipfileStream, CompressionMode.Decompress))
        await unzipStream.CopyToAsync (uncompressToStream);

    if (deleteGzip) File.Delete (gzipfile);
}
```

Вот код, который сжимает файл:

```
await GZip ("/tmp/myfile.txt");           // Создает /tmp/myfile.txt.gz
```

А этот код его распаковывает:

```
await GUnzip ("/tmp/myfile.txt.gz")      // Создает /tmp/myfile.txt
```

Работа с ZIP-файлами

Классы ZipArchive и ZipFile из пространства имен System.IO.Compression поддерживают формат сжатия ZIP. Преимущество формата ZIP над DeflateStream и GZipStream заключается в том, что он также действует в качестве контейнера для множества файлов и совместим с ZIP-файлами, созданными с помощью проводника Windows.

Класс `ZipArchive` работает с потоками, тогда как `ZipFile` используется в более распространенном сценарии работы с файлами. (`ZipFile` является статическим вспомогательным классом для `ZipArchive`.)

Метод `CreateFromDirectory` класса `ZipFile` добавляет все файлы из указанного каталога в ZIP-файл:

```
ZipFile.CreateFromDirectory (@"d:\MyFolder", @"d:\archive.zip");
```

Метод `ExtractToDirectory` выполняет обратное действие, извлекая содержимое ZIP-файла в заданный каталог:

```
ZipFile.ExtractToDirectory(@"d:\archive.zip", @"d:\MyFolder");
```

(Начиная с версии .NET 8, можно также указывать объект `Stream` вместо пути к ZIP-файлу.)

При сжатии можно выбирать оптимизацию по размеру файла или по скорости, а также необходимость включения в архив имени исходного каталога. Последний вариант приведет к тому, что в нашем примере внутри архива создается подкаталог по имени `MyFolder`, куда будут помещены сжатые файлы.

Класс `ZipFile` имеет метод `Open`, предназначенный для чтения/записи индивидуальных элементов. Он возвращает объект `ZipArchive` (который также можно получить, создав экземпляр `ZipArchive` с объектом `Stream`). При вызове метода `Open` потребуется указать имя файла и действие, которое должно быть произведено с архивом — `Read` (чтение), `Create` (создание) или `Update` (обновление). Затем можно выполнить перечисление по существующим элементам через свойство `Entries` либо искать отдельный файл с помощью метода `GetEntry`:

```
using (ZipArchive zip = ZipFile.Open(@"d:\zz.zip", ZipArchiveMode.Read))
    foreach (ZipArchiveEntry entry in zip.Entries)
        Console.WriteLine (entry.FullName + " " + entry.Length);
```

В классе `ZipArchiveEntry` также есть методы `Delete`, `ExtractToFile` (на самом деле он представляет собой расширяющий метод из класса `ZipFileExtensions`) и `Open`, который возвращает экземпляр `Stream` с возможностью чтения/записи. Создавать новые элементы можно посредством вызова метода `CreateEntry` (или расширяющего метода `CreateEntryFromFile`) на `ZipArchive`. Приведенный ниже код создает архив `d:\zz.zip`, к которому добавляется файл `foo.dll` со структурой каталогов `bin\X86` внутри архива:

```
byte[] data = File.ReadAllBytes(@"d:\foo.dll");
using (ZipArchive zip = ZipFile.Open(@"d:\zz.zip", ZipArchiveMode.Update))
    zip.CreateEntry(@"bin\X64\foo.dll").Open().Write (data, 0, data.Length);
```

То же самое можно было бы сделать полностью в памяти, создав экземпляр `ZipArchive` с потоком `MemoryStream`.

Работа с файлами Tar

Типы в пространстве имен `System.Formats.Tar` (начиная с .NET 7) поддерживают формат архива `.tar`, популярный в системах Unix для объединения нескольких файлов.

Чтобы создать файл .tar (архив), вызовите TarFile.CreateDirectory:
TarFile.CreateDirectory ("/tmp/testfolder", "/tmp/test.tar", false);
(Третий аргумент указывает, включать ли имя базового каталога в записи архива.)

Для извлечения файлов из архива вызовите TarFile.ExtractToDirectory:
TarFile.ExtractToDirectory ("/tmp/test.tar", "/tmp/testfolder", true);
(Третий аргумент указывает, перезаписывать ли существующие файлы.)
Оба метода позволяют указывать объект Stream вместо пути к файлу .tar.
В следующем примере мы записываем архив в поток памяти, а затем используем GZipStream для сжатия этого потока в файл .tar.gz:

```
var ms = new MemoryStream();  
TarFile.CreateDirectory ("/tmp/testfolder", ms, false);  
ms.Position = 0; // So that we can re-use the stream for reading.  
using (var fs = File.Create ("/tmp/test.tar.gz"))  
using (var gz = new GZipStream (fs, CompressionMode.Compress))  
    ms.CopyTo (gz);
```

(Сжатие файла .tar в .tar.gz полезно, поскольку в отличие от формата .zip формат .tar сам по себе не поддерживает сжатие.) Вот как можно извлечь файл .tar.gz:

```
using (var fs = File.OpenRead ("/tmp/test.tar.gz"))  
using (var gz = new GZipStream (fs, CompressionMode.Decompress))  
    TarFile.ExtractToDirectory (gz, "/tmp/testfolder", true);
```

Доступ к API-интерфейсу возможен на более низком уровне с помощью классов TarReader и TarWriter. Ниже демонстрируется применение класса TarReader:

```
using (FileStream archiveStream = File.OpenRead ("/tmp/test.tar"))  
using (TarReader reader = new (archiveStream))  
    while (true)  
    {  
        TarEntry entry = reader.GetNextEntry();  
        if (entry == null) break; // Записей больше нет  
        Console.WriteLine (  
            $"Entry {entry.Name} is {entry.DataStream.Length} bytes long");  
        entry.ExtractToFile (  
            Path.Combine ("/tmp/testfolder", entry.Name), true);  
    }
```

Операции с файлами и каталогами

Пространство имен System.IO предоставляет набор типов для выполнения в отношении файлов и каталогов “обслуживающих” операций, таких как копирование и перемещение, создание каталогов и установка файловых атрибутов и прав доступа. Для большинства средств можно выбирать один из двух классов: первый предлагает статические методы, а второй — методы экземпляра.

Статические классы

File и Directory

Классы с методами экземпляра
(сконструированного с указанием имени файла или каталога)

FileInfo и DirectoryInfo

В добавок имеется статический класс по имени Path. Он ничего не делает с файлами или каталогами, а предоставляет методы строкового манипулирования для имен файлов и путей к каталогам. Класс Path также помогает при работе с временными файлами.

Класс File

File — это статический класс, все методы которого принимают имя файла. Имя файла может или указываться относительно текущего каталога, или быть полностью заданным, включая каталог. Ниже перечислены методы класса File (все они являются public и static):

```
bool Exists (string path); // Возвращает true, если файл существует
void Delete (string path);
void Copy (string sourceFileName, string destFileName);
void Move (string sourceFileName, string destFileName);
void Replace (string sourceFileName, string destinationFileName,
              string destinationBackupFileName);

FileAttributes GetAttributes (string path);
void SetAttributes (string path, FileAttributes fileAttributes);

void Decrypt (string path);
void Encrypt (string path);

DateTime GetCreationTime (string path);           // Также доступны
DateTime GetLastAccessTime (string path);         // версии UTC.
DateTime GetLastWriteTime (string path);

void SetCreationTime (string path, DateTime creationTime);
void SetLastAccessTime (string path, DateTime lastAccessTime);
void SetLastWriteTime (string path, DateTime lastWriteTime);

FileSecurity GetAccessControl (string path);
FileSecurity GetAccessControl (string path,
                               AccessControlSections includeSections);
void SetAccessControl (string path, FileSecurity fileSecurity);
```

Метод Move генерирует исключение, если файл назначения уже существует; метод Replace этого не делает. Оба метода позволяют переименовывать файл, а также перемещать его в другой каталог.

Метод Delete генерирует исключение UnauthorizedAccessException, если файл помечен как предназначенный только для чтения; ситуацию можно прояснить заранее, вызвав метод GetAttributes. Кроме того, он генерирует исключение, если ОС не выдает вашему процессу разрешение на удаление для этого файла. Метод GetAttributes возвращает значение перечисления FileMode со следующими членами:

Archive, Compressed, Device, Directory, Encrypted,
Hidden, IntegritySystem, Normal, NoScrubData, NotContentIndexed,
Offline, ReadOnly, ReparsePoint, SparseFile, System, Temporary

Члены перечисления `FileAttribute` допускают комбинирование. Ниже показано, как переключить один атрибут файла, не затрагивая остальные:

```
string filePath = "test.txt";
FileAttributes fa = File.GetAttributes(filePath);
if ((fa & FileAttributes.ReadOnly) != 0)
{
    // Использовать операцию исключающего ИЛИ (^) для переключения флага ReadOnly
    fa ^= FileAttributes.ReadOnly;
    File.SetAttributes(filePath, fa);
}
// Теперь можно удалить файл, например:
File.Delete(filePath);
```



Класс `FileInfo` предлагает более простой способ изменения флага доступности только для чтения, связанного с файлом:

```
new FileInfo("test.txt").IsReadOnly = false;
```

Атрибуты сжатия и шифрования



Данное средство поддерживается только в Windows и требует загрузки NuGet-пакета `System.Management`.

Атрибуты файла `Compressed` и `Encrypted` соответствуют флагам сжатия и шифрования в диалоговом окне *свойств* файла или каталога, которое можно открыть в проводнике Windows. Такой тип сжатия и шифрования *прозрачен* в том, что ОС делает всю работу “за кулисами”, позволяя читать и записывать простые данные.

Для изменения атрибута `Compressed` или `Encrypted` нельзя применять метод `SetAttributes` — если вы попытаетесь, то он молча откажется! В случае шифрования обойти проблему легко: нужно просто вызывать методы `Encrypt` и `Decrypt` класса `File`. В отношении сжатия ситуация сложнее; одно из решений предполагает использование API-интерфейса WMI (`Windows Management Instrumentation` — инструментарий управления Windows) из пространства имен `System.Management`. Следующий метод сжимает каталог, возвращая 0 в случае успеха (или код ошибки WMI в случае неудачи):

```
static uint CompressFolder(string folder, bool recursive)
{
    string path = "Win32_Directory.Name='\" + folder + \"'";
    using (ManagementObject dir = new ManagementObject(path))
    using (ManagementBaseObject p = dir.GetMethodParameters("CompressEx"))
    {
        p["Recursive"] = recursive;
        using (ManagementBaseObject result = dir.InvokeMethod("CompressEx",
            p, null))
        return (uint) result.Properties["ReturnValue"].Value;
    }
}
```

Для выполнения распаковки имя CompressEx понадобится заменить именем UncompressEx.

Прозрачное шифрование полагается на ключ, построенный на основе пароля пользователя, вошедшего в систему. Система устойчива к изменениям пароля, которые производятся аутентифицированным пользователем, но если пароль сбрасывается администратором, тогда данные в зашифрованных файлах восстановлению не подлежат.



Прозрачное шифрование и сжатие требуют специальной поддержки со стороны файловой системы. Файловая система NTFS (чаще всего применяемая на жестких дисках) такие возможности поддерживает, а CDFS (на компакт-дисках) и FAT (на сменных носителях) — нет.

Определить, поддерживает ли том сжатие и шифрование, можно посредством взаимодействия с Win32:

```
using System;
using System.IO;
using System.Text;
using System.ComponentModel;
using System.Runtime.InteropServices;

class SupportsCompressionEncryption
{
    const int SupportsCompression = 0x10;
    const int SupportsEncryption = 0x20000;

    [DllImport ("Kernel32.dll", SetLastError = true)]
    extern static bool GetVolumeInformation (string vol, StringBuilder name,
        int nameSize, out uint serialNum, out uint maxNameLen, out uint flags,
        StringBuilder fileSysName, int fileSysNameSize);

    static void Main()
    {
        uint serialNum, maxNameLen, flags;
        bool ok = GetVolumeInformation (@"C:\", null, 0, out serialNum,
                                         out maxNameLen, out flags, null, 0);
        if (!ok)
            throw new Win32Exception();

        bool canCompress = (flags & SupportsCompression) != 0;
        bool canEncrypt = (flags & SupportsEncryption) != 0;
    }
}
```

Безопасность файлов в Windows



Данное средство поддерживается только в Windows и требует загрузки NuGet-пакета System.IO.FileSystem.AccessControl.

Класс FileSecurity (из пространства имен System.Security.AccessControl) позволяет запрашивать и изменять права доступа ОС, назначенные пользователям и ролям.

В приведенном ниже примере мы выводим существующие права доступа к файлу, после чего назначаем права на выполнение группе Users:

```
using System;
using System.IO;
using System.Security.AccessControl;
using System.Security.Principal;
void ShowSecurity (FileSecurity sec)
{
    AuthorizationRuleCollection rules = sec.GetAccessRules (true, true,
                                                            typeof (NTAccount));
    foreach (FileSystemAccessRule r in rules.Cast<FileSystemAccessRule>()
        .OrderBy (rule => rule.IdentityReference.Value))
    {
        // Например, MyDomain/Joe
        Console.WriteLine ($" {r.IdentityReference.Value}");
        // Allow или Deny: например, FullControl
        Console.WriteLine ($" {r.FileSystemRights}: {r.AccessControlType}");
    }
}
var file = "sectest.txt";
File.WriteAllText (file, "File security test.");
var sid = new SecurityIdentifier (WellKnownSidType.BuiltinUsersSid, null);
string usersAccount = sid.Translate (typeof (NTAccount)).ToString();
Console.WriteLine ($"User: {usersAccount}");
FileSecurity sec = new FileSecurity (file,
                                      AccessControlSections.Owner |
                                      AccessControlSections.Group |
                                      AccessControlSections.Access);
Console.WriteLine ("AFTER CREATE:"); // После создания
ShowSecurity(sec); // Группа BUILTIN\Users не имеет права доступа Write
sec.ModifyAccessRule (AccessControlModification.Add,
    new FileSystemAccessRule (usersAccount, FileSystemRights.Write,
                             AccessControlType.Allow),
    out bool modified);
Console.WriteLine ("AFTER MODIFY:"); // После модификации
ShowSecurity (sec); // Группа BUILTIN\Users имеет права доступа Write
```

В разделе “Специальные папки” далее в главе будет представлен еще один пример.

Безопасность файлов в Unix

Начиная с версии .NET 7, в классе `File` определены методы `GetUnix FileMode` и `SetUnix FileMode`, предназначенные для получения и установки разрешений файлов в системах Unix. Метод `Directory.CreateDirectory` теперь также перегружен для принятия файлового режима Unix, и при создании файла можно указывать файловый режим следующим образом:

```
var fs = new FileStream ("test.txt",
    new FileStreamOptions
    {
        Mode = FileMode.Create,
        UnixCreateMode = Unix FileMode.UserRead | Unix FileMode.UserWrite
    });

```

Класс Directory

Статический класс `Directory` предлагает набор методов, аналогичных методам в классе `File` — для проверки существования каталога (`Exists`), для перемещения каталога (`Move`), для удаления каталога (`Delete`), для получения/установки времени создания или времени последнего доступа и для получения/установки разрешений безопасности. Кроме того, класс `Directory` открывает доступ к следующим статическим методам:

```
string GetCurrentDirectory ();
void SetCurrentDirectory (string path);

DirectoryInfo CreateDirectory (string path);
 DirectoryInfo GetParent (string path);
 string GetDirectoryRoot (string path);

string[] GetLogicalDrives(); // Получает точки монтирования в Unix

// Все перечисленные ниже методы возвращают полные пути:
string[] GetFiles (string path);
string[] GetDirectories (string path);
string[] GetFileSystemEntries (string path);

IEnumerable<string> EnumerateFiles (string path);
IEnumerable<string> EnumerateDirectories (string path);
IEnumerable<string> EnumerateFileSystemEntries (string path);
```



Последние три метода потенциально более эффективны, чем варианты `Get*`, т.к. к ним применяется ленивое выполнение — данные извлекаются из файловой системы при перечислении последовательности. Методы `Enumerate*` особенно хорошо подходят для запросов LINQ.

Методы `Enumerate*` и `Get*` перегружены, чтобы также принимать параметры `searchPattern` (строка) и `searchOption` (перечисление). В случае указания `SearchOption.SearchAllSubDirectories` будет выполняться рекурсивный поиск в подкаталогах. Методы `*FileSystemEntries` комбинируют результаты методов `*Files` и `*Directories`.

Вот как создать каталог, если он еще не существует:

```
if (!Directory.Exists(@"d:\test"))
    Directory.CreateDirectory(@"d:\test");
```

FileInfo и DirectoryInfo

Статические методы классов `File` и `Directory` удобны для выполнения одиночной операции над файлом или каталогом. Если необходимо вызвать последовательность методов подряд, то классы `FileInfo` и `DirectoryInfo` предоставляют объектную модель, которая облегчает работу.

Класс `FileInfo` предлагает большинство статических методов класса `File` в форме методов экземпляра — с несколькими дополнительными свойствами вроде `Extension`, `Length`, `IsReadOnly` и `Directory` — для возвращения объекта `DirectoryInfo`. Например:

```

static string TestDirectory =>
    RuntimeInformation.IsOSPlatform(OSPlatform.Windows)
    ? @"C:\Temp"
    : "/tmp";
Directory.CreateDirectory (TestDirectory);
FileInfo fi = new FileInfo (Path.Combine (TestDirectory, "FileInfo.txt"));
Console.WriteLine (fi.Exists);           // False
using (TextWriter w = fi.CreateText())
    w.Write ("Some text");

Console.WriteLine (fi.Exists);           // False (по-прежнему)
fi.Refresh();
Console.WriteLine (fi.Exists);           // True
Console.WriteLine (fi.Name);             // FileInfo.txt
Console.WriteLine (fi.FullName);          // c:\temp\FileInfo.txt (Windows)
                                         // /tmp/FileInfo.txt (Unix)
Console.WriteLine (fi.DirectoryName);    // c:\temp (Windows)
                                         // /tmp (Unix)
Console.WriteLine (fi.Directory.Name);   // temp
Console.WriteLine (fi.Extension);        // .txt
Console.WriteLine (fi.Length);           // 9

fi.Encrypt();
fi.Attributes ^= FileAttributes.Hidden; // (Переключает флаг скрытости)
fi.IsReadOnly = true;

Console.WriteLine (fi.Attributes);        // ReadOnly,Archive,Hidden,Encrypted
Console.WriteLine (fi.CreationTime);     // 3/09/2019 1:24:05 PM

fi.MoveTo (Path.Combine (TestDirectory, "FileInfoX.txt"));

 DirectoryInfo di = fi.Directory;
Console.WriteLine (di.Name);             // temp или tmp
Console.WriteLine (di.FullName);          // c:\temp или /tmp
Console.WriteLine (di.Parent.FullName);   // c:\ или /
di.CreateSubdirectory ("SubFolder");

```

А вот как использовать класс DirectoryInfo для перечисления файлов и подкаталогов:

```

DirectoryInfo di = new DirectoryInfo (@"e:\photos");
foreach (FileInfo fi in di.GetFiles ("*.jpg"))
    Console.WriteLine (fi.Name);
foreach (DirectoryInfo subDir in di.GetDirectories())
    Console.WriteLine (subDir.FullName);

```

Path

В статическом классе Path определены методы и поля для работы с путями и именами файлов.

Предположим, что имеются следующие определения:

```

string dir = @"c:\mydir";                // или /mydir
string file = "myfile.txt";
string path = @"c:\mydir\myfile.txt";      // или /mydir/myfile.txt
Directory.SetCurrentDirectory (@"k:\demo"); // или /demo

```

Ниже приведены выражения, демонстрирующие применение методов и полей класса Path.

Выражение	Результат (Windows, Unix)
Directory.GetCurrentDirectory()	k:\demo\ или /demo
Path.IsPathRooted (file)	false
Path.IsPathRooted (path)	true
Path.GetPathRoot (path)	c:\ или /
Path.GetDirectoryName (path)	c:\mydir или /mydir
Path.GetFileName (path)	myfile.txt
Path.GetFullPath (file)	k:\demo\myfile.txt или /demo/myfile.txt
Path.Combine (dir, file)	c:\mydir\myfile.txt или /mydir/myfile.txt
Файловые расширения:	
Path.HasExtension (file)	true
Path.GetExtension (file)	.txt
Path.GetFileNameWithoutExtension (file)	myfile
Path.ChangeExtension (file, ".log")	myfile.log
Разделители и символы:	
Path.DirectorySeparatorChar	\ или /
Path.AltDirectorySeparatorChar	/
Path.PathSeparator	; или :
Path.VolumeSeparatorChar	: или /
Path.GetInvalidPathChars()	символы от 0 до 31 и "<> или 0
Path.GetInvalidFileNameChars()	символы от 0 до 31 и "<> :*?\ или 0 и /
Временные файлы:	
Path.GetTempPath()	<папка локального пользователя>\Temp или /tmp/
Path.GetRandomFileName()	d2dwuzjf.dnp
Path.GetTempFileName()	<папка локального пользователя>\Temp\tmp14B.tmp или /tmp/tmpubSUYO.tmp

Метод Combine особенно полезен: он позволяет комбинировать каталог и имя файла (или два каталога) без предварительной проверки, присутствует ли завершающий разделитель пути, и автоматически использует корректный разделитель пути для ОС. Для Combine имеются перегруженные версии, принимающие вплоть до четырех имен каталогов и/или файлов.

Метод `GetFullPath` преобразует путь, указанный относительно текущего каталога, в абсолютный путь. Он принимает значения, подобные `..\..\file.txt`.

Метод `GetRandomFileName` возвращает по-настоящему уникальное символьное имя в формате 8.3, не создавая файла. Метод `GetTempFileName` генерирует временное имя файла с использованием автоинкрементного счетчика, который повторяется для каждого 65 000 файлов. Затем он создает в локальном временном каталоге пустой файл с таким именем.



По завершении работы с файлом, имя которого сгенерировано методом `GetTempFileName`, вы должны его удалить; иначе со временем возникнет исключение (после 65 000 вызовов `GetTempFileName`).

Если это проблематично, тогда для результатов выполнения `GetTempPath` и `GetRandomFileName` можно вызвать метод `Combine`. Только будьте осторожны, чтобы не переполнить жесткий диск пользователя!

Специальные папки

В классах `Path` и `Directory` отсутствует средство нахождения таких папок, как `My Documents`, `Program Files`, `Application Data` и т.д. Взамен задача решается с помощью метода `GetFolderPath` класса `System.Environment`:

```
string myDocPath = Environment.GetFolderPath  
    (Environment.SpecialFolder.MyDocuments);
```

Тип `Environment.SpecialFolder` представляет собой перечисление со значениями, охватывающими все специальные каталоги в Windows, такими как `AdminTools`, `ApplicationData`, `Fonts`, `History`, `SendTo`, `StartMenu` и т.д. Они покрывают все кроме каталога исполняющей среды .NET, который можно получить следующим образом:

```
System.Runtime.InteropServices.RuntimeEnvironment.GetRuntimeDirectory()
```



Большинство специальных папок в системах Unix не имеют назначенных путей. В Ubuntu Linux 18.04 Desktop пути имеют следующие специальные папки: `ApplicationData`, `CommonApplicationData`, `Desktop`, `DesktopDirectory`, `LocalApplicationData`, `MyDocuments`, `MyMusic`, `MyPictures`, `MyVideos`, `Templates` и `UserProfile`.

Особую ценность в системах Windows представляет каталог `ApplicationData`: именно здесь можно хранить настройки, которые перемещаются с пользователем по сети (если блюздающие профили разрешены в домене сети), а также каталог `LocalApplicationData`, предназначенный для неперемещаемых данных (специфичных для зарегистрированного пользователя), и каталог `CommonApplicationData`, который совместно используется всеми пользователями компьютера. Запись данных приложения в указанные папки считается предпочтительнее применения реестра Windows. Стандартный протокол сохранения данных в этих каталогах предусматривает создание подкаталога с именем, которое совпадает с названием приложения:

```

string localAppDataPath = Path.Combine (
    Environment.GetFolderPath (Environment.SpecialFolder.ApplicationData),
    "MyCoolApplication");
if (!Directory.Exists (localAppDataPath))
    Directory.CreateDirectory (localAppDataPath);

```

При работе с каталогом CommonApplicationData можно попасть в одну коварную ловушку: если пользователь запускает программу с повышенными административными полномочиями, после чего она создает папки и файлы в CommonApplicationData, то пользователю может не хватить полномочий для замены этих файлов позже, когда он запустит программу от имени обычной учетной записи. (Похожая проблема возникает при переключении между учетными записями с ограниченными полномочиями.) Такую проблему можно обойти за счет создания желаемой папки (с правами доступа для кого угодно) как части процесса установки.

Еще одним местом для записи конфигурационных и журнальных файлов является базовый каталог приложения, который можно получить с помощью свойства AppDomain.CurrentDomain.BaseDirectory. Однако поступать подобным образом не рекомендуется, потому что ОС, вероятно, не разрешит приложению записывать в этот каталог после первоначальной установки (без повышения прав до администратора).

Запрашивание информации о томе

Запрашивать информацию об устройствах на компьютере можно посредством класса DirectoryInfo:

```

DriveInfo c = new DriveInfo ("C");           // Запросить устройство C:.
                                              // В Unix: /
long totalSize = c.TotalSize;                // Объем в байтах.
long freeBytes = c.TotalFreeSpace;           //忽рорирует дисковую квоту.
long freeToMe = c.AvailableFreeSpace;         // Учитывает дисковую квоту.
foreach (DriveInfo d in DriveInfo.GetDrives()) // Все определенные устройства
                                              // В Unix: точки монтирования
{
    Console.WriteLine (d.Name);                // C:\ 
    Console.WriteLine (d.DriveType);            // Жесткий диск
    Console.WriteLine (d.RootDirectory);        // C:\ 
    if (d.IsReady)                            // Если устройство не готово, то следующие
                                              // два свойства сгенерируют исключения:
    {
        Console.WriteLine (d.VolumeLabel);      // The Sea Drive
        Console.WriteLine (d.DriveFormat);       // NTFS
    }
}

```

Статический метод GetDrives возвращает все отображенные устройства, включая приводы компакт-дисков, карты памяти и сетевые устройства. DriveType представляет собой перечисление со следующими значениями:

Unknown, NoRootDirectory, Removable, Fixed, Network, CDRom, Ram

Перехват событий файловой системы

Класс `FileSystemWatcher` позволяет отслеживать действия, производимые над каталогом (и дополнительно над его подкаталогами). Класс `FileSystemWatcher` поддерживает события, которые инициируются при создании, модификации, переименовании и удалении файлов или подкаталогов, а также при изменении их атрибутов. События выдаются независимо от инициатора изменения — пользователя или процесса. Ниже приведен пример:

```
Watch (GetTestDirectory(), "*.txt", true);
void Watch (string path, string filter, bool includeSubDirs)
{
    using (var watcher = new FileSystemWatcher (path, filter))
    {
        watcher.Created += FileCreatedChangedDeleted;
        watcher.Changed += FileCreatedChangedDeleted;
        watcher.Deleted += FileCreatedChangedDeleted;
        watcher.Renamed += FileRenamed;
        watcher.Error += FileError;

        watcher.IncludeSubdirectories = includeSubDirs;
        watcher.EnableRaisingEvents = true;

        // Прослушивание событий; завершение по нажатию <Enter>
        Console.WriteLine ("Listening for events - press <enter> to end");
        Console.ReadLine();
    }
    // Освобождение экземпляра FileSystemWatcher останавливает
    // дальнейшую выдачу событий
}

// Файл создан, изменен или удален
void FileCreatedChangedDeleted (object o, FileSystemEventArgs e)
    => Console.WriteLine ("File {0} has been {1}", e.FullPath, e.ChangeType);

// Файл переименован
void FileRenamed (object o, RenamedEventArgs e)
    => Console.WriteLine ("Renamed: {0}->{1}", e.OldFullPath, e.FullPath);

// Возникла ошибка
void FileError (object o, ErrorEventArgs e)
    => Console.WriteLine ("Error: " + e.GetException().Message);

string GetTestDirectory () =>
    RuntimeInformation.IsOSPlatform (OSPlatform.Windows)
    ? @"C:\Temp"
    : "/tmp";
```



Поскольку `FileSystemWatcher` инициирует события в отдельном потоке, для кода обработки событий должен быть предусмотрен перехват исключений, чтобы предотвратить нарушение работы приложения из-за возникновения ошибки. За дополнительной информацией обращайтесь в раздел “Обработка исключений” главы 14.

Событие `Error` не информирует об ошибках, связанных с файловой системой; взамен оно отражает факт переполнения буфера событий `FileSystemWatcher` событиями `Changed`, `Created`, `Deleted` или `Renamed`. Изменить размер буфера можно с помощью свойства `InternalBufferSize`.

Свойство `IncludeSubdirectories` применяется рекурсивно. Таким образом, если создать экземпляр `FileSystemWatcher` для `C:\` со свойством `IncludeSubdirectories`, установленным в `true`, то события будут инициироваться при изменении любого файла или каталога на всем жестком диске `C:`.



Ловушка, в которую можно попасть при использовании `FileSystemWatcher`, связана с открытием и чтением вновь созданных или обновленных файлов до того, как полностью завершится их наполнение или обновление. Если вы работаете совместно с каким-то другим программным обеспечением, создающим файлы, то потребуется предусмотреть некоторую стратегию по смягчению проблемы, например, создание файлов с неотслеживаемым расширением и затем их переименование после завершения записи.

Безопасность, обеспечивающая операционной системой

На все приложения распространяются ограничения ОС, основанные на привилегиях учетной записи пользователя. Такие ограничения влияют на файловый ввод-вывод и другие возможности наподобие доступа к реестру `Windows`.

В `Windows` и `Unix` существуют два типа учетных записей:

- учетная запись администратора/суперпользователя, не накладывающая никаких ограничений в плане доступа на локальном компьютере;
- учетная запись с ограниченными разрешениями, которая сужает административные функции и видимость данных других пользователей.

В среде `Windows` функциональное средство под названием контроль учетных записей пользователей (`User Account Control — UAC`) означает, что администраторы при входе получают два маркера: административный маркер и маркер рядового пользователя. По умолчанию программы запускаются под маркером рядового пользователя — с ограниченными разрешениями — при условии, что программа не требует *повышения административных полномочий*. Затем пользователь обязан утвердить запрос в открывшемся диалоговом окне.

В `Unix` пользователи обычно входят в систему с помощью ограниченных учетных записей. Это также справедливо в отношении администраторов, т.к. позволяет уменьшить вероятность неумышленного повреждения системы. Когда пользователю нужно выполнить команду, которая требует повышенных разрешений, он предваряет ее командой `sudo`.

По умолчанию ваше приложение будет запускаться с ограниченными привилегиями пользователя. Таким образом, вы должны придерживаться одного из следующих подходов.

- Писать свое приложение так, чтобы оно могло запускаться без административных привилегий.
- Требовать повышения административных полномочий в манифесте приложения (только Windows) или обнаруживать нехватку обязательных привилегий и предупредить пользователя о необходимости перезапуска приложения от имени администратора/суперпользователя.

Первый подход безопаснее и удобнее для пользователя. Проектировать программу для запуска без административных привилегий в большинстве случаев легко. Вот как можно узнать, работает ли вы под учетной записью администратора:

```
[DllImport("libc")]
public static extern uint getuid();
static bool IsRunningAsAdmin()
{
    if (RuntimeInformation.IsOSPlatform(OSPlatform.Windows))
    {
        using var identity = WindowsIdentity.GetCurrent();
        var principal = new WindowsPrincipal(identity);
        return principal.IsInRole(WindowsBuiltInRole.Administrator);
    }
    return getuid() == 0;
}
```

При включенном средстве UAC в Windows функция `IsRunningAsAdmin` возвращает `true`, только если текущий процесс имеет повышенные административные полномочия. В Linux она возвращает `true`, только если текущий процесс был запущен от имени суперпользователя (например, `sudo myapp`).

Выполнение под учетной записью стандартного пользователя

Ниже перечислены ключевые действия, которые *не удастся* предпринять под учетной записью стандартного пользователя:

- записывать в следующие каталоги:
- каталог ОС (обычно `\Windows` или `/bin`, `/sbin`, ...) и его подкаталоги;
- каталог файлов программ (`\Program Files` или `/usr/bin`, `/opt`) и его подкаталоги;
- корневой каталог диска с ОС (например, `C:\` или `/`).
- записывать в ветвь `HKEY_LOCAL_MACHINE` реестра (Windows);
- читать данные мониторинга производительности (Windows).

Кроме того, как рядовому пользователю Windows (или даже как администратору), вам может быть отказано в доступе к файлам или ресурсам, которые принадлежат другим пользователям. В Windows для защиты таких ресурсов используется система списков управления доступом (Access Control List — ACL) — вы можете запрашивать и заявлять собственные права в списках ACL через типы

из пространства имен `System.Security.AccessControl`. Списки ACL можно также применять к межпроцессным дескрипторам ожидания, описанным в главе 21.

Если вам отказано в доступе к чему-либо из-за мер безопасности, обеспечивающих ОС, тогда среда CLR обнаруживает отказ и генерирует исключение `UnauthorizedAccessException` (вместо молчаливого сбоя).

В большинстве случаев вы можете иметь дело с ограничениями стандартного пользователя так, как описано далее.

- Записывать файлы в их рекомендуемые места.
- Избегать использования реестра для хранения информации, которая может содержаться в файлах (кроме раздела `HKEY_CURRENT_USER`, к которому вы будете иметь доступ по чтению/записи только в Windows).
- Регистрировать компоненты ActiveX или COM во время установки (только в Windows).

Рекомендованным местом для документов пользователя является `SpecialFolder.MyDocuments`:

```
string docsFolder = Environment.GetFolderPath  
    (Environment.SpecialFolder.MyDocuments);  
  
string path = Path.Combine (docsFolder, "test.txt");
```

Рекомендованным местом для конфигурационных файлов, которые пользователь может пожелать модифицировать за рамками вашего приложения, выглядит как `SpecialFolder.ApplicationData` (только текущий пользователь) или `SpecialFolder.CommonApplicationData` (все пользователи). Обычно вы будете создавать подкаталоги в упомянутых каталогах, основываясь на вашей организации и названии продукта.

Повышение административных полномочий и виртуализация

С помощью *манифеста приложения* вы можете затребовать, чтобы ОС Windows запрашивала у пользователя повышения административных полномочий всякий раз, когда запускается ваша программа (в ОС Linux такое требование игнорируется):

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>  
<assembly manifestVersion="1.0" xmlns="urn:schemas-microsoft-com:asm.v1">  
  <trustInfo xmlns="urn:schemas-microsoft-com:asm.v2">  
    <security>  
      <requestedPrivileges>  
        <requestedExecutionLevel level="requireAdministrator" />  
      </requestedPrivileges>  
    </security>  
  </trustInfo>  
</assembly>
```

(Манифести приложений более подробно рассматриваются в главе 17.)

Замена `requireAdministrator` на `asInvoker` сообщает Windows о том, что повышение административных полномочий не требуется. Эффект будет почти таким же, как отсутствие манифеста приложения, но только с отключенной *виртуализацией*. Виртуализация — это временная мера, введенная в Windows Vista для корректной работы старых приложений без административных привилегий. Отсутствие манифеста приложения с элементом `requestedExecutionLevel` активизирует такое средство обратной совместимости.

Виртуализация вступает в игру, когда приложение выполняет запись в каталог `Program Files` или `Windows` либо в раздел `HKEY_LOCAL_MACHINE` реестра. Вместо генерации исключения изменения направляются в отдельное место на жестком диске, где они не могут повлиять на первоначальные данные. В итоге приложение не создает помехи ОС или другим normally функционирующем приложениям.

Размещенные в памяти файлы

Размещенные в памяти файлы поддерживают две основные функции:

- эффективный произвольный доступ к данным файла;
- возможность разделения памяти между различными процессами на одном и том же компьютере.

Типы для размещенных в памяти файлов находятся в пространстве имен `System.IO.MemoryMappedFiles`. Внутренне они работают через API-интерфейс ОС, предназначенный для размещенных в памяти файлов.

Размещенные в памяти файлы и произвольный файловый ввод-вывод

Хотя обычный класс `FileStream` допускает произвольный файловый ввод-вывод (за счет установки свойства `Position` потока), он оптимизирован для последовательного ввода-вывода. Ниже описаны грубые эмпирические правила:

- при последовательном вводе-выводе экземпляры `FileStream` примерно в 10 раз быстрее размещенных в памяти файлов;
- при произвольном вводе-выводе размещенные в памяти файлы примерно в 10 раз быстрее экземпляров `FileStream`.

Изменение свойства `Position` экземпляра `FileStream` может занимать несколько микросекунд — и задержка будет накапливаться, когда это делается в цикле. Класс `FileStream` непригоден для многопоточного доступа, т.к. по мере чтения или записи позиция в нем изменяется.

Чтобы создать размещенный в памяти файл, выполните следующие действия.

1. Получите объект файлового потока (`FileStream`) обычным образом.
2. Создайте экземпляр класса `MemoryMappedFile`, передав его конструктору объект файлового потока.
3. Вызовите метод `CreateViewAccessor` на объекте размещенного в памяти файла.

Выполнение последнего действия приводит к получению объекта `MemoryMappedViewAccessor`, который предоставляет методы для произвольного чтения и записи простых типов, структур и массивов (более подробно об этом речь пойдет в разделе “Работа с аксессорами представлений” далее в главе).

Приведенный ниже код создает файл с одним миллионом байтов и затем использует API-интерфейс размещенных в памяти файлов для чтения и записи байта в позиции 500 000:

```
File.WriteAllBytes ("long.bin", new byte [1000000]);
using MemoryMappedFile mmf = MemoryMappedFile.CreateFromFile ("long.bin");
using MemoryMappedViewAccessor accessor = mmf.CreateViewAccessor();
accessor.Write (500000, (byte) 77);
Console.WriteLine (accessor.ReadByte (500000)); // 77
```

При вызове метода `CreateFromFile` можно также задавать имя размещенного в памяти файла и емкость. Указание отличающегося от `null` имени позволяет разделять блок памяти с другими процессами (как описано в следующем разделе); указание емкости автоматически увеличивает файл до такого значения. Вот как создать файл из 1000 байтов:

```
File.WriteAllBytes ("short.bin", new byte [1]);
using (var mmf = MemoryMappedFile.CreateFromFile
    ("short.bin", FileMode.Create, null, 1000))
...
```

Размещенные в памяти файлы и совместно используемая память (Windows)

В среде Windows размещенные в памяти файлы можно также применять в качестве средства для совместного использования памяти между процессами, которые функционируют на одном компьютере. Один из процессов создает блок такой памяти, вызывая `MemoryMappedFile.CreateNew`, и затем другие процессы подписываются на этот блок памяти, вызывая метод `MemoryMappedFile.OpenExisting` с тем же именем. Хотя на данный блок по-прежнему ссылаются как на размещенный в памяти “файл”, он располагается полностью в памяти и не имеет никаких представлений на диске.

Следующий код создает размещенный в памяти совместно используемый файл из 500 байтов и записывает целочисленное значение 12345 в позицию 0:

```
using (MemoryMappedFile mmFile = MemoryMappedFile.CreateNew ("Demo", 500))
using (MemoryMappedViewAccessor accessor = mmFile.CreateViewAccessor())
{
    accessor.Write (0, 12345);
    Console.ReadLine (); // Сохранить совместно используемую память действующей
                        // вплоть до нажатия пользователем <Enter>
}
```

Показанный ниже код открывает тот же самый размещенный в памяти файл и читает из него упомянутое целочисленное значение:

```
// Этот код может быть запущен в отдельном исполняемом файле:
using (MemoryMappedFile mmFile = MemoryMappedFile.OpenExisting ("Demo"))
using (MemoryMappedViewAccessor accessor = mmFile.CreateViewAccessor())
    Console.WriteLine (accessor.ReadInt32 (0)); // 12345
```

Межплатформенная память, совместно используемая процессами

ОС Windows и Unix позволяют множеству процессов размещать в памяти тот же самый файл. Вы должны позаботиться о соответствующих настройках общего доступа к файлу:

```
static void Writer()
{
    var file = Path.Combine (TestDirectory, "interprocess.bin");
    File.WriteAllBytes (file, new byte [100]);

    using FileStream fs =
        new FileStream (file, FileMode.Open, FileAccess.ReadWrite,
                        FileShare.ReadWrite);

    using MemoryMappedFile mmf = MemoryMappedFile
        .CreateFromFile (fs, null, fs.Length, MemoryMappedFileAccess.ReadWrite,
                         HandleInheritance.None, true);
    using MemoryMappedViewAccessor accessor = mmf.CreateViewAccessor();
    accessor.Write (0, 12345);

    Console.ReadLine(); // Сохранить совместно используемую память действующей
                        // вплоть до нажатия пользователем <Enter>

    File.Delete (file);
}

static void Reader()
{
    // Этот код может быть запущен в отдельном исполняемом файле:
    var file = Path.Combine (TestDirectory, "interprocess.bin");
    using FileStream fs =
        new FileStream (file, FileMode.Open, FileAccess.ReadWrite,
                        FileShare.ReadWrite);
    using MemoryMappedFile mmf = MemoryMappedFile
        .CreateFromFile (fs, null, fs.Length, MemoryMappedFileAccess.ReadWrite,
                         HandleInheritance.None, true);
    using MemoryMappedViewAccessor accessor = mmf.CreateViewAccessor();
    Console.WriteLine (accessor.ReadInt32 (0)); // 12345
}

static string TestDirectory =>
    RuntimeInformation.IsOSPlatform (OSPlatform.Windows)
    ? @"C:\Test"
    : "/tmp";
```

Работа с аксессорами представлений

Вызов метода `CreateViewAccessor` на экземпляре `MemoryMappedFile` дает в результате аксессор представления, который позволяет выполнять чтение и запись в произвольные позиции.

Методы `Read*/Write*` принимают числовые типы, `bool` и `char`, а также массивы и структуры, которые содержат элементы или поля типов значений. Ссыльные типы — и содержащие ссыльные типы массивы либо структуры — запрещены, поскольку они не могут отображаться на неуправляемую память.

Таким образом, чтобы записать строку, ее потребуется закодировать в массив байтов:

```
byte[] data = Encoding.UTF8.GetBytes ("This is a test");
accessor.Write (0, data.Length);
accessor.WriteArray (4, data, 0, data.Length);
```

Обратите внимание, что первой записывается длина; позже это позволит выяснить, сколько байтов необходимо прочитать:

```
byte[] data = new byte [accessor.ReadInt32 (0)];
accessor.ReadArray (4, data, 0, data.Length);
Console.WriteLine (Encoding.UTF8.GetString (data)); // Выводит This is a test
```

Ниже приведен пример чтения/записи структуры:

```
struct Data { public int X, Y; }
...
var data = new Data { X = 123, Y = 456 };
accessor.Write (0, ref data);
accessor.Read (0, out data);
Console.WriteLine (data.X + " " + data.Y); // Выводит 123 456
```

Методы Read и Write работают на удивление медленно. Намного лучшей производительности можно добиться, напрямую получая доступ к неуправляемой памяти через указатель. Следующий код продолжает предыдущий пример:

```
unsafe
{
    byte* pointer = null;
    try
    {
        accessor.SafeMemoryMappedViewHandle.AcquirePointer (ref pointer);
        int* intPointer = (int*) pointer;
        Console.WriteLine (*intPointer); // 123
    }
    finally
    {
        if (pointer != null)
            accessor.SafeMemoryMappedViewHandle.ReleasePointer();
    }
}
```

Ваш проект должен быть сконфигурирован так, чтобы разрешать небезопасный код. Для этого отредактируйте файл .csproj:

```
<PropertyGroup>
    <AllowUnsafeBlocks>true</AllowUnsafeBlocks>
</PropertyGroup>
```

Преимущество указателей в плане производительности проявляется еще ярче при работе с крупными структурами, т.к. они позволяют иметь дело непосредственно с низкоуровневыми данными, а не использовать методы Read/Write для копирования данных между управляемой и неуправляемой памятью. Это будет подробно рассматриваться в главе 24.



Взаимодействие с сетью

.NET предлагает в пространствах имен `System.Net.*` множество классов, предназначенных для организации взаимодействия через стандартные сетевые протоколы, такие как HTTP и TCP/IP. Ниже приведен краткий перечень основных компонентов:

- класс `HttpClient` для работы с API-интерфейсами HTTP и веб-службами REST;
- класс `HttpListener` для реализации HTTP-сервера;
- класс `SmtpClient` для формирования и отправки почтовых сообщений через SMTP;
- класс `Dns` для преобразований между доменными именами и адресами;
- классы `TcpClient`, `UdpClient`, `TcpListener` и `Socket` для прямого доступа к транспортному и сетевому уровням.

Типы .NET, рассматриваемые в данной главе, находятся в пространствах имен `System.Net.*` и `System.IO`.



.NET также обеспечивает поддержку FTP на стороне клиента, но только через классы, которые помечены как устаревшие, начиная с версии .NET 6. Если вам нужно использовать FTP, то лучше всего задействовать библиотеку NuGet, подобную FluentFTP.

Сетевая архитектура

На рис. 16.1 показаны типы .NET для работы с сетью и коммуникационные уровни, к которым они относятся. Большинство типов взаимодействуют с *транспортным уровнем* или с *прикладным уровнем*. Транспортный уровень определяет базовые протоколы для отправки и получения байтов (TCP и UDP), а прикладной уровень — высокоуровневые протоколы, предназначенные для конкретных применений, таких как извлечение веб-страниц (HTTP), отправка сообщений электронной почты (SMTP) и преобразование между доменными именами и IP-адресами (DNS).

Прикладной уровень

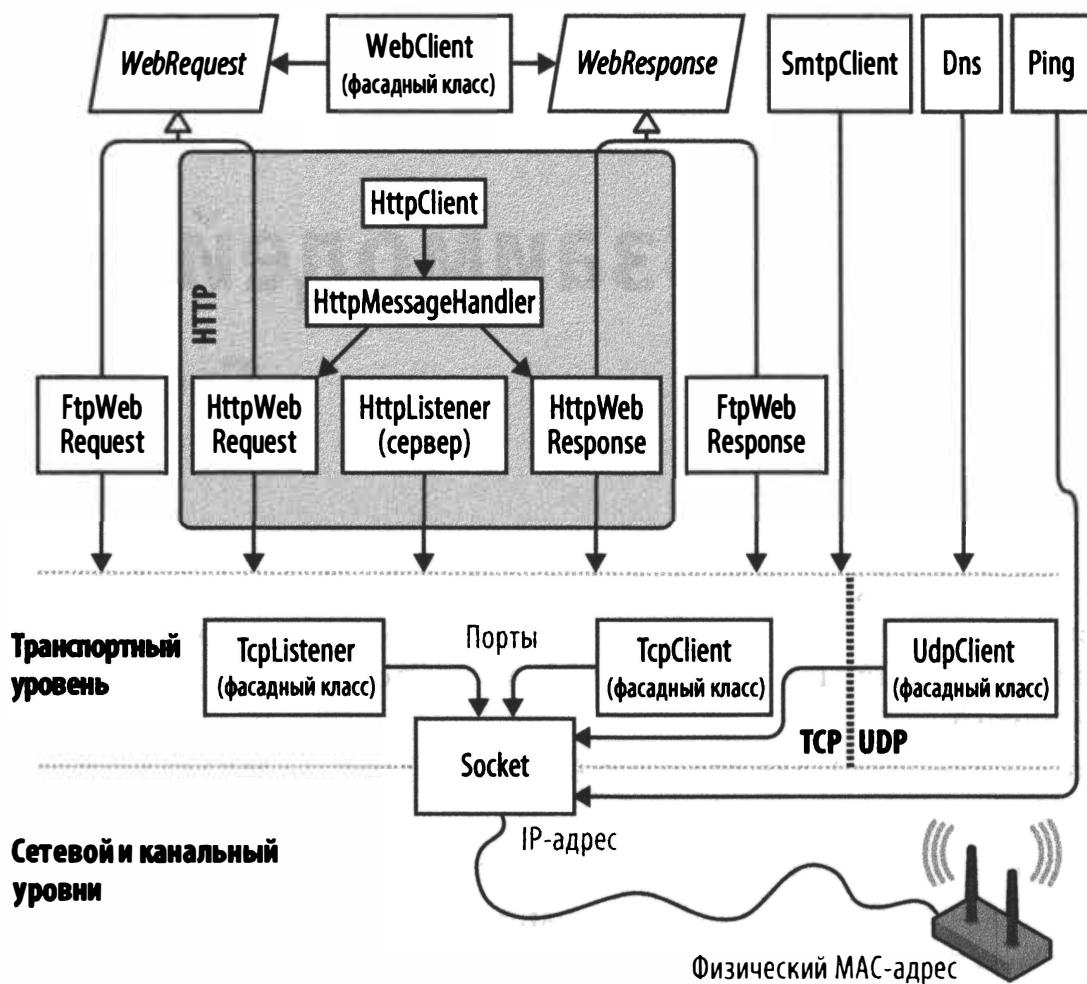


Рис. 16.1. Сетевая архитектура

Обычно удобнее всего программировать на прикладном уровне; тем не менее, есть пара причин, по которым может требоваться работа непосредственно на транспортном уровне. Одна из них связана с необходимостью взаимодействия с прикладным протоколом, не предоставляемым .NET, таким как POP3 для извлечения сообщений электронной почты. Другая причина касается реализации нестандартного протокола для специального приложения, подобного клиенту одноранговой сети.

Внутри набора прикладных протоколов особенность протокола HTTP заключается в том, что он применим к универсальным коммуникациям. Его основной режим работы — “предоставьте мне веб-страницу по заданному URL” — хорошо приспосабливается к варианту “предоставьте мне результат обращения к этой конечной точке с заданными аргументами”. (В дополнение к команде GET имеются команды PUT, POST и DELETE, делая возможными веб-службы на основе REST.)

Протокол HTTP также располагает богатым набором средств, которые полезны в многоуровневых бизнес-приложениях и архитектурах, ориентированных на службы. В их число входят протоколы для аутентификации и шифрования, разбиение сообщений на части, расширяемые заголовки и cookie-наборы, а также возможность совместного использования единственного порта и IP-адреса несколькими серверными приложениями. По этим причинам протокол HTTP

широко поддерживается в .NET — и напрямую, как описано в текущей главе, и на более высоком уровне через такие технологии, как Web API и ASP.NET Core.

Из предыдущего обсуждения должно быть ясно, что работа в сети представляет собой область, которая изобилует аббревиатурами. Самые распространенные аббревиатуры объясняются в табл. 16.1.

Таблица 16.1. Аббревиатуры, связанные с сетью

Аббревиатура	Расшифровка	Примечания
DNS	Domain Name Service (служба доменных имен)	Выполняет преобразования между доменными именами (скажем, ebay.com) и IP-адресами (например, 199.54.213.2)
FTP	File Transfer Protocol (протокол передачи файлов)	Используемый в Интернете протокол для отправки и получения файлов
HTTP	Hypertext Transfer Protocol (протокол передачи гипертекста)	Извлекает веб-страницы и запускает веб-службы
IIS	Internet Information Services (информационные службы Интернета)	Программное обеспечение веб-сервера производства Microsoft
IP	Internet Protocol (протокол Интернета)	Протокол сетевого уровня, находящийся ниже TCP и UDP
LAN	Local Area Network (локальная вычислительная сеть)	Большинство локальных вычислительных сетей применяют основанные на Интернете протоколы, такие как TCP/IP
POP	Post Office Protocol (протокол почтового офиса)	Извлекает сообщения электронной почты Интернета
REST	REpresentational State Transfer (передача состояния представления)	Популярная архитектура веб-служб, которая использует ссылки в ответах и может работать поверх базового протокола HTTP
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol (простой протокол передачи почты)	Отправляет сообщения электронной почты Интернета
TCP	Transmission and Control Protocol (протокол управления передачей)	Интернет-протокол транспортного уровня, поверх которого построено большинство служб более высокого уровня
UDP	Universal Datagram Protocol (универсальный протокол передачи дейтаграмм)	Интернет-протокол транспортного уровня, применяемый для служб с низкими накладными расходами, таких как VoIP
UNC	Universal Naming Convention (соглашение об универсальном назначении имен)	\\\компьютер\имя_общего_ресурса\имя_файла
URI	Uniform Resource Identifier (универсальный идентификатор ресурса)	Вездесущая система именования ресурсов (например, http://www.amazon.com или mailto:joe@bloggs.org)
URL	Uniform Resource Locator (унифицированный указатель ресурса)	Формальный смысл (используется редко): подмножество URI; популярный смысл: синоним URI

Адреса и порты

Для функционирования коммуникаций компьютер или устройство должно иметь адрес. В Интернете применяются две системы адресации.

- **IPv4.** В настоящее время является доминирующей системой адресации; адреса IPv4 имеют ширину 32 бита. В строковом формате адреса IPv4 записываются в виде четырех десятичных чисел, разделенных точками (например, 101.102.103.104). Адрес может быть уникальным в мире или внутри отдельной *подсети* (такой как корпоративная сеть).
- **IPv6.** Более новая система 128-битной адресации. В строковом формате адреса IPv6 записываются в виде шестнадцатеричных чисел, разделенных двоеточиями (например, [3EA0:FFFF:198A:E4A3:4FF2:54fA:41BC:8D31]). В .NET адреса должны быть помещены в квадратные скобки.

Класс `IPAddress` из пространства имен `System.Net` представляет адрес в обоих протоколах. Он имеет конструктор, принимающий байтовый массив, и статический метод `Parse`, который принимает корректно сформированную строку:

```
IPAddress a1 = new IPAddress (new byte[] { 101, 102, 103, 104 });
IPAddress a2 = IPAddress.Parse ("101.102.103.104");
Console.WriteLine (a1.Equals (a2));           // True
Console.WriteLine (a1.AddressFamily);        // InterNetwork

IPAddress a3 = IPAddress.Parse
    ("[3EA0:FFFF:198A:E4A3:4FF2:54fA:41BC:8D31]");
Console.WriteLine (a3.AddressFamily);        // InterNetworkV6
```

Протоколы TCP и UDP рассредоточивают каждый IP-адрес на 65 535 портов, позволяя компьютеру с единственным адресом запускать множество приложений, каждое на своем порту. Многие приложения имеют стандартные назначения портов; скажем, протокол HTTP использует порт 80, а SMTP — порт 25.



Порты TCP и UDP с номерами от 49152 до 65535 официально свободны, поэтому они хорошо подходят для тестирования и небольших развертываний.

Комбинация IP-адреса и порта представлена в .NET классом `IPEndPoint`:

```
IPAddress a = IPAddress.Parse ("101.102.103.104");
IPEndPoint ep = new IPPEndPoint (a, 222);      // Порт 222
Console.WriteLine (ep.ToString());               // 101.102.103.104:222
```



Брандмауэры блокируют порты. Во многих корпоративных средах открыто лишь несколько портов — обычно порт 80 (для нешифрованного HTTP) и порт 443 (для защищенного HTTP).

Идентификаторы URI

Идентификатор URI представляет собой особым образом сформированную строку, которая описывает ресурс в Интернете или локальной сети, такой как веб-страница, файл или адрес электронной почты. Примерами могут служить `http://www.ietf.org`, `ftp://myisp/doc.txt` и `mailto:joe@bloggs.com`. Точный формат определен IETF (Internet Engineering Task Force — инженерная группа по развитию Интернета; `http://www.ietf.org/`).

Идентификатор URI может быть разбит на последовательность элементов, обычно включающую *схему, источник и путь*. Такое разделение осуществляется классом `Uri` из пространства имен `System`, в котором определены свойства для всех упомянутых элементов. На рис. 16.2 приведена соответствующая иллюстрация.

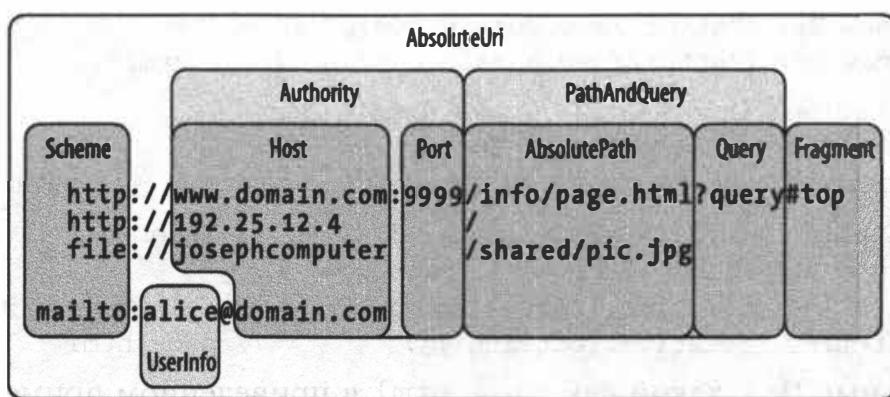


Рис. 16.2. Свойства класса Uri



Класс `Uri` полезен, когда нужно проверить правильность формата строки URI или разбить URI на компоненты. По-другому URI можно трактовать просто как строку — большинство методов, работающих с сетью, перегружены для приема либо объекта `Uri`, либо строки.

Для создания объекта `Uri` конструктору можно передать любую из перечисленных ниже строк:

- строка URI, такая как `http://www.ebay.com` или `file:///janespc/sharedpics/dolphin.jpg`;
- абсолютный путь к файлу на жестком диске вроде `c:\myfiles\data.xlsx` или `/tmp/myfiles/data.xlsx` в Unix;
- путь UNC к файлу в локальной сети наподобие `\janespc\sharedpics\dolphin.jpg`.

Путь к файлу и путь UNC автоматически преобразуются в идентификаторы URI: добавляется протокол `file:`, а символы обратной косой черты заменяются символами обычной косой черты. Перед созданием объекта `Uri` конструкторы класса `Uri` также выполняют некоторую базовую очистку строки, включая приведение схемы и имени хоста к нижнему регистру и удаление стандартных и пустых номеров портов. В случае указания строки URI без схемы, скажем, `www.test.com`, генерируется исключение `UriFormatException`.

Класс Uri имеет свойство IsLoopback, которое указывает, ссылается ли Uri на локальный хост (с IP-адресом 127.0.0.1), и свойство IsFile, которое указывает, ссылается ли Uri на локальный путь или путь UNC (IsUnc); свойство IsUnc возвращает false для общего ресурса *Samba*, смонтированного в файловой системе *Linux*. Если IsFile равно true, тогда свойство LocalPath возвращает версию AbsolutePath, которая является дружественной к локальной ОС (с символами прямой или обратной косой черты, принятой в ОС) и допускает вызов метода File.Open.

Экземпляры Uri имеют свойства, предназначенные только для чтения. Чтобы модифицировать существующий Uri, необходимо создать объект UriBuilder — он имеет записываемые свойства и может быть преобразован обратно через свойство Uri.

Класс Uri также предоставляет методы для сравнения и вычитания путей:

```
Uri info = new Uri ("http://www.domain.com:80/info/");
Uri page = new Uri ("http://www.domain.com/info/page.html");

Console.WriteLine (info.Host); // www.domain.com
Console.WriteLine (info.Port); // 80
Console.WriteLine (page.Port); // 80 (класс Uri известен стандартный порт HTTP)

Console.WriteLine (info.IsBaseOf (page)); // True
Uri relative = info.MakeRelativeUri (page);
Console.WriteLine (relative.IsAbsoluteUri); // False
Console.WriteLine (relative.ToString()); // page.html
```

Относительный Uri, такой как page.html в приведенном примере, сгенерирует исключение, если будет вызвано любое другое свойство или метод кроме IsAbsoluteUri и ToString. Создать относительный Uri напрямую можно так:

```
Uri u = new Uri ("page.html", UriKind.Relative);
```



Завершающий символ косой черты в URI важен и вносит отличие в то, каким образом сервер обрабатывает запрос, если присутствует компонент пути.

Например, на традиционном веб-сервере для URI вида http://www.albahari.com/nutshell/ можно ожидать, что веб-сервер HTTP будет искать подкаталог nutshell в веб-папке сайта и возвратит стандартный документ (обычно index.html).

Когда завершающий символ обратной косой черты отсутствует, веб-сервер будет искать файл по имени nutshell (без расширения) прямо в корневой папке сайта — обычно это не то, что нужно. Если такой файл не существует, то большинство веб-серверов будут считать, что пользователь допустил опечатку и возвратят ошибку 301 *Permanent Redirect* (постоянное перенаправление), предлагая клиенту повторить попытку с завершающим символом обратной косой черты. По умолчанию HTTP-клиент .NET будет прозрачно реагировать на ошибку 301 тем же способом, что и веб-браузер — повторяя попытку с предложенным URI. Это значит, что если вы опустите завершающий символ обратной косой черты, когда он должен быть включен, то запрос все равно будет работать, но потребует излишнего двухстороннего обмена.

Класс Uri также предлагает статические вспомогательные методы вроде EscapeUriString, который преобразует строку в допустимый URL, заменяя все символы с ASCII-кодами больше 127 их шестнадцатеричными представлениями. Методы CheckHostName и CheckSchemeName принимают строку и проверяют, является ли она синтаксически правильной для заданного свойства (хотя они не пытаются определить, существует ли указанный хост или URI).

HttpClient

Класс HttpClient предоставляет современный API-интерфейс для операций HTTP-клиента, заменяя старые типы WebClient и WebRequest/WebResponse (которые с тех пор были помечены как устаревшие).

Класс HttpClient был реализован в ответ на развитие API-интерфейсов, предназначенных для взаимодействия с протоколом HTTP и веб-службами REST, чтобы предложить улучшенный стиль работы с протоколами, который выходит за рамки простого извлечения веб-страниц. Ниже описаны основные особенности класса HttpClient.

- Одиночный экземпляр HttpClient поддерживает параллельные запросы и хорошо работает с такими средствами, как специальные заголовки, cookie-наборы и схемы аутентификации.
- Класс HttpClient позволяет создавать и подключать специальные обработчики сообщений. Это делает возможными имитацию для модульного тестирования и построение специальных конвейеров (с целью регистрации в журнале, сжатия, шифрования и т.д.).
- Класс HttpClient имеет развитую и расширяемую систему типов для заголовков и содержимого.



Класс HttpClient не поддерживает сообщение о ходе работ. С решением для сообщения о ходе работ посредством HttpClient можно ознакомиться в файле HttpClient with Progress.linq по ссылке <http://www.albahari.com/nutshell/code/aspx> или в галерее интерактивных примеров LINQPad.

Простейший способ применения класса HttpClient предусматривает создание его экземпляра и вызов одного из методов Get* с передачей ему URI:

```
string html = await new HttpClient().GetStringAsync ("http://linqpad.net");
```

(Доступны также методы GetByteArrayAsync и GetStreamAsync.) Все методы с интенсивным вводом-выводом в классе HttpClient являются асинхронными.

В отличие от своих предшественников WebRequest/WebResponse для достижения более высокой производительности при работе с HttpClient вы должны повторно использовать тот же самый экземпляр (иначе могут повторяться излишние действия вроде распознавания DNS, к тому же сокеты останутся открытыми дольше, чем необходимо). Класс HttpClient разрешает параллельные

операции, поэтому следующий код допустим; в нем загружаются две веб-страницы за раз:

```
var client = new HttpClient();
var task1 = client.GetStringAsync ("http://www.linqpad.net");
var task2 = client.GetStringAsync ("http://www.albahari.com");
Console.WriteLine (await task1);
Console.WriteLine (await task2);
```

В классе `HttpClient` имеется свойство `Timeout` и свойство `BaseAddress`, которое добавляется в качестве префикса к URI каждого запроса. В определенной степени класс `HttpClient` является тонкой оболочкой: большинство других свойств, которые можно в нем обнаружить, определены в другом классе по имени `HttpClientHandler`. Для доступа к этому классу необходимо создать и передать его экземпляр конструктору класса `HttpClient`:

```
var handler = new HttpClientHandler { UseProxy = false };
var client = new HttpClient (handler);
...
```

В показанном примере мы сообщаем обработчику о необходимости отключения поддержки прокси-сервера, что иногда может приводить к увеличению производительности за счет устранения накладных расходов, связанных с автоматическим обнаружением прокси-сервера. Предусмотрены также свойства для управления cookie-наборами, автоматическим перенаправлением, аутентификацией и т.д. (мы рассмотрим их в последующих разделах).

Метод `GetAsync` и сообщения ответов

Методы `GetStringAsync`, `GetByteArrayAsync` и `GetStreamAsync` представляют собой удобные сокращения для вызова более общего метода `GetAsync`, который возвращает *сообщение ответа*:

```
var client = new HttpClient();
// Метод GetAsync также принимает объект CancellationToken.
HttpResponseMessage response = await client.GetAsync ("http://...");  
response.EnsureSuccessStatusCode();
string html = await response.Content.ReadAsStringAsync();
```

Класс `HttpResponseMessage` имеет свойства для доступа к заголовкам (см. раздел “Заголовки” далее в главе) и коду состояния HTTP (`StatusCode`). Код состояния неудачи, такой как 404 (не найдено), не приводит к генерации исключения, если только не будет явно вызван метод `EnsureSuccessStatusCode`. Тем не менее, ошибки коммуникаций или DNS вызывают генерацию исключений.

Класс `HttpResponseMessage` располагает методом `CopyToAsync` для записи в другой поток, который удобен для сохранения вывода в файле:

```
using (var fileStream = File.Create ("linqpad.html"))
await response.Content.CopyToAsync (fileStream);
```

`GetAsync` является одним из четырех методов, соответствующих четырем командам HTTP (остальные методы — это `PostAsync`, `PutAsync` и `DeleteAsync`). Мы продемонстрируем применение метода `PostAsync` в разделе “Выгрузка данных формы” далее в главе.

Метод `SendAsync` и сообщения запросов

Методы `GetAsync`, `PostAsync`, `PutAsync` и `DeleteAsync` выступают в качестве сокращений для вызова метода `SendAsync` — единственного низкоуровневого метода, который делает всю работу. Сначала конструируется объект `HttpRequestMessage`:

```
var client = new HttpClient();
var request = new HttpRequestMessage (HttpMethod.Get, "http://...");  
HttpResponseMessage response = await client.SendAsync (request);
response.EnsureSuccessStatusCode();
...  
...
```

Создание объекта `HttpRequestMessage` означает возможность настройки свойств запроса, таких как заголовки (см. раздел “Заголовки” далее в главе), и самого содержимого, позволяя выгружать данные.

Выгрузка данных и `HttpContent`

После создания объекта `HttpRequestMessage` можно выгружать содержимое, устанавливая его свойство `Content`. Типом этого свойства является абстрактный класс по имени `HttpContent`. В состав .NET входят следующие конкретные подклассы для различных видов содержимого (можно также построить собственный подкласс такого рода):

- `ByteArrayContent`
- `StreamContent`
- `FormUrlEncodedContent` (см. раздел “Выгрузка данных формы” далее в главе)
- `StreamContent`

Например:

```
var client = new HttpClient (new HttpClientHandler { UseProxy = false });
var request = new HttpRequestMessage (
    HttpMethod.Post, "http://www.albahari.com/EchoPost.aspx");
request.Content = new StringContent ("This is a test");
HttpResponseMessage response = await client.SendAsync (request);
response.EnsureSuccessStatusCode();
Console.WriteLine (await response.Content.ReadAsStringAsync());
```

`HttpMessageHandler`

Ранее мы упоминали, что большинство свойств для настройки запросов определено не в `HttpClient`, а в классе `HttpClientHandler`. Последний в действительности представляет собой подкласс абстрактного класса `HttpMessageHandler`, определенного следующим образом:

```
public abstract class HttpMessageHandler : IDisposable
{
    protected internal abstract Task<HttpResponseMessage> SendAsync
        (HttpRequestMessage request, CancellationToken cancellationToken);
    public void Dispose();
    protected virtual void Dispose (bool disposing);
}
```

Метод `SendAsync` вызывается внутри метода `SendAsync` класса `HttpClient`.

Из `HttpMessageHandler` довольно легко создавать подклассы, и он является точкой расширения для `HttpClient`.

Модульное тестирование и имитация

Подкласс `HttpMessageHandler` можно создавать для построения *имитированного обработчика*, который помогает проводить модульное тестирование:

```
class MockHandler : HttpMessageHandler
{
    Func<HttpRequestMessage, HttpResponseMessage> _responseGenerator;
    public MockHandler
        (Func<HttpRequestMessage, HttpResponseMessage> responseGenerator)
    {
        _responseGenerator = responseGenerator;
    }
    protected override Task<HttpResponseMessage> SendAsync
        (HttpRequestMessage request, CancellationToken cancellationToken)
    {
        cancellationToken.ThrowIfCancellationRequested();
        var response = _responseGenerator(request);
        response.RequestMessage = request;
        return Task.FromResult(response);
    }
}
```

Его конструктор принимает функцию, которая сообщает имитированному объекту, каким образом генерировать ответ из запроса. Такой подход наиболее универсален, потому что один и тот же обработчик способен тестировать множество запросов.

По причине вызова `Task.FromResult` метод `SendAsynch` синхронен. Мы могли бы поддерживать асинхронность, обеспечив возвращение генератором ответов объекта типа `Task<HttpResponseMessage>`, но это бессмысленно, учитывая возможность полагаться на то, что имитированная функция должна выполняться быстро. Ниже показано, как использовать наш имитированный обработчик:

```
var mocker = new MockHandler (request =>
    new HttpResponseMessage ((HttpStatusCode.OK)
    {
        Content = new StringContent ("You asked for " + request.RequestUri)
            // Запрошен URI
    });
var client = new HttpClient (mocker);
var response = await client.GetAsync ("http://www.linqpad.net");
string result = await response.Content.ReadAsStringAsync();
Assert.AreEqual ("You asked for http://www.linqpad.net/", result);
```

(`Assert.AreEqual` — метод, который мы ожидаем обнаружить в инфраструктурах модульного тестирования, подобных NUnit.)

Соединение обработчиков в цепочки с помощью DelegatingHandler

За счет создания подклассов класса `DelegatingHandler` можно построить обработчик сообщений, который вызывает другой обработчик (давая в результате цепочку обработчиков). Подобный прием может применяться для реализации специальных протоколов аутентификации, сжатия и шифрования. Ниже приведен код простого обработчика регистрации в журнале:

```
class LoggingHandler : DelegatingHandler
{
    public LoggingHandler (HttpMessageHandler nextHandler)
    {
        InnerHandler = nextHandler;
    }

    protected async override Task < HttpResponseMessage > SendAsync
        (HttpRequestMessage request, CancellationToken cancellationToken)
    {
        Console.WriteLine ("Requesting: " + request.RequestUri); // Запрос
        var response = await base.SendAsync (request, cancellationToken);
        Console.WriteLine ("Got response: " + response.StatusCode); // Ответ
        return response;
    }
}
```

Обратите внимание, что в переопределенном методе `SendAsync` поддерживается асинхронность. Введение модификатора `async` при переопределении метода, возвращающего задачу, совершенно допустимо, а в данном случае еще и желательно.

В более удачном решении, нежели простой вывод на консоль, можно было бы предложить конструктор, который принимает регистрирующий объект некоторого вида. А еще лучше было бы принимать пару делегаторов `Action<T>`, сообщающих о том, каким образом регистрировать в журнале объекты запроса и ответа.

Прокси-серверы

Прокси-сервер — это посредник, через который могут маршрутизироваться запросы HTTP и FTP. Иногда организации настраивают прокси-сервер как единственное средство, с помощью которого сотрудники могут получать доступ в Интернет — главным образом потому, что это упрощает действия по обеспечению безопасности. Прокси-сервер имеет собственный адрес и может требовать аутентификации, так что доступ в Интернет будет разрешен только избранным пользователям локальной сети.

Чтобы использовать прокси-сервер вместе с `HttpClient`, сначала нужно создать объект `HttpClientHandler`, установить его свойство `Proxy` и затем передать результат конструктору `HttpClient`:

```
WebProxy p = new WebProxy ("192.178.10.49", 808);
p.Credentials = new NetworkCredential("имя-пользователя", "пароль", "домен");
var handler = new HttpClientHandler { Proxy = p };
var client = new HttpClient (handler);
...
```

Класс `HttpClientHandler` имеет также свойство `UseProxy`, которое можно установить в `false` вместо установки в `null` свойства `Proxy` для отмены автоматического определения параметров прокси-сервера.

Если при конструировании объекта `NetworkCredential` указан домен, то будут использоваться протоколы аутентификации на основе Windows. Чтобы задействовать текущего аутентифицированного пользователя Windows, установите статическое свойство `CredentialCache.DefaultNetworkCredentials` в значение свойства `Credentials` прокси-сервера.

В качестве альтернативы частой установке свойства `Proxy` можно установить глобальное стандартное значение:

```
HttpClient.DefaultWebProxy = myWebProxy;
```

Аутентификация

Вот как можно предоставить объекту `HttpClient` имя пользователя и пароль:

```
string username = "myuser";
string password = "mypassword";

var handler = new HttpClientHandler();
handler.Credentials = new NetworkCredential (username, password);
var client = new HttpClient (handler);
...
```

Данный прием работает с основанными на диалоговых окнах протоколами аутентификации, такими как Basic и Digest, и расширяется посредством класса `AuthenticationManager`. Он также поддерживает протоколы Windows NTLM и Kerberos (когда при конструировании объекта `NetworkCredential` указано имя домена). Если нужно использовать текущего аутентифицированного пользователя Windows, тогда свойство `Credentials` можно оставить равным `null` и вместо него установить свойство `UseDefaultCredentials` в `true`.

После предоставления учетных данных объект `HttpClient` автоматически согласовывает совместимый протокол. В ряде случаев может существовать выбор: например, если вы просмотрите начальный ответ от страницы веб-почты сервера Microsoft Exchange, то можете встретить следующие заголовки:

```
HTTP/1.1 401 Unauthorized
Content-Length: 83
Content-Type: text/html
Server: Microsoft-IIS/6.0
WWW-Authenticate: Negotiate
WWW-Authenticate: NTLM
WWW-Authenticate: Basic realm="exchange.somedomain.com"
X-Powered-By: ASP.NET
Date: Sat, 05 Aug 2006 12:37:23 GMT
```

Код 401 сигнализирует о том, что авторизация обязательна; заголовки `WWW-Authenticate` указывают, какие будут восприниматься протоколы аутентификации. Однако если сконфигурировать объект `HttpClientHandler` с корректным именем пользователя и паролем, то это сообщение будет скрыто,

поскольку исполняющая среда реагирует автоматически, выбирая совместимый протокол аутентификации и затем повторно отправляя исходный запрос с дополнительным заголовком. Например:

```
Authorization: Negotiate TlRMTVNTUAAABAAAt5II2gjACDARAAACAwACACgAAAAQ
ATmKAAAAD01VDRdPUksHUq9VUA==
```

Такой механизм отличается прозрачностью, но приводит к дополнительному двухстороннему обмену для каждого запроса. Установив свойство `PreAuthenticate` объекта `HttpClientHandler` в `true`, дополнительных двухсторонних обменов при последующих запросах к тому же самому URI можно избежать.

CredentialCache

С помощью объекта `CredentialCache` можно принудительно применить конкретный протокол аутентификации. Кеш учетных данных (*credential cache*) содержит один или большее количество объектов `NetworkCredential`, каждый из которых связан с конкретным протоколом и префиксом URI. Например, во время входа на сервер Exchange Server может возникнуть желание пропустить протокол Basic, т.к. он передает пароли в виде открытого текста:

```
CredentialCache cache = new CredentialCache();
Uri prefix = new Uri ("http://exchange.somedomain.com");
cache.Add (prefix, "Digest", new NetworkCredential ("joe", "passwd"));
cache.Add (prefix, "Negotiate", new NetworkCredential ("joe", "passwd"));

var handler = new HttpClientHandler();
handler.Credentials = cache;
...
```

Протокол аутентификации указывается в форме строки со следующими допустимыми значениями:

Basic, Digest, NTLM, Kerberos, Negotiate

В этой конкретной ситуации будет выбрано значение `Negotiate`, потому что сервер не сообщил о поддержке протокола `Digest` в своих заголовках аутентификации. Здесь `Negotiate` представляет собой протокол Windows, который в зависимости от возможностей сервера сводится к `Kerberos` или `NTLM`, но гарантирует вашему приложению прямую совместимость в случае развертывания будущих стандартов.

Статическое свойство `CredentialCache.DefaultNetworkCredentials` позволяет добавлять текущего аутентифицированного пользователя Windows в кеш учетных данных без необходимости в предоставлении пароля:

```
cache.Add (prefix, "Negotiate", CredentialCache.DefaultNetworkCredentials);
```

Аутентификация через заголовки

Есть еще один способ аутентификации, предусматривающий установку заголовка аутентификации напрямую:

```
var client = new HttpClient();
client.DefaultRequestHeaders.Authorization =
    new AuthenticationHeaderValue ("Basic",
        Convert.ToBase64String (Encoding.UTF8.GetBytes ("username:password")));
...

```

Такая стратегия работает и со специальными системами аутентификации вроде OAuth.

Заголовки

Класс `HttpClient` позволяет добавлять в запрос специальные HTTP-заголовки, а также производить перечисление имеющихся заголовков в ответе. Заголовок представляет собой просто пару “ключ/значение” с метаданными, такими как тип содержимого сообщения или программное обеспечение сервера. Класс `HttpClient` открывает доступ к строго типизированным коллекциям со свойствами для стандартных HTTP-заголовков. Свойство `DefaultRequestHeaders` предназначено для заголовков, которые применяются к каждому запросу:

```
var client = new HttpClient (handler);
client.DefaultRequestHeaders.UserAgent.Add (
    new ProductInfoHeaderValue ("VisualStudio", "2015"));
client.DefaultRequestHeaders.Add ("CustomHeader", "VisualStudio/2015");
```

С другой стороны, свойство `Headers` класса `HttpRequestMessage` представляет заголовки, специфичные для запроса.

Строки запросов

Строка запроса — это просто добавляемая к URI строка со знаком вопроса, которая используется для отправки простых данных серверу. В строке запроса можно указывать множество пар “ключ/значение” с применением следующего синтаксиса:

```
?key1=value1&key2=value2&key3=value3...
```

Вот URI со строкой запроса:

```
string requestURI = "http://www.google.com/search?q=HttpClient&hl=fr";
```

Если существует вероятность того, что запрос будет включать нестандартные символы или пробелы, то для создания допустимого URI можно задействовать метод `EscapeDataString` класса `Uri`:

```
string search = Uri.EscapeDataString ("(HttpClient or
HttpRequestMessage)");
string language = Uri.EscapeDataString ("fr");
string requestURI = "http://www.google.com/search?q=" + search +
    "&hl=" + language;
```

Результирующий URI выглядит так:

```
http://www.google.com/search?q=(HttpClient%20OR%20HttpRequestMessage)&hl=fr
```

(Метод `EscapeDataString` похож на `EscapeUriString` за исключением того, что он также кодирует символы вроде `&` и `=`, которые иначе заполонили бы строку запроса.)

Выгрузка данных формы

Чтобы загрузить данные HTML-формы, создайте и заполните объект `FormUrlEncodedContent`. Затем можете либо передать его в метод `PostAsync`, либо присвоить свойству `Content` запроса:

```
string uri = "http://www.albahari.com/EchoPost.aspx";
var client = new HttpClient();
var dict = new Dictionary<string, string>
{
    { "Name", "Joe Albahari" },
    { "Company", "O'Reilly" }
};
var values = new FormUrlEncodedContent (dict);
var response = await client.PostAsync (uri, values);
response.EnsureSuccessStatusCode();
Console.WriteLine (await response.Content.ReadAsStringAsync());
```

Cookie-наборы

Cookie-набор — это строка с парой “имя/значение”, которую HTTP-сервер посыпает клиенту в заголовке ответа. Клиентский веб-браузер обычно запоминает cookie-наборы и повторяет их для сервера в каждом последующем запросе (к тому же адресу) до тех пор, пока не истечет время их действия. Cookie-набор позволяет серверу знать, что он взаимодействует с тем же самым клиентом, с которым он имел дело минуту назад (или, скажем, вчера), без необходимости в наличии неаккуратной строки запроса в URI.

По умолчанию `HttpClient` игнорирует любые cookie-наборы, полученные от сервера. Чтобы принимать cookie-наборы, следует создать объект `CookieContainer` и присвоить его свойству `CookieContainer` объекта `HttpClientHandler`:

```
var cc = new CookieContainer();
var handler = new HttpClientHandler();
handler.CookieContainer = cc;
var client = new HttpClient (handler);
...
```

Для повторения полученных cookie-наборов в будущих запросах необходимо просто использовать тот же самый объект `CookieContainer`. В качестве альтернативы можно начать с нового объекта `CookieContainer` и затем добавлять cookie-наборы вручную:

```
Cookie c = new Cookie ("PREF",
                      "ID=6b10df1da493a9c4:TM=1179...",
                      "/",
                      ".google.com");
freshCookieContainer.Add (c);
```

Третий и четвертый аргументы отражают путь и домен источника. Объект `CookieContainer` на стороне клиента может хранить cookie-наборы из множества разных мест; объект `HttpClient` отправляет только те cookie-наборы, путь и домен которых совпадают с путем и доменом сервера.

Реализация HTTP-сервера



Если вам нужно реализовать HTTP-сервер, то альтернативным подходом более высокого уровня (из .NET 6) является использование минимального API-интерфейса ASP.NET. Вот все, что понадобится для начала:

```
var app = WebApplication.CreateBuilder().Build();
app.MapGet("/", () => "Hello, world!");
app.Run();
```

С помощью класса `HttpListener` можно создать собственный HTTP-сервер .NET. Ниже приведен код простого сервера, который прослушивает порт 51111, ожидает одиночный клиентский запрос и возвращает односторонний ответ.

```
using var server = new SimpleHttpServer();
// Сделать клиентский запрос:
Console.WriteLine (await new HttpClient().GetStringAsync
    ("http://localhost:51111/MyApp/Request.txt"));

class SimpleHttpServer : IDisposable
{
    readonly HttpListener listener = new HttpListener();
    public SimpleHttpServer() => ListenAsync();
    async void ListenAsync()
    {
        listener.Prefixes.Add ("http://localhost:51111/MyApp/"); // Прослушивать
        listener.Start(); // порт 51111
        // Ожидать поступления клиентского запроса:
        HttpListenerContext context = await listener.GetContextAsync();
        // Ответить на запрос:
        string msg = "You asked for: " + context.Request.RawUrl;
        context.Response.ContentLength64 = Encoding.UTF8.GetByteCount (msg);
        context.Response.StatusCode = (int) HttpStatusCode.OK;
        using (Stream s = context.Response.OutputStream)
        using (StreamWriter writer = new StreamWriter (s))
            await writer.WriteAsync (msg);
    }
    public void Dispose() => listener.Close();
}
```

Вывод выглядит так:

```
You asked for: /MyApp/Request.txt
```

В среде Windows класс `HttpListener` внутренне не использует .NET-объекты `Socket`; взамен он обращается к API-интерфейсу HTTP-серверов Windows (Windows HTTP Server API). Это позволяет множеству приложений на компьютере прослушивать один и тот же IP-адрес и порт — при условии, что каждое из них регистрирует отличающиеся адресные префиксы. В показанном выше примере мы регистрируем префикс `http://localhost/myapp`, поэтому другое приложение способно прослушивать тот же самый IP-адрес и порт с другим префиксом, таким как `http://localhost/anotherapp`. Это имеет значение, потому что открытие новых портов в корпоративных брандмауэрах может быть затруднено из-за политик, действующих внутри компании.

Объект `HttpListener` ожидает следующего клиентского запроса, когда вызывается метод `GetContext`, возвращая объект со свойствами `Request` и `Response`. Указанные свойства аналогичны клиентскому запросу или ответу, но со стороны сервера. Например, можно читать и записывать заголовки и cookie-наборы для объектов запросов и ответов почти так же, как это делается на стороне клиента.

Основываясь на ожидаемой клиентской аудитории, можно выбрать полностью, с которой будут поддерживаться функциональные возможности протокола HTTP. В качестве самого минимума для каждого запроса должны устанавливаться длина содержимого и код состояния.

Ниже представлен код простого сервера веб-страниц, реализованного *асинхронным образом*:

```
using System;
using System.IO;
using System.Net;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
class WebServer
{
    HttpListener _listener;
    string _baseFolder; // Папка для веб-страниц.
    public WebServer (string uriPrefix, string baseFolder)
    {
        _listener = new HttpListener();
        _listener.Prefixes.Add (uriPrefix);
        _baseFolder = baseFolder;
    }
    public async void Start()
    {
        _listener.Start();
        while (true)
            try
            {
                var context = await _listener.GetContextAsync();
                Task.Run (() => ProcessRequestAsync (context));
            }
            catch (HttpListenerException) { break; } // Прослушиватель
                                                // остановлен
            catch (InvalidOperationException) { break; } // Прослушиватель
                                                // остановлен
    }
}
```

```

public void Stop() => _listener.Stop();
async void ProcessRequestAsync (HttpListenerContext context)
{
    try
    {
        string filename = Path.GetFileName (context.Request.RawUrl);
        string path = Path.Combine (_baseFolder, filename);
        byte[] msg;
        if (!File.Exists (path))
        {
            Console.WriteLine ("Resource not found: " + path); // Ресурс
                                                       // не найден
            context.Response.StatusCode = (int) HttpStatusCode.NotFound;
            msg = Encoding.UTF8.GetBytes ("Sorry, that page does not exist");
                                                       // Страница не существует
        }
        else
        {
            context.Response.StatusCode = (int) HttpStatusCode.OK;
            msg = File.ReadAllBytes (path);
        }
        context.Response.ContentLength64 = msg.Length;
        using (Stream s = context.Response.OutputStream)
            await s.WriteAsync (msg, 0, msg.Length);
    }
    catch (Exception ex) { Console.WriteLine ("Request error: " + ex); }
                         // Ошибка запроса
}
}

```

Следующий код приводит все в действие:

```

// Прослушивать порт 51111, обслуживая файлы в d:\webroot:
var server = new WebServer ("http://localhost:51111/", @"d:\webroot");
try
{
    server.Start();
    Console.WriteLine ("Server running... press Enter to stop");
           // Сервер выполняется... для его останова нажмите <Enter>
    Console.ReadLine();
}
finally { server.Stop(); }

```

Показанный выше код можно протестировать на стороне клиента с помощью любого браузера; URI в данном случае будет выглядеть как `http://localhost:51111/` плюс имя веб-страницы.



Прослушиватель `HttpListener` не запустится, когда за тот же самый порт соперничает другое программное обеспечение (если только оно тоже не использует Windows HTTP Server API). Примеры приложений, которые могут прослушивать стандартный порт 80, включают веб-сервер и программы для одноранговых сетей, подобные `Skype`.

Применение асинхронных функций делает наш сервер масштабируемым и эффективным. Однако его запуск в потоке пользовательского интерфейса будет препятствовать масштабируемости, т.к. для каждого запроса управление должно возвращаться в поток пользовательского интерфейса после каждого await. Привнесение таких накладных расходов не имеет смысла, особенно с учетом того, что совместно используемое состояние отсутствует, поэтому в сценарии с пользовательским интерфейсом мы могли бы поступить следующим образом:

```
Task.Run (Start);
```

или же вызвать `ConfigureAwait(false)` после вызова `GetContextAsync`.

Обратите внимание, что для вызова метода `ProcessRequestAsync` мы используем `Task.Run` несмотря на то, что упомянутый метод уже является асинхронным. Это позволяет вызывающему коду обработать другой запрос *немедленно* вместо того, чтобы сначала ожидать завершения синхронной фазы метода (вплоть до первого `await`).

Использование DNS

Статический класс `Dns` инкапсулирует службу доменных имен (Domain Name Service — DNS), которая осуществляет преобразования между низкоуровневыми IP-адресами наподобие 66.135.192.87 и понятными для человека доменными именами, такими как ebay.com.

Метод `GetHostAddresses` преобразует доменное имя в IP-адрес (или адреса):

```
foreach (IPAddress a in Dns.GetHostAddresses ("albahari.com"))
    Console.WriteLine (a.ToString()); // 205.210.42.167
```

Метод `GetHostEntry` двигается в обратном направлении, преобразуя IP-адрес в доменное имя:

```
IPHostEntry entry = Dns.GetHostEntry ("205.210.42.167");
Console.WriteLine (entry.HostName); // albahari.com
```

Метод `GetHostEntry` также принимает объект `IPAddress`, поэтому IP-адрес можно указывать в виде байтового массива:

```
IPAddress address = new IPAddress (new byte[] { 205, 210, 42, 167 });
IPHostEntry entry = Dns.GetHostEntry (address);
Console.WriteLine (entry.HostName); // albahari.com
```

В случае применения класса вроде `WebRequest` или `TcpClient` доменные имена преобразуются в IP-адреса автоматически. Однако если в приложении планируется выполнять множество сетевых запросов к одному и тому же адресу, то производительность иногда можно увеличить, сначала используя класс `Dns` для явного преобразования доменного имени в IP-адрес и затем организовав с ним коммуникации напрямую. Прием позволяет избежать повторяющихся циклов двухстороннего обмена для преобразования того же самого доменного имени и может быть полезен при работе с транспортным уровнем (через класс `TcpClient`, `UdpClient` или `Socket`).

Класс `Dns` также предлагает асинхронные методы, которые возвращают объекты задач, допускающих ожидание:

```
foreach (IPAddress a in await Dns.GetHostAddressesAsync ("albahari.com"))
    Console.WriteLine (a.ToString());
```

Отправка сообщений электронной почты с помощью SmtpClient

Класс SmtpClient из пространства имен System.Net.Mail позволяет отправлять сообщения электронной почты с применением простого протокола передачи почты (Simple Mail Transfer Protocol — SMTP). Чтобы отправить обычное текстовое сообщение, необходимо создать экземпляр SmtpClient, указать в его свойстве Host адрес SMTP-сервера и затем вызвать метод Send:

```
SmtpClient client = new SmtpClient ();
client.Host = "mail.myserver.com";
client.Send ("from@adomain.com", "to@adomain.com", "subject", "body");
```

При конструировании объекта MailMessage доступны и другие варианты, включая возможность добавления вложений:

```
SmtpClient client = new SmtpClient ();
client.Host = "mail.myserver.com";
MailMessage mm = new MailMessage ();

mm.Sender = new MailAddress ("kay@domain.com", "Kay");
mm.From = new MailAddress ("kay@domain.com", "Kay");
mm.To.Add (new MailAddress ("bob@domain.com", "Bob"));
mm.CC.Add (new MailAddress ("dan@domain.com", "Dan"));
mm.Subject = "Hello!";
mm.Body = "Hi there. Here's the photo!";
mm.IsBodyHtml = false;
mm.Priority = MailPriority.High;

Attachment a = new Attachment ("photo.jpg",
                               System.Net.Mime.MediaTypeNames.Image.Jpeg);
mm.Attachments.Add (a);
client.Send (mm);
```

Чтобы препятствовать рассылке спама, большинство SMTP-серверов в Интернете будут принимать подключения только от аутентифицированных клиентов, а также требовать связи через SSL:

```
var client = new SmtpClient ("smtp.myisp.com", 587)
{
    Credentials = new NetworkCredential ("me@myisp.com", "MySecurePass"),
    EnableSsl = true
};
client.Send ("me@myisp.com", "someone@somewhere.com", "Subject", "Body");
Console.WriteLine ("Sent");
```

Изменяя свойство DeliveryMethod, можно заставить SmtpClient использовать сервер IIS для отправки почтовых сообщений или просто записывать каждое сообщение в файл .eml внутри указанного каталога, что может быть удобно во время разработки:

```
SmtpClient client = new SmtpClient();
client.DeliveryMethod = SmtpDeliveryMethod.SpecifiedPickupDirectory;
client.PickupDirectoryLocation = @"c:\mail";
```

Использование TCP

TCP и UDP являются протоколами транспортного уровня, на основе которых построено большинство служб Интернета и локальных вычислительных сетей. Протоколы HTTP (версии 2 и выше), FTP и SMTP работают с TCP, а DNS и HTTP версии 3 — с UDP. Протокол TCP ориентирован на подключение и поддерживает механизмы обеспечения надежности; UDP является протоколом без установления подключения, характеризуется более низкими накладными расходами и поддерживает широковещательную передачу. Протокол *BitTorrent* применяет UDP, как и протокол Voice over IP (VoIP).

Транспортный уровень предлагает более высокую гибкость — и потенциально лучшую производительность — по сравнению с более высокими уровнями, но требует самостоятельного решения таких задач, как аутентификация и шифрование.

Благодаря поддержке TCP в .NET можно работать либо с легкими в пользовании фасадными классами `TcpClient` и `TcpListener`, либо с обладающим обширными возможностями классом `Socket`. (В действительности их можно сочетать, поскольку класс `TcpClient` через свое свойство `Client` открывает доступ к внутреннему объекту `Socket`.) Класс `Socket` предоставляет больше вариантов конфигурации и разрешает прямой доступ к сетевому уровню (IP) и протоколам, не основанным на Интернете, таким как SPX/IPX от Novell.

Как и другие протоколы, TCP различает концепции клиента и сервера: клиент инициирует запрос, а сервер запрос ожидает. Ниже представлена базовая структура для синхронного запроса клиента TCP:

```
using (TcpClient client = new TcpClient())
{
    client.Connect ("address", port);
    using (NetworkStream n = client.GetStream())
    {
        // Выполнять чтение и запись в сетевой поток...
    }
}
```

Метод `Connect` класса `TcpClient` блокируется вплоть до установления подключения (его асинхронным эквивалентом является метод `ConnectAsync`). Затем объект `NetworkStream` предоставляет средство двухсторонних коммуникаций для передачи и получения байтов данных из сервера.

Простой сервер TCP выглядит следующим образом:

```
TcpListener listener = new TcpListener (<IP-адрес>, port);
listener.Start();
while (keepProcessingRequests)
{
    using (TcpClient c = listener.AcceptTcpClient())
    using (NetworkStream n = c.GetStream())
    {
        // Выполнять чтение и запись в сетевой поток...
    }
}
listener.Stop();
```

Объект TcpListener требует указания локального IP-адреса для прослушивания (например, компьютер с двумя сетевыми адаптерами может иметь два адреса). Чтобы обеспечить прослушивание всех локальных IP-адресов (или только одного из них), можно применять поле IPAddress.Any. Вызов метода AcceptTcpClient класса TcpListener блокируется до тех пор, пока не будет получен клиентский запрос (есть также асинхронная версия этого метода), после чего мы вызываем метод GetStream, в точности как поступали на стороне клиента.

При работе на транспортном уровне необходимо принять решение, касающееся протокола, которое связано с тем, кто и когда передает данные — почти как при использовании портативной радиции. Если оба участника начинают говорить или слушать одновременно, то связь будет нарушена.

Давайте создадим протокол, при котором клиент начинает общение первым, сказав “Hello”, после чего сервер отвечает фразой “Hello right back!”. Ниже показан соответствующий код:

```
using System;
using System.IO;
using System.Net;
using System.Net.Sockets;
using System.Threading;

new Thread (Server).Start(); // Запустить серверный метод параллельно
Thread.Sleep (500);          // Предоставить серверу время для запуска
Client();
void Client()
{
    using (TcpClient client = new TcpClient ("localhost", 51111))
    using (NetworkStream n = client.GetStream())
    {
        BinaryWriter w = new BinaryWriter (n);
        w.Write ("Hello");
        w.Flush();
        Console.WriteLine (new BinaryReader (n).ReadString());
    }
}
void Server() // Обрабатывает одиночный клиентский запрос и завершается
{
    TcpListener listener = new TcpListener (IPAddress.Any, 51111);
    listener.Start();
    using (TcpClient c = listener.AcceptTcpClient ())
    using (NetworkStream n = c.GetStream())
    {
        string msg = new BinaryReader (n).ReadString();
        BinaryWriter w = new BinaryWriter (n);
        w.Write (msg + " right back!");
        w.Flush();           // Должен быть вызван метод Flush, потому
                           // что мы не освобождаем средство записи
    }
    listener.Stop();
}
```

Вот вывод:

Hello right back!

В данном примере мы применяем закольцовывание localhost, чтобы запустить клиент и сервер на одной машине. Мы произвольно выбрали порт из свободного диапазона (с номером больше 49152) и использовали классы `BinaryWriter` и `BinaryReader` для кодирования текстовых сообщений. Мы не закрывали и не освобождали средства чтения и записи, чтобы сохранить поток `NetworkStream` в открытом состоянии вплоть до завершения взаимодействия.

Классы `BinaryReader` и `BinaryWriter` могут показаться странным выбором для чтения и записи строк. Тем не менее, по сравнению с классами `StreamReader` и `StreamWriter` эти классы обладают важным преимуществом: они дополняют строки целочисленными префиксами, указывающими длину, так что объекту `BinaryReader` всегда известно, сколько байтов должно быть прочитано. Если вызвать метод `StreamReader.ReadToEnd`, то может возникнуть блокировка на неопределенное время, т.к. `NetworkStream` не имеет признака окончания. После того, как подключение открыто, сетевой поток никогда не может быть уверен в том, что клиент не собирается передавать дополнительную порцию данных.



В действительности класс `StreamReader` вообще запрещено применять вместе с `NetworkStream`, даже если вы планируете вызывать только метод `ReadLine`. Причина в том, что класс `StreamReader` имеет буфер опережающего чтения, который может привести к чтению большего числа байтов, чем доступно в текущий момент, и бесконечному блокированию (или вплоть до возникновения тайм-аута сокета). Другие потоки, такие как `FileStream`, не страдают подобной несовместимостью с классом `StreamReader`, потому что они поддерживают определенный признак окончания, при достижении которого метод `Read` немедленно завершается, возвращая значение 0.

Параллелизм и TCP

Классы `TcpClient` и `TcpListener` предлагают асинхронные методы на основе задач для реализации масштабируемого параллелизма. Их использование сводится просто к замене вызовов блокирующих методов версиями *`Async` этих методов и применению `await` к возвращаемым ими объектам задач.

В следующем примере мы создадим асинхронный сервер TCP, который принимает запросы длиной 5000 байтов, меняет порядок следования байтов на противоположный и затем отправляет их обратно клиенту:

```
async void RunServerAsync ()
{
    var listener = new TcpListener (IPAddress.Any, 51111);
    listener.Start ();
    try
    {
        while (true)
            Accept (await listener.AcceptTcpClientAsync ());
    }
    finally { listener.Stop(); }
```

```

async Task Accept (TcpClient client)
{
    await Task.Yield ();
    try
    {
        using (client)
        using (NetworkStream n = client.GetStream ())
        {
            byte[] data = new byte [5000];
            int bytesRead = 0; int chunkSize = 1;
            while (bytesRead < data.Length && chunkSize > 0)
                bytesRead += chunkSize =
                    await n.ReadAsync (data, bytesRead, data.Length - bytesRead);
            Array.Reverse (data); // Поменять порядок следования байтов
                                  // на противоположный
            await n.WriteAsync (data, 0, data.Length);
        }
    }
    catch (Exception ex) { Console.WriteLine (ex.Message); }
}

```

Программа масштабируема в том отношении, что она не блокирует поток на время выполнения запроса. Таким образом, если 1000 клиентов одновременно подключаются к сети с использованием медленных каналов (так что от начала до конца каждого запроса проходит, скажем, несколько секунд), то программа не потребует на данный промежуток времени 1000 потоков (в отличие от синхронного решения). Взамен она арендует потоки только на краткие периоды времени, чтобы выполнить код до и после выражений `await`.

Получение почты POP3 с помощью TCP

Поддержка на прикладном уровне протокола POP3 в .NET отсутствует, поэтому для получения почты из сервера POP3 придется работать на уровне TCP. К счастью, данный протокол прост; взаимодействие в POP3 выглядит следующим образом:

Клиент	Почтовый сервер	Примечания
Клиент подключается...	+OK Hello there.	Приветственное сообщение
USER joe	+OK Password required.	
PASS password	+OK Logged in.	
LIST	+OK 1 1876 2 5412 3 845 •	Перечисляет идентификаторы и размеры файлов для каждого сообщения на сервере
RETR 1	+OK 1876 octets Содержимое сообщения #1... •	Извлекает сообщение с указанным идентификатором
DELETE 1	+OK Deleted.	Удаляет сообщение из сервера
QUIT	+OK Bye-bye.	

Каждая команда и ответ завершаются символом новой строки (<CR>+<LF>) за исключением многострочных команд LIST и RETR, которые завершаются одиночной точкой в отдельной строке. Поскольку мы не можем применять класс StreamReader вместе с NetworkStream, начнем с написания вспомогательного метода, предназначенного для чтения строки текста без буферизации:

```
string ReadLine (Stream s)
{
    List<byte> lineBuffer = new List<byte>();
    while (true)
    {
        int b = s.ReadByte();
        if (b == 10 || b < 0) break;
        if (b != 13) lineBuffer.Add ((byte)b);
    }
    return Encoding.UTF8.GetString (lineBuffer.ToArray());
}
```

Нам еще понадобится вспомогательный метод для отправки команды. Так как мы всегда ожидаем получения ответа, начинающегося с +OK, читать и проверять ответ можно в одно и то же время:

```
void SendCommand (Stream stream, string line)
{
    byte[] data = Encoding.UTF8.GetBytes (line + "\r\n");
    stream.Write (data, 0, data.Length);
    string response = ReadLine (stream);
    if (!response.StartsWith ("+OK"))
        throw new Exception ("POP Error: " + response); // Ошибка протокола POP
}
```

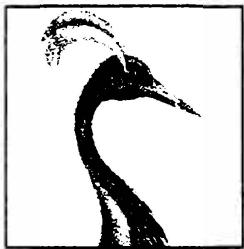
При наличии таких методов решить задачу извлечения почты довольно легко. Мы устанавливаем подключение TCP на порте 110 (стандартный порт POP3) и затем начинаем взаимодействие с сервером. В этом примере мы записываем каждое почтовое сообщение в произвольно именованный файл с расширением .eml и удаляем сообщение из сервера:

```
using (TcpClient client = new TcpClient ("mail.isp.com", 110))
using (NetworkStream n = client.GetStream())
{
    ReadLine (n); // Прочитать приветственное сообщение
    SendCommand (n, "USER имя-пользователя");
    SendCommand (n, "PASS пароль");
    SendCommand (n, "LIST"); // Извлечь идентификаторы сообщений
    List<int> messageIDs = new List<int>();
    while (true)
    {
        string line = ReadLine (n); // Например, "1 1876"
        if (line == ".") break;
        messageIDs.Add (int.Parse (line.Split (' ')[0])); // Идентификатор
        // сообщения
    }
}
```

```
foreach (int id in messageIDs)      // Извлечь каждое сообщение
{
    SendCommand (n, "RETR " + id);
    string randomFile = Guid.NewGuid().ToString() + ".eml";
    using (StreamWriter writer = File.CreateText (randomFile))
        while (true)
    {
        string line = ReadLine (n); // Прочитать следующую строку сообщения
        if (line == ".") break;    // Одиночная точка - конец сообщения
        if (line == "..") line = ".";
        writer.WriteLine (line);   // Записать в выходной файл
    }
    SendCommand (n, "DELE " + id); // Удалить сообщение из сервера
}
SendCommand (n, "QUIT");
}
```



В галерее NuGet вы можете обнаружить библиотеки с открытым кодом для работы с протоколом POP3, которые предлагают поддержку таких аспектов протокола, как аутентификация подключений TLS/SSL, разбор MIME и т.д.



Сборки

Сборка — это базовая единица развертывания в .NET, а также контейнер для всех типов. Сборка содержит скомпилированные типы с их кодом на промежуточном языке (IL), ресурсы времени выполнения и информацию, которая действует управлению версиями и ссылками на другие сборки. Сборка также определяет границы для распознавания типов. В .NET сборка представляет собой одиночный файл с расширением .dll.



При компиляции исполняемого приложения в .NET вы получаете два файла: файл сборки (.dll) и файл исполняемого модуля запуска (.exe), которые соответствуют платформе, выбранной в качестве целевой. Ситуация отличается от того, что происходило в инфраструктуре .NET Framework, которая генерировала *переносимую исполняемую* (portable executable — PE) сборку. Файл PE имел расширение .exe и действовал как сборка и как исполняемый модуль запуска. Файл PE может быть одновременно нацелен на 32- и 64-разрядные версии Windows.

Большинство типов в главе находятся в следующих пространствах имен:

System.Reflection
System.Resources
System.Globalization

Содержимое сборки

Сборка содержит четыре вида информации.

- **Манифест сборки.** Предоставляет сведения для среды CLR, такие как имя сборки, версия и ссылки на другие сборки.
- **Манифест приложения.** Предоставляет сведения для операционной системы (ОС), такие как способ развертывания сборки и необходимость в подъеме полномочий до административных.
- **Скомпилированные типы.** Скомпилированный код IL и метаданные типов, определенных внутри сборки.
- **Ресурсы.** Другие встроенные в сборку данные, такие как изображения и локализуемый текст.

Из всего перечисленного обязательным является только *манифест сборки*, хотя сборка почти всегда содержит скомпилированные типы (если только это не ресурсная сборка; см. раздел “Ресурсы и подчиненные сборки” далее в главе).

Манифест сборки

Манифест сборки служит двум целям:

- описывает сборку для управляемой среды размещения;
- действует в качестве каталога для модулей, типов и ресурсов в сборке.

Таким образом, сборки являются *самоописательными*. Потребитель может обнаруживать данные, типы и функции всех сборок без необходимости в наличии дополнительных файлов.



Манифест сборки — это не сущность, добавляемая к сборке явно; он встраивается в сборку автоматически во время компиляции.

Ниже представлены краткие сведения по функционально значащим данным, хранящимся в манифесте:

- простое имя сборки;
- номер версии (`AssemblyVersion`);
- открытый ключ и подписанный хеш сборки, если она имеет строгое имя;
- список ссылаемых сборок, включающий их версии и открытые ключи;
- список типов, определенных в сборке;
- целевая культура в случае подчиненной сборки (`AssemblyCulture`).

Манифест также может хранить следующие информационные данные:

- полный заголовок и описание (`AssemblyTitle` и `AssemblyDescription`);
- информация о компании и авторском праве (`AssemblyCompany` и `AssemblyCopyright`);
- отображаемая версия (`AssemblyInformationalVersion`);
- дополнительные атрибуты для специальных данных.

Некоторые перечисленные данные выводятся из аргументов, переданных компилятору, например, список ссылаемых сборок или открытый ключ для подписания сборки. Остальные данные поступают из атрибутов сборки, указанных в круглых скобках.



Просмотреть содержимое манифеста сборки можно с помощью инструмента .NET под названием `ildasm.exe`. В главе 18 будет показано, как делать то же самое программно с применением рефлексии.

Указание атрибутов сборки

Часто используемые атрибуты можно указывать в окне свойств проекта среды Visual Studio. Такие настройки добавляются в файл проекта (.csproj).

Атрибуты сборки, которые не поддерживаются в окне свойств или не работают с файлом .csproj, можно указывать в исходном коде (что нередко делается в файле по имени AssemblyInfo.cs).

Выделенный файл атрибутов содержит только операторы `using` и объявление атрибутов сборки. Например, чтобы типы с внутренней областью видимости стали доступными проекту модульного тестирования, потребуется поступить следующим образом:

```
using System.Runtime.CompilerServices;  
[assembly:InternalsVisibleTo("MyUnitTestProject")]
```

Манифест приложения (Windows)

Манифест приложения — это XML-файл, который сообщает ОС информацию о сборке. Во время процесса построения манифест приложения встраивается в исполняемый модуль запуска как ресурс Win32. Если манифест приложения присутствует, тогда он читается и обрабатывается до загрузки сборки средой CLR и может повлиять на то, как Windows запускает процесс приложения.

Манифест приложения .NET имеет корневой элемент под названием `assembly` в пространстве имен XML вида `urn:schemas-microsoft-com:asm.v1`:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>  
<assembly manifestVersion="1.0" xmlns="urn:schemas-microsoft-com:asm.v1">  
  <!-- содержимое манифеста -->  
</assembly>
```

Следующий манифест инструктирует ОС о запрашивании поднятия полномочий до административных:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>  
<assembly manifestVersion="1.0" xmlns="urn:schemas-microsoft-com:asm.v1">  
  <trustInfo xmlns="urn:schemas-microsoft-com:asm.v2">  
    <security>  
      <requestedPrivileges>  
        <requestedExecutionLevel level="requireAdministrator" />  
      </requestedPrivileges>  
    </security>  
  </trustInfo>  
</assembly>
```

(Приложения UWP имеют гораздо более сложный манифест, описанный в файле Package.appxmanifest. Он включает объявление функциональных возможностей программы, которые определяют разрешения, выдаваемые ОС. Простейший способ редактирования данного файла предусматривает использование среды Visual Studio, которая отображает диалоговое окно в результате двойного щелчка на файле манифеста.)

Развертывание манифеста приложения

Чтобы добавить манифест приложения к проекту .NET в Visual Studio, необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши на элементе проекта в проводнике решения, выбрать в контекстном меню пункт Add (Добавить), затем New Item (Новый элемент) и, наконец, Application Manifest File (Файл манифеста приложения). После построения манифест будет встроен в выходную сборку.



Инструмент .NET под названием ildasm.exe не замечает присутствия встроенного манифеста приложения. Тем не менее, среда Visual Studio указывает на наличие встроенного манифеста приложения, если дважды щелкнуть на сборке в проводнике решения.

Модули

Содержимое сборки в действительности упаковано внутри промежуточного контейнера, который называется *модулем*. Модуль соответствует файлу, вмещающему содержимое сборки. Причина наличия такого дополнительного контейнерного уровня — позволить сборке охватывать множество файлов; эта возможность имеется в .NET Framework, но отсутствует в .NET 5+ и .NET Core. Взаимосвязь между сборкой и модулем проиллюстрирована на рис. 17.1.

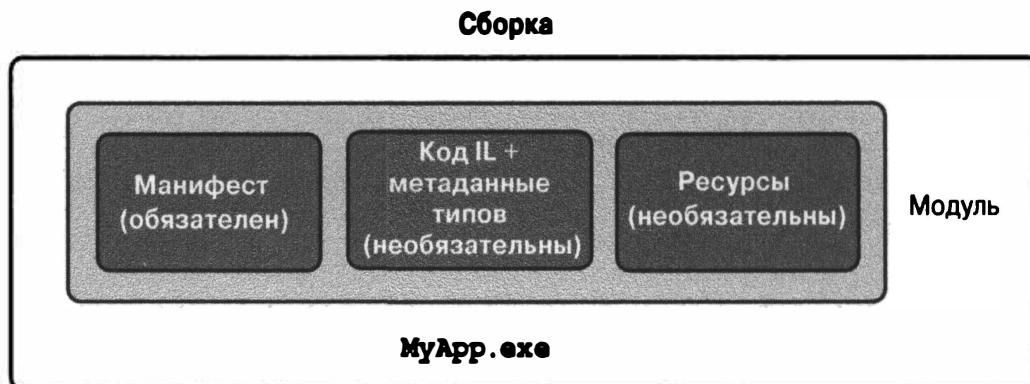


Рис. 17.1. Однофайловая сборка

Хотя .NET не поддерживает многофайловые сборки, временами нужно принимать во внимание дополнительный контейнерный уровень, предлагаемый модулями. Основной сценарий связан с рефлексией (как показано в разделах “Рефлексия сборок” и “Выпуск сборок и типов” главы 18).

Класс Assembly

Класс Assembly из пространства имен System.Reflection представляет собой шлюз для доступа к метаданным сборки во время выполнения. Существует несколько способов получения объекта сборки, простейший из которых предусматривает использование свойства Assembly класса Type:

```
Assembly a = typeof (Program).Assembly;
```

Получить объект Assembly можно также с помощью вызова одного из перечисленных ниже статических методов класса Assembly.

- `GetExecutingAssembly`. Возвращает сборку типа, в котором определена текущая выполняемая функция.
- `GetCallingAssembly`. Делает то же, что и метод `GetExecutingAssembly`, но для функции, которая вызвала текущую выполняемую функцию.
- `GetEntryAssembly`. Возвращает сборку, определяющую первоначальный метод точки входа в приложение.

После получения объекта Assembly можно применять его свойства и методы для запрашивания метаданных сборки и рефлексии ее типов. В табл. 17.1 представлена сводка по членам класса Assembly.

Таблица 17.1. Члены класса Assembly

Члены	Назначение	Разделы, в которых рассматриваются
<code>FullName, GetName</code>	Возвращает полностью заданное имя или объект <code>AssemblyName</code>	“Имена сборок” далее в главе
<code>CodeBase, Location</code>	Местоположение файла сборки	“Загрузка, распознавание и изолирование сборок” далее в главе
<code>Load, LoadFrom, LoadFile</code>	Вручную загружает сборку в текущий домен приложения	“Загрузка, распознавание и изолирование сборок” далее в главе
<code>GetSatelliteAssembly</code>	Находит подчиненную сборку с заданной культурой	“Ресурсы и подчиненные сборки” далее в главе
<code>GetType, GetTypes</code>	Возвращает тип или все типы, определенные в сборке	“Рефлексия и активизация типов” в главе 18
<code>EntryPoint</code>	Возвращает метод точки входа в приложение как объект <code>MethodInfo</code>	“Рефлексия и вызов членов” в главе 18
<code>GetModule, GetModules, ManifestModule</code>	Возвращает модуль, все модули или главный модуль сборки	“Рефлексия сборок” в главе 18
<code>GetCustomAttribute, GetCustomAttributes</code>	Возвращает атрибут или атрибуты сборки	“Работа с атрибутами” в главе 18

Строгие имена и подписание сборок



Назначение строгого имени сборке было важно в .NET Framework по двум причинам:

- оно позволяло загружать сборку в так называемый “глобальный кеш сборок”;
- оно позволяло ссылаться на сборку из других строго именованных сборок.

Назначение строгих имен сборкам в .NET 5+ и .NET Core гораздо менее важно, поскольку их исполняющие среды не имеют глобального кеша сборок и не накладывают ограничение, изложенное во второй причине.

Строго именованная сборка имеет уникальное удостоверение, подделать которое невозможно. Оно получается за счет добавления к манифесту следующих метаданных:

- *的独特ного номера*, который принадлежит авторам сборки;
- *подписанного хеша* сборки, подтверждающего тот факт, что сборка создана владельцем уникального номера.

Такой подход требует пары открытого и секретного ключей. *Открытый ключ* предоставляет уникальный идентифицирующий номер, а *секретный ключ* облегчает подписание.



Подписание с помощью *строгого имени* — не то же самое, что подписание *Authenticode*. Система Authenticode рассматривается далее в главе.

Открытый ключ ценен для гарантирования уникальности ссылок на сборку: строго именованная сборка содержит в своем удостоверении открытый ключ.

В .NET Framework секретный ключ защищает сборку от подделки, т.к. без вашего секретного ключа никто не сможет выпустить модифицированную версию сборки, не нарушив подпись. На практике это полезно при загрузке сборки в глобальный кеш сборок .NET Framework. В .NET 5+ и .NET Core от подписи мало пользы, потому что она никогда не проверяется.

Добавление строгого имени к сборке, ранее обладающей “слабым” именем, изменяет ее удостоверение. По указанной причине сборке имеет смысл назначать строгое имя с самого начала, если вы думаете, что в будущем она потребует строгого имени.

Назначение сборке строгого имени

Чтобы назначить сборке строгое имя, сначала понадобится с помощью утилиты sn. exe сгенерировать пару открытого и секретного ключей:

```
sn.exe -k MyKeyPair.snk
```



Среда Visual Studio устанавливает ярлык под названием **Developer Command Prompt for VS** (Командная подсказка разработчика для Visual Studio), щелчок на котором приводит к открытию окна командной строки с переменной PATH, содержащей путь к папке с инструментами разработчика, такими как sn.exe.

Утилита sn.exe создает новую пару ключей и сохраняет ее в файле MyKeyPair.snk. Если вы впоследствии потеряете этот файл, то навсегда утратите возможность перекомпиляции своей сборки с тем же самым удостоверением.

Подписать сборку с помощью файла MyKeyPair.snk можно за счет обновления файла проекта. Откройте в Visual Studio окно свойств проекта и перейдите в нем на вкладку **Signing** (Подписание); отметьте флажок **Sign the assembly** (Подписать сборку) и выберите свой файл .snk.

Одной и той же парой ключей можно подписывать множество сборок — если их простые имена отличаются, то они получат разные удостоверения.

Имена сборок

“Удостоверение” сборки содержит в себе четыре фрагмента метаданных из манифеста сборки:

- простое имя;
- версия (0.0.0.0, если не указана);
- культура (neutral (нейтральная), если сборка не является подчиненной);
- маркер открытого ключа (null (пустой), если строгое имя не задано).

Простое имя поступает не из какого-то атрибута, а представляет собой имя файла, в который сборка была первоначально скомпилирована (не включая расширение). Таким образом, простое имя сборки System.Xml.dll выглядит как System.Xml. Переименование файла не изменяет простое имя сборки.

Номер версии берется из атрибута AssemblyVersion. Это строка, разделенная на четыре части:

старший_номер.младший_номер.компоновка.редакция

Указать номер версии можно следующим образом:

```
[assembly: AssemblyVersion ("2.5.6.7")]
```

Культура поступает из атрибута AssemblyCulture и применяется к подчиненным сборкам, которые описаны в разделе “Ресурсы и подчиненные сборки” далее в главе.

Маркер открытого ключа извлекается из строгого имени, предоставляемого на этапе компиляции, как обсуждалось в предыдущем разделе.

Полностью заданные имена

Полностью заданное имя сборки — это строка, включающая все четыре идентифицирующих компонента в таком формате:

простое_имя, Version=версия, Culture=культура, PublicKeyToken=открытый_ключ

Например, полностью заданное имя сборки System.Private.CoreLib.dll выглядит как System.Private.CoreLib, Version=4.0.0.0, Culture=neutral, PublicKeyToken=7cec85d7bea7798e.

Если сборка не имеет атрибута AssemblyVersion, то ее версией будет 0.0.0.0. Для неподписанной сборки маркер открытого ключа отображается как null.

Свойство FullName объекта Assembly возвращает полностью заданное имя сборки. При занесении ссылок на сборки в манифест компилятор всегда использует полностью заданные имена.



Полностью заданное имя не включает путь к каталогу, чтобы тем самым содействовать в нахождении сборки на диске. Поиск сборки, расположенной в другом каталоге, является совершенно другой темой, которой посвящен раздел “Загрузка, распознавание и изолирование сборок” далее в главе.

Класс AssemblyName

AssemblyName — класс с типизированными свойствами для каждого из четырех компонентов полностью заданного имени сборки. Класс AssemblyName служит двум целям:

- он разбирает или строит полностью заданное имя сборки;
- он хранит некоторые дополнительные данные, помогающие распознавать (находить) сборку.

Получить объект AssemblyName можно любым из следующих способов:

- создать объект AssemblyName, предоставив полностью заданное имя;
- вызвать метод GetName на существующем объекте Assembly;
- вызвать метод AssemblyName.GetAssemblyName, указав путь к файлу сборки на диске.

Объект AssemblyName можно также создать безо всяких аргументов и затем установить все его свойства, построив в итоге полностью заданное имя. Когда объект AssemblyName сконструирован в подобной манере, он является изменяемым. Ниже перечислены важные свойства и методы AssemblyName:

```
string      FullName     { get; }           // Полностью заданное имя
string      Name        { get; set; }       // Простое имя
Version     Version     { get; set; }       // Версия сборки
CultureInfo CultureInfo { get; set; }     // Для подчиненных сборок
string      CodeBase    { get; set; }       // Местоположение
byte[]      GetPublicKey();                 // 160 байтов
void        SetPublicKey (byte[] key);
byte[]      GetPublicKeyToken();            // 8-байтовая версия
void        SetPublicKeyToken (byte[] publicKeyToken);
```

Само свойство Version — это строго типизированное представление со свойствами Major, Minor, Build и Revision. Метод GetPublicKey возвращает

щает криптографически стойкий открытый ключ; метод `GetPublicKeyToken` возвращает последние восемь байтов, применяемых в устанавливаемом удостоверении.

Вот как использовать `AssemblyName` для получения простого имени сборки:

```
Console.WriteLine (typeof (string).Assembly.GetName ().Name);  
// System.Private.CoreLib
```

А так извлекается версия сборки:

```
string v = myAssembly.GetName ().Version.ToString ();
```

Информационная и файловая версии сборки

Для представления информации, связанной с версиями, доступны еще два атрибута сборки. В отличие от `AssemblyVersion` описанные далее два атрибута не воздействуют на удостоверение сборки и потому не влияют на то, что происходит на этапе компиляции или во время выполнения:

- `AssemblyInformationalVersion`. Версия, отображаемая конечному пользователю. Она видна в поле `Product Version` (Версия продукта) диалогового окна свойств файла. Здесь можно указывать любую строку, например, “5.1 Beta 2”. Обычно всем сборкам в приложении будет назначаться один и тот же номер информационной версии.
- `AssemblyFileVersion`. Позволяет ссылаться на номер текущего варианта данной сборки. Такой номер отображается в поле `File Version` (Файловая версия) диалогового окна свойств файла. Как и `AssemblyVersion`, атрибут должен содержать строку, которая состоит максимум из четырех чисел, разделенных точками.

Подпись Authenticode

Authenticode — это система подписания кода, назначение которой заключается в подтверждении удостоверения издателя. Система *Authenticode* и подписание с помощью *строгого имени* не зависят друг от друга: подписать сборку можно посредством либо какой-то одной, либо обеих систем.

В то время как подписание с помощью строгого имени подтверждает, что сборки А, В и С поступают от одного и того же издателя (предполагая, что не произошла утечка секретного ключа), они не позволяют выяснить, кто конкретно этот издатель. Чтобы узнать, кто является издателем — Джо Албахари или компания Microsoft Corporation — нужна система *Authenticode*.

Система *Authenticode* полезна при загрузке программ из Интернета, т.к. она дает гарантию того, что программа поступает от издателя, зарегистрированного в центре сертификации (*Certificate Authority*), и не была по пути модифицирована. Данная система также обеспечивает выдачу предупреждения о неизвестном издателе (“Unknown Publisher”), когда загруженное приложение запускается впервые. Кроме того, подписание *Authenticode* обязательно при отправке приложений в Магазин Microsoft.

Система Authenticode работает не только со сборками .NET, но также с управляемыми исполняемыми и двоичными модулями, такими как файлы развертывания .msi. Разумеется, система Authenticode не гарантирует, что программа свободна от вредоносного кода — хотя делает это менее вероятным. Дело в том, что физическое или юридическое лицо добровольно указало под исполняемым модулем или библиотекой свое реальное имя (подкрепленное паспортом или документом компании).



Среда CLR не трактует подпись Authenticode как часть удостоверения сборки. Тем не менее, как вскоре будет показано, она может читать и проверять достоверность подписей Authenticode по требованию.

Подписание с помощью Authenticode требует обращения в *центр сертификации* (Certificate Authority — CA) с доказательством вашей персональной личности или удостоверения компании (учредительный договор и т.п.). После того как в CA проверят предъявленные документы, они выдадут сертификат подписания кода X.509, который обычно действителен от одного до пяти лет. Сертификат позволяет подписывать сборки с применением утилиты signtool. Можно также создать сертификат самостоятельно с помощью утилиты makecert, однако он будет распознаваться только на компьютерах, на которых был явно установлен.

Тот факт, что сертификаты (не подписанные самостоятельно) могут работать на любом компьютере, опирается на инфраструктуру открытых ключей. По существу ваш сертификат подписывается с помощью другого сертификата, принадлежащего CA. Центр сертификации является доверенным, потому что все CA загружаются в операционную систему. (Чтобы увидеть их, откройте окно панели управления Windows и введите в поле поиска слово certificate. В разделе Администрирование щелкните на ссылке Управление сертификатами компьютеров. В результате запустится диспетчер сертификатов. Раскройте узел Доверенные корневые центры сертификации и щелкните на папке Сертификаты.) Центр сертификации может отзывать сертификат издателя, если произошла его утечка, поэтому проверка подписи Authenticode требует периодического запрашивания у CA актуальных списков отзываемых сертификатов.

Из-за того, что система Authenticode использует криптографические подписи, подпись Authenticode становится недействительной, если кто-то впоследствии подделает файл. Вопросы, связанные с криптографией, хешированием и подписанием, рассматриваются в главе 20.

Подписание с помощью системы Authenticode

Получение и установка сертификата

Первый шаг связан с получением сертификата для подписания кода в CA (как объясняется ниже во врезке “Где получать сертификат для подписания кода?”). Затем с сертификатом можно либо работать как с файлом, защищенным паролем, либо загрузить его в хранилище сертификатов на компьютере. Преимущество второго варианта в том, что при подписании не придется указывать пароль. Это позволяет избавиться от явного помещения пароля в сценарии построения сборок или пакетные файлы.

Где получать сертификат для подписания кода?

В Windows предварительно загружается несколько корневых центров сертификации, в том числе Comodo, GoDaddy, GlobalSign, DigiCert, Thawte и Symantec.

Существует также торговый посредник K Software, который предлагает сертификаты от вышеупомянутых центров сертификации со скидкой.

Сертификаты Authenticode, выдаваемые K Software, Comodo, GoDaddy и GlobalSign, рекламируются как менее ограничивающие в том, что с их помощью можно также подписывать программы для платформ, отличающихся от Microsoft. В остальном продукты всех поставщиков функционально эквивалентны.

Обратите внимание, что сертификат для SSL в общем случае не может применяться для подписания с помощью Authenticode (несмотря на использование той же самой инфраструктуры X.509). Частично это обусловлено тем, что сертификат для SSL касается доказательства прав собственности на домен, а сертификат Authenticode связан с подтверждением личности.

Чтобы загрузить сертификат в хранилище сертификатов на компьютере, запустите диспетчер сертификатов, как было описано ранее. Откройте папку Личное, щелкните на папке Сертификаты и выберите в контекстном меню пункт Все задачи Импорт. Мастер импорта проведет вас через все необходимые шаги. После того как мастер импорта сертификатов завершит работу, при выбранном сертификате щелкните на кнопке Просмотр, в открывшемся диалоговом окне Сертификат перейдите на вкладку Состав и скопируйте отпечаток сертификата. Это хеш SHA-256, который впоследствии понадобится для удостоверения сертификата во время подписания.



Если вы также хотите подписать свою сборку с помощью строгого имени (что настоятельно рекомендуется), то должны делать это *до* подписания посредством Authenticode. Причина в том, что среди CLR известно о подписях Authenticode, но не наоборот. Таким образом, если вы подпишете свою сборку с помощью строгого имени *после* ее подписания с применением Authenticode, то система Authenticode будет рассматривать добавление средой CLR строгого имени как неавторизованную модификацию и считать, что сборка подделана.

Подписание с помощью `signtool.exe`

Подписывать свои программы с использованием системы Authenticode можно посредством утилиты `signtool`, входящей в состав Visual Studio (загляните в папку `Microsoft SDKs\ClickOnce\SignTool` внутри папки `Program Files`). Следующая команда подписывает файл `LINQPad.exe` с помощью сертификата, хранящегося в папке `My Store` компьютера по имени "Joseph Albahari", используя алгоритм хеширования `SHA256`:

```
signtool sign /n "Joseph Albahari" /fd sha256 LINQPad.exe
```

Можно также задать описание и URL продукта в переключателях /d и /du:

```
... /d LINQPad /du http://www.linqpad.net
```

В большинстве случаев будет также указываться *сервер отмечок времени*.

Отметки времени

После истечения срока действия сертификата вы больше не сможете подписывать программы. Тем не менее, программы, которые были подписаны до истечения срока действия, по-прежнему будут действительными, если при подписании указывался *сервер отмечок времени* с помощью переключателя /tr. Для такой цели центр сертификации предоставляет URI: ниже показан URI для Comodo (или K Software):

```
... /tr http://timestamp.comodoca.com/authenticode /td SHA256
```

Проверка, подписана ли программа

Простейший способ увидеть подпись Authenticode для файла — просмотреть свойства файла в проводнике Windows (на вкладке цифровых сертификатов). Утилита signtool также предоставляет такую возможность.

Ресурсы и подчиненные сборки

Приложение обычно содержит не только исполняемый код, но и такие элементы, как текст, изображения или XML-файлы. Содержимое подобного рода может быть представлено в сборке посредством *ресурсов*. Для ресурсов предусмотрены два перекрывающихся сценария использования:

- встраивание данных, которые не могут располагаться в исходном коде, вроде изображений;
- хранение данных, которым может потребоваться перевод в многоязычном приложении.

Ресурс сборки в конечном итоге представляет собой байтовый поток с именем. О сборке можно говорить, что она содержит словарь байтовых массивов со строковыми ключами. Вот что можно увидеть с помощью утилиты ildasm, если дизассемблировать сборку, которая содержит ресурсы banner.jpg и data.xml:

```
.mresource public banner.jpg
{
    // Offset: 0x00000F58 Length: 0x000004F6
    // Смещение: 0x00000F58 Длина: 0x000004F6
}
.mresource public data.xml
{
    // Offset: 0x00001458 Length: 0x0000027E
    // Смещение: 0x00001458 Длина: 0x0000027E
}
```

В данном случае элементы banner.jpg и data.xml были включены прямо в сборку — каждый в виде собственного встроенного ресурса. Это простейший способ работы.

.NET также позволяет добавлять содержимое через промежуточные контейнеры .resources. Они предназначены для хранения содержимого, которое может требовать перевода на разные языки. Локализованные контейнеры .resources могут быть упакованы как отдельные подчиненные сборки, которые автоматически выбираются во время выполнения на основе языка ОС пользователя.

На рис. 17.2 показана сборка, содержащая два напрямую встроенных ресурса, а также контейнер .resources по имени welcome.resources, для которого созданы две локализованные подчиненные сборки.

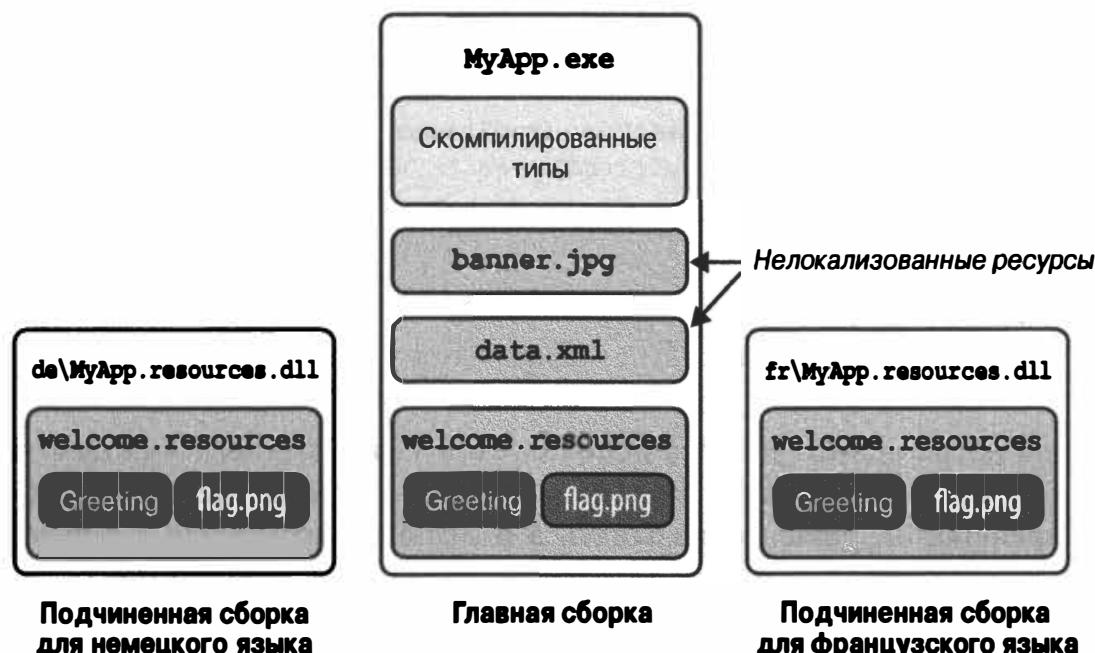


Рис. 17.2. Ресурсы

Встраивание ресурсов напрямую



Встраивание ресурсов внутрь сборок в приложениях для Магазина Microsoft не поддерживается. Взамен любые дополнительные файлы необходимо добавлять в пакет развертывания и обращаться к ним, читая в приложении объект StorageFolder (свойство Package.Current.InstalledLocation).

Для встраивания ресурса внутрь сборки напрямую с использованием Visual Studio понадобится выполнить следующие действия:

- добавить файл к проекту;
- установить действие построения проекта в Embedded Resource (Встроенный ресурс).

Среда Visual Studio всегда предваряет имена ресурсов стандартным пространством имен проекта, а также именами всех подпапок, ведущих к файлу. Таким образом, если стандартным пространством имен проекта было Westwind.Reports, а файл назывался banner.jpg и находился в папке pictures, то имя ресурса выглядело бы как Westwind.Reports.pictures.banner.jpg.



Имена ресурсов чувствительны к регистру символов, что делает имена подпапок с ресурсами в Visual Studio фактически чувствительными к регистру.

Чтобы извлечь ресурс, необходимо вызвать метод `GetManifestResourceStream` на объекте сборки, содержащей ресурс. Упомянутый метод возвращает поток, который затем допускается читать подобно любому другому потоку:

```
Assembly a = Assembly.GetEntryAssembly();
using (Stream s = a.GetManifestResourceStream ("TestProject.data.xml"))
using (XmlReader r = XmlReader.Create (s))
    ...
System.Drawing.Image image;
using (Stream s = a.GetManifestResourceStream ("TestProject.banner.jpg"))
    image = System.Drawing.Image.FromStream (s);
```

Возвращенный поток поддерживает позиционирование, поэтому можно поступить и так:

```
byte [] data;
using (Stream s = a.GetManifestResourceStream ("TestProject.banner.jpg"))
    data = new BinaryReader (s).ReadBytes ((int) s.Length);
```

Если для встраивания ресурса используется Visual Studio, тогда нужно не забыть о включении префикса, основанного на пространстве имен. Во избежание ошибки префикс разрешено указывать в отдельном аргументе с применением *типа*. В качестве префикса используется пространство имен данного типа:

```
using (Stream s = a.GetManifestResourceStream (typeof (X) , "data.xml"))
```

Здесь X может быть любым типом с желаемым пространством имен ресурса (обычно это тип в той же папке проекта).



Установка действия построения в Visual Studio для элемента проекта в **Resource** (Ресурс) внутри WPF-приложения — *не то же самое*, что установка его действия построения в **Embedded Resource**. В первом случае фактически добавляется элемент в файл .resources по имени *<ИмяСборки>.g.resources*, к содержимому которого можно получать доступ через класс `Application` инфраструктуры WPF, применяя URI в качестве ключа.

Вдобавок в инфраструктуре WPF переопределен термин “ресурс”, что еще больше увеличивает путаницу. *Статические ресурсы и динамические ресурсы* не имеют никакого отношения к ресурсам сборки!

Метод `GetManifestResourceNames` возвращает имена всех ресурсов в сборке.

Файлы .resources

Файлы .resources представляют собой контейнеры для потенциально локализуемого содержимого. Файл .resources в итоге становится встроенным ресурсом внутри сборки — точно так же, как файл другого вида.

Разница заключается в том, что вы можете выполнять следующие действия:

- для начала упаковывать свое содержимое в файл .resources;
- получать доступ к содержимому через объект ResourceManager или URI типа “pack”, а не посредством метода GetManifestResourceStream.

Файлы .resources являются двоичными и не предназначены для редактирования человеком; таким образом, при работе с ними придется полагаться на инструменты, предоставляемые .NET и Visual Studio. Стандартный подход со строками или простыми типами данных предусматривает применение файла в формате .resx, который может быть преобразован в файл .resources с помощью Visual Studio либо инструмента resgen. Формат .resx также подходит для изображений, предназначенных для приложения Windows Forms или ASP.NET.

В приложении WPF должно использоваться действие построения Resource (Ресурс) среды Visual Studio для изображений или похожего содержимого, нуждающегося в ссылке через URI. Это применимо вне зависимости от того, необходима локализация или нет.

Мы опишем упомянутые действия в последующих разделах.

Файлы .resx

Файл .resx имеет формат этапа проектирования, предназначенный для получения файлов .resources. Файл .resx использует XML и структурирован в виде пар “имя/значение”, как показано ниже:

```
<root>
  <data name="Greeting">
    <value>hello</value>
  </data>
  <data name="DefaultFontSize" type="System.Int32, mscorelib">
    <value>10</value>
  </data>
</root>
```

Чтобы создать файл .resx в Visual Studio, понадобится добавить элемент проекта типа Resources File (Файл ресурсов). Оставшаяся часть работы будет произведена автоматически:

- создается корректный заголовок;
- предоставляется визуальный конструктор для добавления строк, изображений, файлов и других видов данных;
- файл .resx автоматически преобразуется в формат .resources и встраивается в сборку при компиляции;
- генерируется класс, предназначенный для облегчения доступа к данным в более позднее время.



Визуальный конструктор ресурсов добавляет изображения как объекты типа Image (сборка System.Drawing.dll), а не как байтовые массивы, делая изображения неподходящими для приложений WPF.

Чтение файлов .resources



В случае создания файла .resx в Visual Studio автоматически генерируется класс с таким же именем, который имеет свойства для извлечения каждого элемента.

Класс ResourceManager читает файлы .resources, встроенные внутрь сборки:

```
ResourceManager r = new ResourceManager ("welcome",
                                         Assembly.GetExecutingAssembly());
```

(Если ресурс был скомпилирован в Visual Studio, тогда первый аргумент должен быть предварен названием пространства имен.)

Далее можно получить доступ к содержимому, вызывая метод GetString или GetObject и выполняя приведение:

```
string greeting = r.GetString ("Greeting");
int fontSize    = (int) r.GetObject ("DefaultFontSize");
Image image     = (Image) r.GetObject ("flag.png");
```

Перечисление содержимого файла .resources производится следующим образом:

```
ResourceManager r = new ResourceManager (...);
ResourceSet set = r.GetResourceSet (CultureInfo.CurrentCulture,
                                    true, true);
foreach (System.Collections.DictionaryEntry entry in set)
    Console.WriteLine (entry.Key);
```

Создание ресурса с доступом через URI типа "pack" в Visual Studio

В приложении WPF файлы XAML должны иметь возможность доступа к ресурсам по URI. Например:

```
<Button>
    <Image Height="50" Source="flag.png"/>
</Button>
```

Или, если ресурс находится в другой сборке:

```
<Button>
    <Image Height="50" Source="UtilsAssembly;Component/flag.png"/>
</Button>
```

(Component — это литеральное ключевое слово.)

Для создания ресурсов, которые могут загружаться в подобной манере, применять файлы .resx не получится. Взамен придется добавлять файлы в проект и устанавливать для них действие построения в Resource (не Embedded Resource). Среда Visual Studio скомпилирует их в файл .resources по имени <ИмяСборки>.g.resources, в котором также содержатся скомпилированные файлы XAML (.baml).

Чтобы программно загрузить ресурс с ключом URI, необходимо вызвать метод Application.GetResourceStream:

```
Uri u = new Uri ("flag.png", UriKind.Relative);
using (Stream s = Application.GetResourceStream (u).Stream)
```

Обратите внимание на использование относительного URI. Можно также применять абсолютный URI в показанном ниже формате (три запятых подряд — это не опечатка):

```
Uri u = new Uri ("pack://application:,,,/flag.png");
```

Если вместо Application указать объект Assembly, то содержимое можно извлечь с помощью объекта ResourceManager:

```
Assembly a = Assembly.GetExecutingAssembly();
ResourceManager r = new ResourceManager (a.GetName().Name + ".g", a);
using (Stream s = r.GetStream ("flag.png"))
    ...
```

Объект ResourceManager также позволяет выполнять перечисление содержимого контейнера .g.resources внутри заданной сборки.

Подчиненные сборки

Данные, встроенные в файл .resources, являются локализуемыми.

Проблема локализации ресурсов возникает, когда приложение запускается под управлением версии Windows, ориентированной на отображение всех элементов на другом языке. В целях согласованности приложение должно использовать тот же самый язык.

Типичная настройка предполагает наличие следующих компонентов:

- главная сборка, содержащая файлы .resources для стандартного, или *запасного*, языка;
- отдельные *подчиненные сборки*, которые содержат локализованные файлы .resources, переведенные на различные языки.

Когда приложение запускается, исполняющая среда .NET выясняет язык текущей ОС (через свойство CultureInfo.CurrentCulture). Всякий раз, когда запрашивается ресурс с применением объекта ResourceManager, исполняющая среда ищет локализованную подчиненную сборку. Если такая сборка доступна и содержит запрошенный ключ ресурса, тогда этот ресурс используется вместо его версии из главной сборки.

Другими словами, расширять языковую поддержку можно просто добавлением новых подчиненных сборок, не изменяя главную сборку.



Подчиненная сборка не может содержать исполняемый код — допускается наличие только ресурсов.

Подчиненные сборки развертываются в подкаталогах папки сборки, как показано ниже:

```
programBaseFolder\MyProgram.exe
    \MyLibrary.exe
    \XX\MyProgram.resources.dll
    \XX\MyLibrary.resources.dll
```

Здесь XX — двухбуквенный код языка (скажем, de для немецкого) либо код языка и региона (например, en-GB для английского в Великобритании). Такая система именования позволяет среди CLR находить и автоматически загружать корректную подчиненную сборку.

Построение подчиненных сборок

Вспомните предшествующий пример файла .resx, который имел следующее содержимое:

```
<root>
  ...
<data name="Greeting">
  <value>hello</value>
</data>
</root>
```

Затем во время выполнения мы извлекали приветственное сообщение (Greeting):

```
ResourceManager r = new ResourceManager ("welcome",
                                         Assembly.GetExecutingAssembly ());
Console.WriteLine (r.GetString ("Greeting"));
```

Предположим, что при запуске в среде немецкоязычной ОС Windows вместо "hello" требуется вывести "hallo". Первый шаг заключается в добавлении еще одного файла .resx по имени welcome.de.resx, в котором строка hello заменяется строкой hallo:

```
<root>
  <data name="Greeting">
    <value>hallo</value>
  </data>
</root>
```

В Visual Studio это все, что необходимо сделать — при компиляции в подкаталоге de будет автоматически создана подчиненная сборка по имени MyApp.resources.dll.

Тестирование подчиненных сборок

Для эмуляции выполнения в среде ОС с другим языком потребуется изменить свойство CurrentUICulture с применением класса Thread:

```
System.Threading.Thread.CurrentThread.CurrentCulture
  = new System.Globalization.CultureInfo ("de");
```

CultureInfo.CurrentCulture — версия того же самого свойства, допускающая только чтение.



Удобная стратегия тестирования предусматривает локализацию слов, которые по-прежнему должны читаться как английские, но не использовать стандартные латинские символы Unicode (например, Łośałizę).

Поддержка со стороны визуальных конструкторов Visual Studio

Визуальные конструкторы в Visual Studio предлагают расширенную поддержку для локализуемых компонентов и визуальных элементов. Визуальный конструктор WPF имеет собственный рабочий поток для локализации; другие визуальные конструкторы, основанные на Component, применяют свойство, предназначенное только для этапа проектирования, которое показывает, что компонент или элемент управления Windows Forms имеет свойство Language. Для настройки на другой язык нужно просто изменить значение свойства Language и затем приступить к модификации компонента. Значения всех свойств элементов управления с атрибутом Localizable будут сохраняться в файле .resx для конкретного языка. Переключаться между языками можно в любой момент, просто изменения свойство Language.

Культуры и подкультуры

Культуры разделяются на собственно культуры и подкультуры. Культура представляет конкретный язык, а подкультура — региональный вариант этого языка. Исполняющая среда .NET следует стандарту RFC-1766, который представляет культуры и подкультуры с помощью двухбуквенных кодов. Ниже показаны коды для английской и немецкой культур:

en
de

А вот коды для австралийской английской и австрийской немецкой подкультур:

en-AU
de-AT

Культура представляется в .NET с помощью класса System.Globalization.CultureInfo. Просмотреть текущую культуру в приложении можно следующим образом:

```
Console.WriteLine (System.Threading.Thread.CurrentCulture);  
Console.WriteLine (System.Threading.Thread.CurrentUICulture);
```

Выполнение такого кода на компьютере, локализованном для Австралии, демонстрирует разницу между двумя указанными свойствами:

en-AU
en-US

Свойство CurrentCulture отражает региональные параметры в панели управления Windows, тогда как свойство CurrentUICulture указывает язык пользовательского интерфейса ОС.

Региональные параметры включают аспекты вроде часового пояса, а также форматов для валюты и дат. Свойство CurrentCulture определяет стандартное поведение для функций, подобных DateTime.Parse. Региональные параметры могут быть настроены в точке, где они больше не соответствуют какой-либо культуре.

Свойство `CurrentUICulture` определяет язык, посредством которого компьютер взаимодействует с пользователем. Австралия не нуждается в отдельной версии английского языка для данной цели, поэтому используется версия английского, принятая в США. Например, если в связи с работой приходится несколько месяцев проводить в Австрии, то имеет смысл изменить текущую культуру в панели управления на немецкий язык в Австрии. Однако в случае неумения говорить по-немецки свойство `CurrentUICulture` может остаться установленным в английский язык, принятый в США.

Для определения корректной подчиненной сборки, подлежащей загрузке, объект `ResourceManager` по умолчанию применяет свойство `CurrentUICulture` текущего потока. При загрузке ресурсов объект `ResourceManager` использует механизм обхода. Если сборка для подкультуры определена, то она и будет применяться; в противном случае будет задействована обобщенная культура. Если обобщенная культура отсутствует, тогда будет произведен возврат к стандартной культуре в главной сборке.

Загрузка, распознавание и изолирование сборок

Загрузка сборки из известного местоположения представляет собой относительно несложный процесс. Мы будем его называть просто *загрузкой сборок*.

Однако чаще вам (или среде CLR) придется загружать сборку, зная только ее полное (или простое) имя. Процесс называется *распознаванием сборок*. Распознавание сборок отличается от загрузки тем, что сборку сначала нужно найти.

Распознавание сборок инициируется в двух сценариях:

- средой CLR, когда ей необходимо распознать зависимость;
- явно, когда вы вызываете метод вроде `Assembly.Load(AssemblyName)`.

В качестве иллюстрации первого сценария рассмотрим приложение, состоящее из главной сборки и нескольких статически ссылаемых библиотечных сборок (зависимостей), как показано в следующем примере:

```
AdventureGame.dll          // Главная сборка
Terrain.dll                // Ссылаемая сборка
UIEngine.dll               // Ссылаемая сборка
```

Под “стatische ссылаемой” мы подразумеваем, что сборка `AdventureGame.dll` была скомпилирована со ссылками на сборки `Terrain.dll` и `UIEngine.dll`. Сам компилятор не нуждается в выполнении распознавания сборок, т.к. ему было сообщено (либо явно, либо инструментом MSBuild), где найти `Terrain.dll` и `UIEngine.dll`. На этапе компиляции он записывает *полные имена* сборок `Terrain` и `UIEngine` в метаданные `AdventureGame.dll`, но не дает информации, где они находятся. Таким образом, во время выполнения сборки `Terrain` и `UIEngine` должны быть *распознаны*.

Загрузка и распознавание сборки обрабатывается *контекстом загрузки сборки* (`Assembly Load Context` — ALC), а именно — экземпляром класса

са `AssemblyLoadContext` из пространства имен `System.Runtime.Loader`. Поскольку `AdventureGame.dll` является главной сборкой в приложении, для распознавания ее зависимостей среда CLR использует *стандартный контекст ALC* (`AssemblyLoadContext.Default`). Стандартный контекст ALC распознает зависимости, сначала производя поиск файла по имени `AdventureGame.deps.json` (который описывает, где искать зависимости), а если упомянутый файл отсутствует, тогда стандартный контекст ALC просмотрит базовую папку приложения и найдет там `Terrain.dll` и `UIEngine.dll`. (Стандартный контекст ALC также распознает сборки исполняющей среды .NET.)

Как разработчик вы можете динамически загружать дополнительные сборки во время выполнения программы. Например, вы можете принять решение упаковать необязательные функциональные средства в сборки, которые будут разворачиваться, только когда они приобретены. В таком случае при наличии дополнительных сборок их можно было бы загружать с помощью вызова `Assembly.Load(AssemblyName)`.

Более сложный пример предусматривает реализацию системы подключаемых модулей, позволяющей пользователю предоставлять сторонние сборки, которые ваше приложение обнаруживает и загружает во время выполнения, чтобы расширить свою функциональность. Здесь возникает сложность, потому что каждая подключаемая сборка может иметь собственные зависимости, которые тоже должны быть распознаны.

За счет создания подкласса класса `AssemblyLoadContext` и переопределения его метода распознавания сборок (`Load`) вы можете управлять тем, каким образом подключаемый модуль будет искать свои зависимости. Скажем, вы можете решить, что подключаемый модуль должен находиться в собственной папке и там же обязаны располагаться его зависимости.

Контексты ALC служат еще одной цели: создавая отдельный экземпляр `AssemblyLoadContext` для каждого набора (подключаемый модуль плюс зависимости), вы можете сохранять наборы изолированными, гарантируя тем самым, что их зависимости будут загружаться параллельно и не мешать друг другу (и размещающему приложению). Например, каждый контекст может иметь свою версию JSON.NET. Следовательно, в дополнение к *загрузке и распознаванию* контексты ALC также предлагают механизм для *изолирования*. При определенных условиях контексты ALC можно даже *выгружать*, освобождая занимаемую ими память.

В настоящем разделе подробно обсуждается каждый из этих принципов, а также рассматриваются перечисленные ниже темы:

- как контексты ALC обрабатывают загрузку и распознавание;
- роль стандартного контекста ALC;
- метод `Assembly.Load` и контекстные ALC;
- как использовать класс `AssemblyDependencyResolver`;
- как загружать и распознавать неуправляемые библиотеки;
- выгрузка контекстов ALC;
- унаследованные методы загрузки сборок.

Затем мы применим теорию на практике и продемонстрируем процесс написания системы подключаемых модулей с изоляцией контекстов ALC.



Класс `AssemblyLoadContext` появился в .NET 5+ и .NET Core. В инфраструктуре .NET Framework контексты ALC присутствовали, но были ограниченными и скрытыми: единственный способ создания и непрямого взаимодействия с ними предусматривал использование статических методов `LoadFile(string)`, `LoadFrom(string)` и `Load(byte[])` класса `Assembly`. По сравнению с API-интерфейсом контекстов ALC эти методы обладают низкой гибкостью, а их применение может приводить к неожиданностям (особенно при обработке зависимостей). По указанной причине в .NET 5+ и .NET Core лучше отдавать предпочтение явному использованию API-интерфейса `AssemblyLoadContext`.

Контексты загрузки сборок

Как только что отмечалось, класс `AssemblyLoadContext` несет ответственность за загрузку и распознавание сборок, а также за предоставление механизма для изолирования.

Каждый .NET-объект `Assembly` относится в точности к одному объекту `AssemblyLoadContext`. Вот как можно получить контекст ALC для сборки:

```
Assembly assem = Assembly.GetExecutingAssembly();
AssemblyLoadContext context = AssemblyLoadContext.GetLoadContext(assem);
Console.WriteLine(context.Name);
```

И наоборот, контекст ALC можно считать “содержащим” или “владеющим” сборками, которые легко получить через его свойство `Assemblies`. Продолжим предыдущий пример:

```
foreach (Assembly a in context.Assemblies)
    Console.WriteLine(a.FullName);
```

Класс `AssemblyLoadContext` также имеет статическое свойство `All`, которое позволяет организовать перечисление по всем контекстам ALC.

Создать новый контекст ALC можно просто за счет создания экземпляра `AssemblyLoadContext` и предоставления имени (имя удобно при отладке), хотя чаще всего вы будете сначала создавать подкласс класса `AssemblyLoadContext`, чтобы появилась возможность реализовать логику для *распознавания зависимостей*; другими словами, загружать сборку по ее имени.

Загрузка сборок

Класс `AssemblyLoadContext` предлагает следующие методы для явной загрузки сборки в контекст:

```
public Assembly LoadFromAssemblyPath(string assemblyPath);
public Assembly LoadFromStream(Stream assembly, Stream assemblySymbols);
```

Первый метод загружает сборку из файла по указанному пути, а второй — из объекта `Stream` (который может поступать прямо из памяти). Второй параметр необязателен и соответствует содержимому файла отладки проекта (`.pdb`),

который делает возможным включение в трассировку стека информации об исходном коде во время его выполнения (полезно при сообщении об исключениях).

Для обоих методов распознавание не происходит.

Показанный далее код загружает сборку `c:\temp\foo.dll` в ее собственный контекст ALC:

```
var alc = new AssemblyLoadContext ("Test");
Assembly assem = alc.LoadFromAssemblyPath (@"c:\temp\foo.dll");
```

Если сборка допустима, тогда загрузка всегда будет успешной при условии соблюдения одного важного правила: *простое имя* сборки должно быть уникальным внутри ее контекста ALC. Это означает, что вы не сможете загрузить несколько версий сборки с тем же самым именем внутрь единственного контекста ALC; в таком случае потребуется создать дополнительные контексты ALC. Вот как можно было бы загрузить еще одну копию `foo.dll`:

```
var alc2 = new AssemblyLoadContext ("Test 2");
Assembly assem2 = alc2.LoadFromAssemblyPath (@"c:\temp\foo.dll");
```

Обратите внимание, что типы, которые происходят из разных объектов `Assembly`, не будут совместимыми, даже если в остальном сборки идентичны. В нашем примере типы в `assem` несовместимы с типами в `assem2`.

После загрузки сборку нельзя выгрузить, кроме как путем выгрузки ее контекста ALC (см. раздел “Выгрузка контекстов ALC” далее в главе). Среда CLR поддерживает блокировку файла в течение периода времени, пока он загружен.



Вы можете избежать блокировки файла, загружая сборку через **байтовый массив**:

```
bytes[] bytes = File.ReadAllBytes (@"c:\temp\foo.dll");
var ms = new MemoryStream (bytes);
var assem = alc.LoadFromStream (ms);
```

Такой прием обладает двумя недостатками.

- Свойство `Location` сборки окажется пустым. Иногда полезно знать, откуда была загружена сборка (и некоторые API-интерфейсы полагаются на то, что свойство `Location` заполнено).
- Расход закрытой памяти должен немедленно увеличиться, чтобы полностью уместить сборку. Если взамен вы загружаете по имени файла, то среда CLR применяет размещенные в памяти файлы, делая возможным ленивую загрузку и совместное использование данных разными процессами. Кроме того, в случае нехватки памяти ОС может освободить память, занимаемую сборкой, и при необходимости загрузить ее заново, не осуществляя запись в файл подкачки.

LoadFromAssemblyName

Класс `AssemblyLoadContext` также предлагает метод для загрузки сборки по имени:

```
public Assembly LoadFromAssemblyName (AssemblyName assemblyName);
```

В отличие от двух только что обсужденных методов вы не передаете какую-либо информацию для указания, где находится сборка; взамен вы инструктируете контекст ALC о том, что сборку нужно распознать.

Распознавание сборок

Предыдущий метод инициирует *распознавание сборок*. Среда CLR тоже инициирует распознавание сборок, когда загружает зависимости. Скажем, пусть сборка A статически ссылается на сборку B. Чтобы распознать сборку B, среда CLR инициирует распознавание сборок в том *контексте ALC, куда была загружена сборка A*.



Среда CLR распознает зависимости путем запуска распознавания сборок безотносительно к тому, куда загружена запускающая сборка — в стандартный или в специальный контекст ALC. Разница лишь в том, что в стандартном контексте ALC правила распознавания жестко закодированы, а в специальном контексте ALC вы пишете правила самостоятельно.

Ниже описано, что затем происходит.

1. Среда CLR сначала проверяет, происходило или нет такое распознавание в этом контексте ALC (с совпадающим полным именем сборки); если происходило, тогда она возвращает объект `Assembly`, который возвращала ранее.
2. В противном случае среда CLR вызывает (виртуальный защищенный) метод `Load` на контексте ALC, который делает работу, связанную с нахождением и загрузкой сборки. Метод `Load` стандартного контекста ALC применяет правила, рассматриваемые в разделе “Стандартный контекст ALC” далее в главе. В ситуации со специальным контектом ALC выбор местоположения для сборки целиком зависит от вас. Например, вы можете просмотреть какой-то каталог и при обнаружении сборки вызвать метод `LoadFromAssemblyPath`. Также совершенно законно возвращать уже загруженную сборку из того же самого или другого контекста ALC (мы продемонстрируем это в разделе “Реализация системы подключаемых модулей” далее в главе).
3. Если на шаге 2 возвращается `null`, тогда среда CLR вызывает метод `Load` на стандартном контексте ALC (что служит удобным “запасным вариантом” для распознавания сборок исполняющей среды .NET и общих сборок приложения).
4. Если на шаге 3 возвращается `null`, тогда среда CLR генерирует события `Resolving` для обоих контекстов ALC — сначала для стандартного, затем для специального.
5. (В целях совместимости с .NET Framework): если сборка все еще не была распознана, тогда генерируется событие `AppDomain.CurrentDomain.AssemblyResolve`.



После завершения такого процесса среда CLR проводит “контроль корректности” определенного вида, чтобы гарантировать, что любая загруженная сборка имеет имя, совместимое с запрошенным. Простое имя обязано совпадать; маркер открытого ключа должен совпадать, если он указан. Версия не обязательно должна совпадать — она может быть выше или ниже запрошенной.

Из всего изложенного можно сделать вывод, что существуют два способа реализации распознавания сборок в специальном контексте ALC.

- Переопределение метода Load контекста ALC. Это дает вашему контексту ALC “первое слово” касательно происходящего, что обычно желательно (и важно, когда вам нужна изоляция).
- Обработка события Resolving контекста ALC. Оно генерируется только *после* того, как стандартному контексту ALC не удалось распознать сборку.



Если вы присоедините к событию Resolving несколько обработчиков событий, тогда “победит” тот, который первым возвратит значение, отличающееся от null.

В целях иллюстрации давайте предположим, что мы хотим загрузить сборку, о которой нашему главному приложению ничего не было известно на этапе компиляции, имеющую имя foo.dll и расположенную в папке c:\temp (т.е. не там, где находится приложение). Вдобавок пусть сборка foo.dll имеет закрытую зависимость от bar.dll. Нам необходимо удостовериться в том, что при загрузке сборки c:\temp\foo.dll и выполнении ее кода сборка c:\temp\bar.dll может быть корректно распознана. Нам также нужно убедиться в том, что сборка foo и ее закрытая зависимость bar не мешают работе главного приложения.

Начнем с реализации специального контекста ALC, в котором переопределен метод Load:

```
using System.IO;
using System.Runtime.Loader;

class FolderBasedALC : AssemblyLoadContext
{
    readonly string _folder;
    public FolderBasedALC (string folder) => _folder = folder;
    protected override Assembly Load (AssemblyName assemblyName)
    {
        // Попытка найти сборку:
        string targetPath = Path.Combine (_folder, assemblyName.Name + ".dll");
        if (File.Exists (targetPath))
            return LoadFromAssemblyPath (targetPath); // Загрузить сборку
        return null; // Нам не удалось ее найти: это может
                    // быть сборка исполняющей среды .NET
    }
}
```

Обратите внимание, что в методе Load мы возвращаем null, если файл сборки отсутствует. Это важная проверка, потому что у foo.dll также имеются зависимости от сборок BCL исполняющей среды .NET; следовательно, метод Load будет вызываться для таких сборок, как System.Runtime. Возвращая null, мы позволяем среде CLR обратиться за помощью к стандартному контексту ALC, который корректно распознает сборки подобного рода.



Следует отметить, что мы не пытаемся загрузить в свой контекст ALC сборки BCL исполняющей среды .NET. Дело в том, что системные сборки не рассчитаны на запуск вне стандартного контекста ALC, и попытка их загрузки в свой контекст ALC может привести к некорректному поведению, ухудшению производительности и непредсказуемой несовместимости типов.

Вот как можно было бы использовать наш специальный контекст ALC для загрузки сборки foo.dll из c:\temp:

```
var alc = new FolderBasedALC (@"c:\temp");
Assembly foo = alc.LoadFromAssemblyPath (@"c:\temp\foo.dll");
...
```

Когда позже мы начнем обращаться к коду внутри сборки foo, в какой-то момент среде CLR потребуется распознать зависимость от bar.dll. Именно тогда запустится метод Load специального контекста ALC и успешно найдет сборку bar.dll в c:\temp.

В данном случае наш метод Load также способен распознавать foo.dll, так что мы можем упростить код:

```
var alc = new FolderBasedALC (@"c:\temp");
Assembly foo = alc.LoadFromAssemblyName (new AssemblyName ("foo"));
...
```

А теперь давайте рассмотрим альтернативное решение: вместо создания подкласса класса AssemblyLoadContext и переопределения метода Load можно было бы создать экземпляр простого класса AssemblyLoadContext и обработать событие Resolving:

```
var alc = new AssemblyLoadContext ("test");
alc.Resolving += (loadContext, assemblyName) =>
{
    string targetPath = Path.Combine (@"c:\temp", assemblyName.Name + ".dll");
    return alc.LoadFromAssemblyPath (targetPath); // Загрузить сборку
};
Assembly foo = alc.LoadFromAssemblyName (new AssemblyName ("foo"));
```

Обратите внимание, что нам не нужно проверять, существует ли сборка. Поскольку событие Resolving инициируется *после* того, как стандартный контекст ALC получил шанс распознать сборку (и только когда он потерпел неудачу), наш обработчик не запускается для сборок BCL исполняющей среды .NET. Это делает решение более простым, хотя существует и затруднение. Вспомните, что в имеющемся сценарии главному приложению ничего не было известно о

`foo.dll` или `bar.dll` на этапе компиляции. Но вполне вероятно, что главное приложение зависит от сборок под названием `foo.dll` или `bar.dll`. В таком случае событие `Resolving` никогда не возникнет, а взамен загружаются сборки `foo` и `bar`. Другими словами, добиться изоляции нам не удастся.



Наш класс `FolderBasedALC` хорош для иллюстрации концепции распознавания сборок, но в реальности от него меньше пользы, т.к. он не способен справляться с зависимостями NuGet, специфичными к платформе, и с зависимостями NuGet, относящимися к разработке (в случае библиотечных проектов). В разделе “Класс `AssemblyDependencyResolver`” далее в главе будет описано решение этой задачи, а в разделе “Реализация системы подключаемых модулей” приводится подробный пример.

Стандартный контекст ALC

Когда приложение запускается, среда CLR присваивает статическому свойству `AssemblyLoadContext.Default` специальный контекст ALC. Стандартный контекст ALC — это место, куда загружается стартовая сборка вместе со своими статически ссылаемыми зависимостями и сборками BCL исполняющей среды .NET.

Стандартный контекст ALC сначала просматривает пути *стандартного зондирования* для автоматического распознавания сборок (см. раздел “Стандартное зондирование” далее в главе). Обычно они соответствуют местоположениям, указанным в файлах `.deps.json` и `.runtimeconfig.json` приложения.

Если контекст ALC не смог найти сборку в путях стандартного зондирования, тогда инициируется его событие `Resolving`. Обработка этого события позволяет загружать сборку из других местоположений, что означает возможность развертывания зависимостей приложения в дополнительных местах, таких как подпапки, общие папки или даже двоичные ресурсы внутри размещающей сборки:

```
AssemblyLoadContext.Default.Resolving += (loadContext, assemblyName) =>
{
    // Попробовать найти assemblyName, возвратив объект Assembly или null
    // Обычно после нахождения файла будет вызываться метод LoadFromAssemblyPath
    // ...
};
```

Событие `Resolving` в стандартном контексте ALC также инициируется, когда специальный контекст ALC потерпел неудачу с распознаванием (выражаясь по-другому, когда его метод `Load` возвратил `null`), и стандартному контексту ALC не удается распознать сборку.

Кроме того, вы можете загружать сборки в стандартный контекст ALC и за пределами обработчика события `Resolving`. Однако прежде чем продолжить, вы должны сначала выяснить, есть ли возможность решить задачу лучше за счет применения отдельного контекста ALC или с помощью подходов, описанных в следующем разделе (которые используют *исполняемые и контекстные*

ALC). Жесткая привязка к стандартному контексту ALC делает ваш код хрупким, потому что он не может быть изолирован как единое целое (скажем, посредством инфраструктур модульного тестирования или LINQPad).

Если все-таки хотите продолжить, тогда предпочтительнее вызывать *метод распознавания* (т.е. `LoadFromAssemblyName`), а не *метод загрузки* (такой как `LoadFromAssemblyPath`) — особенно если ваша сборка является статически ссылаемой. Причина в том, что сборка может быть уже загружена, и в такой ситуации метод `LoadFromAssemblyName` возвратит объект загруженной сборки, в то время как метод `LoadFromAssemblyPath` сгенерирует исключение.

(В случае метода `LoadFromAssemblyPath` вы также можете рискнуть загрузить сборку из места, которое несовместимо с местоположениями, где ее искал бы стандартный механизм распознавания контекста ALC.)

Если сборка находится в месте, где контекст ALC не способен найти ее автоматически, вы все равно можете следовать этой процедуре и дополнительно обработать событие `Resolving` контекста ALC.

Следует отметить, что при вызове метода `LoadFromAssemblyName` не нужно указывать полное имя; подойдет простое имя (и оно допустимо, даже если сборка строго именована):

```
AssemblyLoadContext.Default.LoadFromAssemblyName ("System.Xml");
```

Тем не менее, если вы включаете маркер открытого ключа, то он обязан совпадать с тем, что загружается.

Стандартное зондирование

Пути стандартного зондирования обычно включают перечисленные ниже.

- Пути, указанные в файле `AppName.deps.json` (где `AppName` — имя главной сборки приложения). Если этот файл отсутствует, тогда взамен используется базовая папка приложения.
- Папки, содержащие системные сборки исполняющей среды .NET (если приложение зависит от них).

MSBuild автоматически генерирует файл по имени `AppName.deps.json`, в котором описано, где искать все зависимости приложения. Сюда входят сборки, независимые от платформы, которые размещаются в базовой папке приложения, и сборки, специфичные к платформе, которые находятся в подкаталоге `runtimes\` внутри подпапки, подобной `win` или `unix`.

Пути, указанные в сгенерированном файле `.deps.json`, являются относительными к базовой папке приложения — или любым дополнительным папкам, которые вы указываете в разделе `additionalProbingPaths` конфигурационных файлов `AppName.runtimeconfig.json` и/или `AppName.runtimeconfig.dev.json` (последний предназначен только для среды разработки).

“Текущий” контекст ALC

В предыдущем разделе мы предостерегали от явной загрузки сборок в стандартный контекст ALC. Взамен вы обычно хотите загружать/распознавать в “текущем” контексте ALC.

В большинстве случаев “текущий” контекст ALC содержит сборку, выполняющуюся в настоящее время:

```
var executingAssem = Assembly.GetExecutingAssembly();
var alc = AssemblyLoadContext.GetLoadContext(executingAssem);

Assembly assem = alc.LoadFromAssemblyName(...); // для распознавания по имени
// ИЛИ: = alc.LoadFromAssemblyPath(...); // для загрузки по пути
```

Ниже показан более гибкий и явный способ получения контекста ALC:

```
var myAssem = typeof(SomeTypeInMyAssembly).Assembly;
var alc = AssemblyLoadContext.GetLoadContext(myAssem);
...
```

Иногда вывести “текущий” контекст ALC невозможно. Например, предположим, что вы отвечали за реализацию двоичного сериализатора .NET (сериализация описана в дополнительных материалах, доступных для загрузки на веб-сайте издательства). Сериализатор подобного рода записывает полные имена сериализуемых типов (включая имена их сборок), которые должны быть распознаны во время десериализации. Вопрос в том, какой контекст ALC нужно задействовать? Проблема с использованием контекста выполняющейся сборки связана с тем, что он возвратит объект сборки, где содержится десериализатор, а не сборки, которая *вызывает* десериализатор.

Лучшее решение — не угадывать, а запрашивать:

```
public object Deserialize(Stream stream, AssemblyLoadContext alc)
{
    ...
}
```

Явный подход максимизирует гибкость и минимизирует шансы допустить ошибку. Теперь вызывающий код может решить, что должно считаться “текущим” контекстом ALC:

```
var assem = typeof(SomeTypeThatWillBeDeserializing).Assembly;
var alc = AssemblyLoadContext.GetLoadContext(assem);
var object = Deserialize(someStream, alc);
```

Метод `Assembly.Load` и контекстные ALC

Чтобы помочь с распространенным сценарием загрузки сборки в исполняемый в текущий момент контекст ALC, т.е.:

```
var executingAssem = Assembly.GetExecutingAssembly();
var alc = AssemblyLoadContext.GetLoadContext(executingAssem);
Assembly assem = alc.LoadFromAssemblyName(...);
```

в классе `Assembly` определен следующий метод:

```
public static Assembly Load(string assemblyString);
```

а также функционально идентичная версия, принимающая объект `AssemblyName`:

```
public static Assembly Load (AssemblyName assemblyRef);
```

(Не путайте эти методы с унаследованным методом `Load(byte[])`, который ведет себя совершенно иначе; см. раздел “Унаследованные методы загрузки” далее в главе.)

Как и с методом `LoadFromAssemblyName`, у вас есть возможность указать простое, частичное или полное имя сборки:

```
Assembly a = Assembly.Load ("System.Private.Xml");
```

Приведенный выше код загружает сборку `System.Private.Xml` в тот контекст ALC, куда была загружена *сборка исполняемого кода*.

В данном случае было указано простое имя. Следующие строки также допустимы и приводят к одному и тому же результату в .NET:

```
"System.Private.Xml, PublicKeyToken=cc7b13ffcd2ddd51"  
"System.Private.Xml, Version=4.0.1.0"  
"System.Private.Xml, Version=4.0.1.0, PublicKeyToken=cc7b13ffcd2ddd51"
```

Если вы решите указать маркер открытого ключа, тогда он должен совпадать с тем, что был загружен.



Разработчики в сети MSDN предостерегают от загрузки сборки с частичным именем, рекомендуя указывать точную версию и маркер открытого ключа. Их обоснование основано на факторах, относящихся к .NET Framework, таких как влияние глобального кеша сборок и безопасности доступа кода (Code Access Security). В .NET 5+ и .NET Core упомянутые факторы отсутствуют, поэтому загружать сборку с простым или частичным именем в целом безопасно.

Оба метода предназначены исключительно для *распознавания*, так что указывать путь к файлу нельзя. (Если вы заполните свойство `CodeBase` в объекте `AssemblyName`, то он будет проигнорирован.)



Избегайте попасть в ловушку с применением метода `Assembly.Load` для загрузки статически ссылаемой сборки. Все, что вам понадобится сделать в данном случае — сослаться на тип в сборке и получить сборку из него:

```
Assembly a = typeof (System.Xml.Formatting).Assembly;
```

Или можете поступить даже следующим образом:

```
Assembly a = System.Xml.Formatting.Indented.GetType().Assembly;
```

Это предотвращает жесткое кодирование имени сборки (которое в будущем может измениться) наряду с обеспечением запуска распознавания сборки в контексте ALC *исполняемого кода* (как произошло бы с методом `Assembly.Load`).

Если бы вы писали код метода `Assembly.Load` самостоятельно, то он выглядел бы (почти) так:

```
[MethodImpl(MethodImplOptions.NoInlining)]
Assembly Load (string name)
{
    Assembly callingAssembly = Assembly.GetCallingAssembly();
    var callingAcl = AssemblyLoadContext.GetLoadContext(callingAssembly);
    return callingAcl.LoadFromAssemblyName (new AssemblyName (name));
}
```

Метод EnterContextualReflection

Стратегия использования контекста ALC вызываемой сборки, принятая в `Assembly.Load`, терпит неудачу, когда метод `Assembly.Load` вызывается через посредника, такого как десериализатор или механизм запуска модульного теста. Если посредник определен в другой сборке, тогда вместо контекста загрузки вызываемой сборки применяется контекст загрузки сборки посредника.



Такой сценарий был описан ранее, когда речь шла о том, каким образом вы могли бы реализовать десериализатор. В подобных случаях идеальное решение — вынудить вызывающий код указывать контекст ALC, а не выводить его с помощью `Assembly.Load(string)`. Но поскольку версии .NET 5+ и .NET Core произошли от .NET Framework, где изоляция достигалась посредством доменов приложений, а не контекстов ALC, идеальное решение не является превалирующим, и временами `Assembly.Load(string)` нецелесообразно используется в сценариях, в которых контекст ALC не может быть надежно выведен. Примером служит двоичный сериализатор .NET.

Чтобы позволить методу `Assembly.Load` по-прежнему работать в таких сценариях, разработчики из Microsoft добавили в класс `AssemblyLoadContext` метод по имени `EnterContextualReflection`. Он присваивает контекст ALC свойству `AssemblyLoadContext.CurrentContextualReflectionContext`. Хотя это статическое свойство, его значение хранится в переменной `AsyncLocal`, так что оно способно удерживать в разных потоках отдельные значения (но все же предохраняться в течение асинхронных операций).

Если свойство `AssemblyLoadContext.CurrentContextualReflectionContext` не равно `null`, то метод `Assembly.Load` автоматически применяет его вместо обращения к контексту ALC:

```
Method1();
var myALC = new AssemblyLoadContext ("test");
using (myALC.EnterContextualReflection())
{
    Console.WriteLine (
        AssemblyLoadContext.CurrentContextualReflectionContext.Name); // тест
    Method2();
}
// После освобождения EnterContextualReflection() больше не действует.
Method3();
void Method1 () => Assembly.Load (...);      // Будет использоваться
                                                // обращение к контексту ALC
void Method2 () => Assembly.Load (...);      // Будет использоваться myALC
void Method3 () => Assembly.Load (...);      // Будет использоваться
                                                // обращение к контексту ALC
```

Ранее мы демонстрировали, как можно было бы написать метод, функционально подобный `Assembly.Load`. Вот более точная версия, которая учитывает контекст контекстной рефлексии:

```
[MethodImpl(MethodImplOptions.NoInlining)]
Assembly Load (string name)
{
    var alc = AssemblyLoadContext.CurrentContextualReflectionContext
        ?? AssemblyLoadContext.GetLoadContext (Assembly.GetCallingAssembly ());
    return alc.LoadFromAssemblyName (new AssemblyName (name));
}
```

Хотя контекст контекстной рефлексии может быть полезен для разрешения запуска унаследованного кода, более надежное решение (как было описано ранее в главе) предусматривает изменение кода, который вызывает `Assembly.Load`, чтобы взамен он вызывал метод `LoadFromAssemblyName` на контексте ALC, переданном вызывающим кодом.



Инфраструктура .NET Framework не имеет эквивалента метода `EnterContextualReflection` и не нуждается в нем, несмотря на наличие таких же методов `Assembly.Load`. Дело в том, что изоляция в .NET Framework достигается главным образом с помощью *доменов приложений*, а не контекстов ALC. Домены приложений обеспечивают более сильную модель изоляции, в соответствии с которой каждый домен приложения имеет собственный стандартный контекст загрузки, поэтому изоляция по-прежнему может работать даже при использовании только стандартного контекста загрузки.

Загрузка и распознавание неуправляемых библиотек

Контексты ALC также способны загружать и распознавать низкоуровневые библиотеки. Низкоуровневое распознавание запускается, когда производится вызов внешнего метода, помеченного атрибутом `[DllImport]`:

```
[DllImport ("SomeNativeLibrary.dll")]
static extern int SomeNativeMethod (string text);
```

Поскольку полный путь в атрибуте `[DllImport]` не был указан, вызов метода `SomeNativeMethod` запускает распознавание в контексте ALC, содержащем сборку, в которой определен метод `SomeNativeMethod`.

В контексте ALC виртуальный метод *распознавания* называется `LoadUnmanagedDll`, а метод *загрузки* — `LoadUnmanagedDllFromPath`:

```
protected override IntPtr LoadUnmanagedDll (string unmanagedDllName)
{
    // Определить полный путь к unmanagedDllName...
    string fullPath = ...
    return LoadUnmanagedDllFromPath (fullPath); // Загрузить DLL-библиотеку
}
```

Если вы не в состоянии определить местонахождение файла, тогда можете возвратить `IntPtr.Zero`. Затем среда CLR инициирует событие `Resolving UnmanagedDll` контекста ALC.

Интересно отметить, что метод LoadUnmanagedD11FromPath является защищенным, поэтому обычно у вас не будет возможности вызвать его из обработчика событий ResolvingUnmanagedD11. Однако вы можете добиться того же результата, вызывая статический метод NativeLibrary.Load:

```
someALC.ResolvingUnmanagedD11 += (requestingAssembly, unmanagedD11Name) =>
{
    return NativeLibrary.Load ("(полный путь к неуправляемой DLL-библиотеке)");
};
```

Несмотря на то что низкоуровневые библиотеки, как правило, распознаются и загружаются контекстами ALC, они им не “принадлежат”. После загрузки низкоуровневая библиотека становится самостоятельной и возлагает на себя ответственность за распознавание любых кратковременных зависимостей, которые она может иметь. Более того, низкоуровневые библиотеки являются глобальными по отношению к процессу, так что загрузить две разных версии низкоуровневой библиотеки не удастся, если они имеют одно и то же имя файла.

Класс AssemblyDependencyResolver

В разделе “Стандартное зондирование” ранее в главе упоминалось о том, что стандартный контекст ALC читает файлы .deps.json и .runtimeconfig.json при их наличии с целью определения, где искать зависимости NuGet, специфичные к платформе и относящиеся к разработке.

Если вы хотите загрузить сборку в специальный контекст ALC, который имеет зависимости, специфичные к платформе, или зависимости NuGet, тогда вам придется как-то воспроизвести эту логику. Вы могли бы достичь цели за счет разбора конфигурационных файлов и аккуратного следования правилам для имен, специфичных к платформе. Тем не менее, поступать так не только сложно, но вдобавок написанный вами код перестанет работать, если в будущей версии .NET правила изменятся.

Задачу решает класс AssemblyDependencyResolver. Для его использования необходимо создать экземпляр с указанием пути к сборке, чьи зависимости нужно проанализировать:

```
var resolver = new AssemblyDependencyResolver (@"c:\temp\foo.dll");
```

Затем, чтобы найти путь к зависимости, понадобится вызвать метод ResolveAssemblyToPath:

```
string path = resolver.ResolveAssemblyToPath (new AssemblyName ("bar"));
```

Если файл .deps.json отсутствует (или файл .deps.json не содержит ничего, имеющего отношение к bar.dll), тогда path получит значение c:\temp\bar.dll.

Аналогичным образом можно распознавать неуправляемые зависимости, вызывая метод ResolveUnmanagedD11ToPath.

Замечательный способ проиллюстрировать более сложный сценарий предусматривает создание проекта консольного приложения по имени ClientApp и добавление ссылки NuGet на Microsoft.Data.SqlClient. Введите показанный далее код класса:

```
using Microsoft.Data.SqlClient;

namespace ClientApp
{
    public class Program
    {
        public static SqlConnection GetConnection() => new SqlConnection();
        static void Main() => GetConnection(); // Проверить, распознан ли он
    }
}
```

Теперь скомпилируйте приложение и загляните в выходную папку: вы увидите файл по имени Microsoft.Data.SqlClient.dll. Однако этот файл *никогда не загружается* при запуске, а попытка загрузить его явно приводит к генерации исключения. Фактически загружаемая сборка находится в подпапке runtimes\win (или runtimes/unix); стандартному контексту ALC известно о необходимости ее загрузки, т.к. он разбирает файл ClientApp.deps.json.

Если бы вы попытались загрузить сборку ClientApp.dll из другого приложения, то пришлось бы реализовать контекст ALC, который способен распознать ее зависимость от Microsoft.Data.SqlClient.dll. При этом было бы недостаточно просто заглянуть в папку, в которой находится ClientApp.dll (как делалось в разделе “Распознавание сборок” ранее в главе). Взамен необходимо применять класс AssemblyDependencyResolver, чтобы выяснить, где расположен файл ClientApp.dll для используемой платформы:

```
string path = @"C:\source\ClientApp\bin\Debug\netcoreapp3.0\ClientApp.dll";
var resolver = new AssemblyDependencyResolver(path);
var sqlClient = new AssemblyName("Microsoft.Data.SqlClient");
Console.WriteLine(resolver.ResolveAssemblyToPath(sqlClient));
```

На машине Windows вывод будет следующим:

```
C:\source\ClientApp\bin\Debug\netcoreapp3.0\runtimes\win\lib\netcoreapp2.1
\Microsoft.Data.SqlClient.dll
```

Полный пример будет представлен в разделе “Реализация системы подключаемых модулей” далее в главе.

Выгрузка контекстов ALC

В простых случаях нестандартный контекст AssemblyLoadContext можно выгрузить, освободив память и сняв файловые блокировки с загруженных сборок. Чтобы это работало, контекст ALC должен быть создан с параметром isCollectible, установленным в true:

```
var alc = new AssemblyLoadContext("test", isCollectible:true);
```

Для инициирования процесса выгрузки необходимо вызвать метод Unload на контексте ALC.

Модель выгрузки является кооперативной, а не вытесняющей. В случае выполнения любых методов в любых сборках контекста ALC выгрузка откладывается до тех пор, пока методы не завершатся.

Фактическая выгрузка происходит во время сборки мусора; она не начнется, если что-либо извне контекста ALC имеет любую (*не слабую*) ссылку на что-то внутри контекста ALC (включая объекты, типы и сборки). Нередко API-интерфейсы (в том числе из .NET BCL) кешируют объекты в статических полях или словарях — либо подписываются на события — и это легко приводит к созданию ссылок, которые будут препятствовать выгрузке, особенно когда код в контексте ALC использует внешние API-интерфейсы нетривиальным образом. Выяснить причину неудавшейся выгрузки сложно и придется применять инструменты вроде WinDbg.

Унаследованные методы загрузки

Если вы по-прежнему используете .NET Framework (или разрабатываете библиотеку, нацеленную на .NET Standard, и хотите поддерживать .NET Framework), то не сможете применять класс `AssemblyLoadContext`. В такой ситуации загрузка выполняется с использованием следующих методов:

```
public static Assembly LoadFrom (string assemblyFile);  
public static Assembly LoadFile (string path);  
public static Assembly Load (byte[] rawAssembly);
```

Методы `LoadFile` и `Load(byte[])` обеспечивают изоляцию, тогда как `LoadFrom` — нет. Распознавание достигается обработкой события `AssemblyResolve` домена приложения, которое похоже на событие `Resolving` стандартного контекста ALC.

Доступен также метод `Assembly.Load(string)`, предназначенный для запуска распознавания, который работает аналогичным образом.

Метод `LoadFrom`

Метод `LoadFrom` загружает сборку по заданному пути в стандартный контекст ALC. Он немного похож на метод `AssemblyLoadContext.Default.LoadFromAssemblyPath` за исключением перечисленных ниже аспектов.

- Если сборка с таким же простым именем уже присутствует в стандартном контексте ALC, тогда метод `LoadFrom` возвращает объект сборки, а не генерирует исключение.
- Если сборка с таким же простым именем *не* присутствует в стандартном контексте ALC, а загрузка произошла, тогда сборка назначается особый статус “`LoadFrom`”. Этот статус влияет на логику распознавания стандартного контекста ALC: если данная сборка имеет любые зависимости в *той же самой папке*, то такие зависимости будут распознаваться автоматически.



В .NET Framework имеется глобальный кеш сборок. Если сборка присутствует в глобальном кеше сборок, тогда среда CLR будет всегда загружать ее оттуда. Это применимо ко всем трем методам загрузки.

Способность метода `LoadFrom` автоматически распознавать кратковременные зависимости в той же самой папке может быть удобной — до тех пор, пока метод не загрузит сборку, которая загружаться не должна. Поскольку сценарий подобного рода может оказаться трудным в отладке, лучше использовать метод `Load(string)` или `LoadFile` и распознавать кратковременные зависимости, обрабатывая событие `AssemblyResolve` домена приложения. Такой подход позволяет вам решать, каким образом распознавать каждую сборку, и делает возможной отладку (создавая точку останова внутри обработчика события).

Методы `LoadFile` и `Load(byte[])`

Методы `LoadFile` и `Load(byte[])` загружают сборку по заданному пути к файлу либо из байтового массива в новый контекст ALC. В отличие от `LoadFrom` эти методы обеспечивают изоляцию и позволяют загружать несколько версий той же самой сборки. Тем не менее, есть два предостережения:

- повторный вызов метода `LoadFile` с идентичным путем возвратит ранее загруженную сборку;
- в .NET Framework оба метода сначала проверяют глобальный кеш сборок и при наличии в нем сборки загружают из него.

Применяя методы `LoadFile` и `Load(byte[])`, вы получаете отдельный контекст ALC для каждой сборки (оставляя в стороне предостережения). В итоге становится возможной изоляция, хотя может усложниться управление.

Для распознавания зависимостей вы обрабатываете событие `Resolving` домена приложения, которое инициируется на всех контекстах ALC:

```
AppDomain.CurrentDomain.AssemblyResolve += (sender, args) =>
{
    string fullAssemblyName = args.Name;
    // Возвратить объект Assembly или null
    ...
};
```

Переменная `args` также включает свойство по имени `RequestingAssembly`, которое сообщает, какая сборка запустила распознавание.

После определения местоположения сборки можно вызвать метод `Assembly.LoadFile` для ее загрузки.



С помощью метода `AppDomain.CurrentDomain.GetAssemblies` можно организовать перечисление всех сборок, которые были загружены в текущий домен приложения. Прием работает и в .NET 5+, где он эквивалентен следующему коду:

```
AssemblyLoadContext.All.SelectMany (a => a.Assemblies)
```

Реализация системы подключаемых модулей

В целях полной демонстрации концепций, раскрытых в этом разделе, мы реализуем систему подключаемых модулей, которая использует выгружаемые контексты ALC для изоляции каждого подключаемого модуля.

Изначально система будет включать в себя три проекта .NET:

- **Plugin.Common** (библиотека). Определяет интерфейс, который будут реализовывать подключаемые модули.
- **Capitalizer** (библиотека). Подключаемый модуль, преобразующий строчные буквы в заглавные.
- **Plugin.Host** (консольное приложение). Определяет местоположение и активизирует подключаемые модули.

Давайте предположим, что проекты располагаются в перечисленных ниже каталогах:

```
c:\source\PluginDemo\Plugin.Common  
c:\source\PluginDemo\Capitalizer  
c:\source\PluginDemo\Plugin.Host
```

Все проекты будут ссылаться на библиотеку **Plugin.Common**, а другие ссылки между проектами отсутствуют.



Если бы проект **Plugin.Host** ссылался на **Capitalizer**, то не имело бы смысла реализовывать систему подключаемых модулей; основная идея в том, что подключаемые модули пишутся сторонними разработчиками после опубликования **Plugin.Host** и **Plugin.Common**.

В случае использования Visual Studio все три проекта удобно объединить в одно решение. Для этого щелкните правой кнопкой мыши на проекте **Plugin.Host**, выберите в контекстном меню пункт **Build Dependencies**⇒**Project Dependencies** (Зависимости построения⇒Зависимости проекта) и отметьте проект **Capitalizer**, что обеспечит компиляцию проекта **Capitalizer** при запуске проекта **Plugin.Host** без добавления ссылки.

Проект **Plugin.Common**

Мы начнем с проекта **Plugin.Common**. Наши подключаемые модули будут решать очень простую задачу, связанную с трансформацией строки. Вот как будет определен интерфейс:

```
namespace Plugin.Common  
{  
    public interface ITextPlugin  
    {  
        string TransformText (string input);  
    }  
}
```

Это все, что касается **Plugin.Common**.

Проект **Capitalizer** (подключаемый модуль)

Подключаемый модуль **Capitalizer** будет ссылаться на **Plugin.Common** и содержать единственный класс. Пока что мы оставим логику простой, чтобы у подключаемого модуля не было излишних зависимостей:

```
public class CapitalizerPlugin : Plugin.Common.ITextPlugin
{
    public string TransformText (string input) => input.ToUpper();
}
```

Если вы скомпилируете оба проекта и заглянете в выходную папку Capitalizer, то увидите следующие две сборки:

Capitalizer.dll	// Сборка подключаемого модуля
Plugin.Common.dll	// Ссылаемая сборка

Проект Plugin.Host

Проект Plugin.Host представляет собой консольное приложение с двумя классами. Первый класс — это специальный контекст ALC для загрузки подключаемого модуля:

```
class PluginLoadContext : AssemblyLoadContext
{
    AssemblyDependencyResolver _resolver;

    public PluginLoadContext (string pluginPath, bool collectible)
        // Назначить контексту дружественное имя для содействия в отладке
        : base (name: Path.GetFileName (pluginPath), collectible)
    {
        // Создать распознаватель, который поможет находить зависимости
        _resolver = new AssemblyDependencyResolver (pluginPath);
    }

    protected override Assembly Load (AssemblyName assemblyName)
    {
        // См. ниже:
        if (assemblyName.Name == typeof (ITextPlugin).Assembly.GetName ().Name)
            return null;

        string target = _resolver.ResolveAssemblyToPath (assemblyName);
        if (target != null)
            return LoadFromAssemblyPath (target);

        // Может быть сборкой BCL. Позволить стандартному
        // контексту выполнить распознавание
        return null;
    }

    protected override IntPtr LoadUnmanagedDll (string unmanagedDllName)
    {
        string path = _resolver.ResolveUnmanagedDllToPath (unmanagedDllName);
        return path == null
            ? IntPtr.Zero
            : LoadUnmanagedDllFromPath (path);
    }
}
```

Конструктору передается путь к главной сборке подключаемых модулей и флаг, который указывает, должен ли контекст ALC подвергаться сборке мусора (чтобы его можно было выгружать).

Распознавание зависимостей обрабатывается в методе Load. Все подключаемые модули обязаны ссылаться на Plugin.Common, поэтому они в состоянии реализовывать ITextPlugin. Таким образом, метод Load в какой-то момент будет запущен, чтобы распознать Plugin.Common. Нам нужно проявить осторожность, поскольку выходная папка подключаемого модуля, скорее всего, содержит не только Capitalizer.dll, но и собственную копию Plugin.Common.dll. Если бы мы загрузили такую копию Plugin.Common.dll в PluginLoadContext, то получили бы в итоге две копии сборки: одну в стандартном контексте хоста и еще одну в контексте PluginLoadContext подключаемого модуля. Эти сборки не будут совместимыми, а хост сообщит о том, что подключаемый модуль не реализует ITextPlugin!

Чтобы решить проблему, мы явно проверяем данное условие:

```
if (assemblyName.Name == typeof (ITextPlugin).Assembly.GetName () .Name)
    return null;
```

Возвращение null дает возможность распознать сборку стандартному контексту ALC хоста.



Вместо возвращения null мы могли бы возвращать typeof (ITextPlugin).Assembly, что также обеспечило бы корректную работу. Как мы можем быть уверены в том, что реализация ITextPlugin будет распознана контектом ALC хоста, а не контектом PluginLoadContext? Вспомните, что наш класс PluginLoadContext определен в сборке Plugin.Host. Следовательно, любые типы, на которые вы статически ссылаетесь из этого класса, будут запускать распознавание сборки в контексте ALC, куда была загружена его сборка Plugin.Host.

После проверки общей сборки мы применяем класс AssemblyDependencyResolver для нахождения любых закрытых зависимостей, которые может иметь подключаемый модуль. (В данный момент их нет.)

Обратите внимание, что мы также переопределяем метод LoadUnmanagedDll, гарантируя тем самым, что если подключаемый модуль имеет неуправляемые зависимости, то они тоже корректно загружаются.

Второй класс в Plugin.Host является главной программой. Ради простоты давайте жестко закодируем путь к подключаемому модулю Capitalizer (в реальном проекте можно было бы обнаруживать пути подключаемых модулей, выполняя поиск файлов DLL в известных местоположениях или читая конфигурационный файл):

```
class Program
{
    const bool UseCollectibleContexts = true;
    static void Main()
    {
        const string capitalizer = @"C:\source\PluginDemo\
            + @"Capitalizer\bin\Debug\netcoreapp3.0\Capitalizer.dll";
        Console.WriteLine (TransformText ("big apple", capitalizer));
    }
}
```

```

static string TransformText (string text, string pluginPath)
{
    var alc = new PluginLoadContext (pluginPath, UseCollectibleContexts);
    try
    {
        Assembly assem = alc.LoadFromAssemblyPath (pluginPath);
        // Найти в сборке тип, который реализует ITextPlugin:
        Type pluginType = assem.ExportedTypes.Single (t =>
            typeof (ITextPlugin).IsAssignableFrom (t));
        // Создать экземпляр реализации ITextPlugin:
        var plugin = (ITextPlugin)Activator.CreateInstance (pluginType);
        // Вызвать метод TransformText:
        return plugin.TransformText (text);
    }
    finally
    {
        if (UseCollectibleContexts) alc.Unload(); // Выгрузить контекст ALC
    }
}
}

```

Давайте рассмотрим метод `TransformText`. Сначала мы создаем новый контекст ALC для нашего подключаемого модуля и затем запрашиваем у него загрузку главной сборки подключаемых модулей. Далее мы используем рефлексию для нахождения типа, который реализует интерфейс `ITextPlugin` (рефлексия подробно обсуждается в главе 18). Наконец, мы создаем экземпляр подключаемого модуля, вызываем метод `TransformText` и выгружаем контекст ALC.



Если необходимо многократно вызывать метод `TransformText`, тогда лучше кешировать контекст ALC, чем выгружать его после каждого вызова.

Ниже показан вывод:

BIG APPLE

Добавление зависимостей

Наш код полностью способен распознавать и изолировать зависимости. В целях иллюстрации давайте добавим ссылку NuGet на пакет `Humanizer.Core` версии 2.6.2. Вы можете сделать это с помощью пользовательского интерфейса Visual Studio или добавления в файл `Capitalizer.csproj` следующего элемента:

```

<ItemGroup>
    <PackageReference Include="Humanizer.Core" Version="2.6.2" />
</ItemGroup>

```

А теперь модифицируем `CapitalizerPlugin`:

```

using Humanizer;
namespace Capitalizer
{

```

```
public class CapitalizerPlugin : Plugin.Common.ITextPlugin
{
    public string TransformText (string input) => input.Pascalize();
}
```

В результате повторного запуска программы получается такой вывод:

```
BigApple
```

Далее мы реализуем еще один подключаемый модуль по имени Pluralizer. Создадим новый проект библиотеки .NET и добавим ссылку NuGet на пакет Humanizer.Core версии 2.7.9:

```
<ItemGroup>
    <PackageReference Include="Humanizer.Core" Version="2.7.9" />
</ItemGroup>
```

Добавим класс по имени PluralizerPlugin. Он аналогичен классу CapitalizerPlugIn, но только в нем вызывается метод Pluralize:

```
using Humanizer;
namespace Pluralizer
{
    public class PluralizerPlugin : Plugin.Common.ITextPlugin
    {
        public string TransformText (string input) => input.Pluralize();
    }
}
```

В заключение необходимо добавить в метод Main внутри Plugin.Host код для загрузки и запуска подключаемого модуля Pluralizer:

```
static void Main()
{
    const string capitalizer = @"C:\source\PluginDemo\
        + @"Capitalizer\bin\Debug\netcoreapp3.0\Capitalizer.dll";
    Console.WriteLine (TransformText ("big apple", capitalizer));
    const string pluralizer = @"C:\source\PluginDemo\
        + @"Pluralizer\bin\Debug\netcoreapp3.0\Pluralizer.dll";
    Console.WriteLine (TransformText ("big apple", pluralizer));
}
```

Вот как теперь выглядит вывод:

```
BigApple
big apples
```

Чтобы более ясно видеть, что происходит, изменим значение константы UseCollectibleContexts на false и добавим в метод Main приведенный ниже код для организации перечисления контекстов ALC и их сборок:

```
foreach (var context in AssemblyLoadContext.All)
{
    Console.WriteLine ($"Context: {context.GetType().Name} {context.Name}");
    foreach (var assembly in context.Assemblies)
        Console.WriteLine ("Assembly: {assembly.FullName}");
```

В выводе легко заметить две разных версии Humanizer, каждая из которых загружена в собственный контекст ALC:

```
Context: PluginLoadContext Capitalizer.dll
Assembly: Capitalizer, Version=1.0.0.0, Culture=neutral, PublicKeyToken=...
Assembly: Humanizer, Version=2.6.0.0, Culture=neutral, PublicKeyToken=...
Context: PluginLoadContext Pluralizer.dll
Assembly: Pluralizer, Version=1.0.0.0, Culture=neutral, PublicKeyToken=...
Assembly: Humanizer, Version=2.7.0.0, Culture=neutral, PublicKeyToken=...
Context: DefaultAssemblyLoadContext Default
Assembly: System.Private.CoreLib, Version=4.0.0.0, Culture=neutral, ...
Assembly: Host, Version=1.0.0.0, Culture=neutral, PublicKeyToken=null
...
...
```



Даже если бы оба подключаемых модуля использовали одну и ту же версию Humanizer, изоляция отдельных сборок все равно оказывается полезной, поскольку каждая сборка будет иметь собственные статические переменные.



Рефлексия и метаданные

Как было показано в главе 17, программа на языке C# компилируется в сборку, содержащую метаданные, скомпилированный код и ресурсы. Процесс инспектирования метаданных и скомпилированного кода во время выполнения называется *рефлексией*.

Скомпилированный код в сборке включает почти все содержимое первоначального исходного кода. Некоторая информация утрачивается, например, имена локальных переменных, комментарии и директивы препроцессора. Тем не менее, рефлексия позволяет получить доступ практически ко всему остальному, даже делая возможным написание декомпилятора.

Многие службы, доступные в .NET и открытые через язык C# (такие как динамическое связывание, сериализация и привязка данных), полагаются на присутствие метаданных. Ваши программы тоже могут использовать метаданные в своих интересах и даже расширять их новой информацией, применяя специальные атрибуты. В пространстве имен System.Reflection находится API-интерфейс рефлексии. Кроме того, с помощью классов из пространства имен System.Reflection.Emit во время выполнения можно динамически создавать новые метаданные и исполняемые инструкции на промежуточном языке (IL).

В примерах настоящей главы предполагается, что вы импортировали пространства имен System и System.Reflection, а также System.Reflection.Emit.



Когда мы используем в главе термин “динамическое”, то имеем в виду применение рефлексии с целью решения задачи, для которой безопасность типов обеспечивается только во время выполнения. По принципу это похоже на *динамическое связывание* посредством ключевого слова `dynamic` в C#, хотя механизм и функциональность здесь другие.

Динамическое связывание намного проще в использовании и существует среди DLR для взаимодействия с динамическими языками. Рефлексия относительно неудобна в применении, но обладает большей гибкостью в плане того, что можно делать с помощью среды CLR. Например, рефлексия позволяет получать списки типов и членов, создавать объекты, имена которых указываются в виде строк, и строить сборки на лету.

Рефлексия и активизация типов

В этом разделе мы рассмотрим, как получать экземпляр класса Type, инспектировать его метаданные и использовать для динамического создания объекта.

Получение экземпляра Type

Экземпляр класса System.Type представляет метаданные для типа. Поскольку класс Type применяется очень широко, он находится в пространстве имен System, а не в System.Reflection.

Получить экземпляр System.Type можно путем вызова метода GetType на любом объекте или с помощью операции typeof языка C#:

```
Type t1 = DateTime.Now.GetType();           // Экземпляр Type, полученный
                                              // во время выполнения
Type t2 = typeof (DateTime);                 // Экземпляр Type, полученный
                                              // на этапе компиляции
```

Операцию typeof можно использовать для получения типов массивов и обобщенных типов:

```
Type t3 = typeof (DateTime[]);              // Тип одномерного массива
Type t4 = typeof (DateTime[,]);             // Тип двухмерного массива
Type t5 = typeof (Dictionary<int,int>); // Закрытый обобщенный тип
Type t6 = typeof (Dictionary<,>);        // Несвязанный обобщенный тип
```

Экземпляр Type можно также извлекать по имени. При наличии ссылки на его сборку (Assembly) необходимо вызвать метод Assembly.GetType (как будет описано более подробно в разделе “Рефлексия сборок” далее в главе):

```
Type t = Assembly.GetExecutingAssembly().GetType ("Demos.TestProgram");
```

Если объект Assembly отсутствует, то тип можно получить через его имя с указанием сборки (полное имя типа, за которым следует полностью или частично заданное имя сборки). Сборка неявно загружается, как если бы вызывался метод Assembly.Load(string):

```
Type t = Type.GetType ("System.Int32, System.Private.CoreLib");
```

Имея объект System.Type, его свойства можно применять для доступа к имени типа, сборке, базовому типу, уровню видимости и т.д.:

```
Type stringType = typeof (string);
string name      = stringType.Name;      // String
Type baseType    = stringType.BaseType;   // typeof(Object)
Assembly assem  = stringType.Assembly;   // System.Private.CoreLib
bool isPublic    = stringType.IsPublic;   // true
```

Экземпляр `System.Type` — своего рода окно в мир метаданных для этого типа, а также для сборки, в которой он определен.



Класс `System.Type` является абстрактным, так что операция `typeof` должна в действительности давать подкласс класса `Type`. Среда CLR использует внутренний подкласс .NET по имени `RuntimeType`.

Класс `TypeInfo`

Если вы планируете нацеливаться на .NET Core 1.x (или более старый профиль Windows Store), то обнаружите, что большинство членов `Type` отсутствует. Взамен доступ к отсутствующим членам открывается через класс по имени `TypeInfo`, экземпляр которого получается вызовом `GetTypeInfo`. Таким образом, чтобы заставить код предыдущего примера выполняться, вот как нужно поступить:

```
Type stringType = typeof(string);
string name = stringType.Name;
Type baseType = stringType.GetTypeInfo().BaseType;
Assembly assem = stringType.GetTypeInfo().Assembly;
bool isPublic = stringType.GetTypeInfo().IsPublic;
```

Класс `TypeInfo` существует в .NET Core 2 и 3, а также в .NET 5+ (и в .NET Framework 4.5+ и всех версиях .NET Standard), поэтому предыдущий код работает почти везде. Класс `TypeInfo` также включает дополнительные свойства и методы для выполнения рефлексии членов.

Получение типов массивов

Как только что было указано, операция `typeof` и метод `GetType` имеют дело с типами массивов. Получить тип массива можно также за счет вызова метода `MakeArrayType` на типе элементов массива:

```
Type simpleArrayType = typeof(int).MakeArrayType();
Console.WriteLine(simpleArrayType == typeof(int[])); // True
```

Передавая методу `MakeArrayType` целочисленный аргумент, можно создавать многомерные массивы:

```
Type cubeType = typeof(int).MakeArrayType(3); // В форме куба
Console.WriteLine(cubeType == typeof(int[, ,])); // True
```

Метод `GetElementType` делает обратное, т.е. извлекает тип элементов массива:

```
Type e = typeof(int[]).GetElementType(); // e == typeof(int)
```

Метод `GetArrayRank` возвращает количество измерений в многомерном массиве:

```
int rank = typeof(int[, ,]).GetArrayRank(); // 3
```

Получение вложенных типов

Чтобы извлечь вложенные типы, нужно вызывать метод `GetNestedTypes` на содержащем их типе:

```
foreach (Type t in typeof (System.Environment).GetNestedTypes())
    Console.WriteLine (t.FullName);
```

Вот вывод:

```
System.Environment+SpecialFolder
```

Или можно поступить так:

```
foreach (TypeInfo t in typeof (System.Environment).GetTypeInfo()
        .DeclaredNestedTypes)
    Debug.WriteLine (t.FullName);
```

Сложенными типами связано одно предупреждение: среда CLR трактует **вложенный тип как имеющий специальные "вложенные" уровни доступности**:

```
Type t = typeof (System.Environment.SpecialFolder);
Console.WriteLine (t.IsPublic);           // False
Console.WriteLine (t.IsNestedPublic);     // True
```

Имена типов

Тип имеет свойства **Namespace**, **Name** и **FullName**. В большинстве случаев **FullName** является объединением первых двух свойств:

```
Type t = typeof (System.Text.StringBuilder);
Console.WriteLine (t.Namespace);          // System.Text
Console.WriteLine (t.Name);              // StringBuilder
Console.WriteLine (t.FullName);          // System.Text.StringBuilder
```

Из указанного правила существуют два исключения: **вложенные типы** и **закрытые обобщенные типы**.



Класс **Type** также имеет свойство по имени **AssemblyQualifiedName**, возвращающее значение свойства **FullName**, за которым следует запятая и полное имя сборки. Это та самая строка, которую можно передавать методу **Type.GetType**, и она уникальным образом идентифицирует тип внутри стандартного контекста загрузки.

Имена вложенных типов

В случае вложенных типов содержащий тип присутствует только в **FullName**:

```
Type t = typeof (System.Environment.SpecialFolder);
Console.WriteLine (t.Namespace);          // System
Console.WriteLine (t.Name);              // SpecialFolder
Console.WriteLine (t.FullName);          // System.Environment+SpecialFolder
```

Символ **+** отделяет содержащий тип от вложенного пространства имен.

Имена обобщенных типов

Имена обобщенных типов снабжаются суффиксами в виде символа '**,**' за которым следует количество параметров типа. Если обобщенный тип является несвязанным, то такое правило применяется и к **Name**, и к **FullName**:

```
Type t = typeof (Dictionary<,>); // Unbound (несвязанный)
Console.WriteLine (t.Name);           // Dictionary'2
Console.WriteLine (t.FullName);        // System.Collections.Generic.Dictionary'2
```

Однако если обобщенный тип является закрытым, то свойство FullName (единственное) приобретает важное дополнение: список всех параметров типа, для каждого из которых указывается полное имя, включающее сборку:

```
Console.WriteLine (typeof (Dictionary<int,string>).FullName);
```

Вывод выглядит так:

```
System.Collections.Generic.Dictionary`2[[System.Int32,
System.Private.CoreLib, Version=4.0.0.0, Culture=neutral,
PublicKeyToken=7cec85d7bea7798e],[System.String, System.Private.CoreLib,
Version=4.0.0.0, Culture=neutral, PublicKeyToken=7cec85d7bea7798e]]
```

В итоге гарантируется, что свойство AssemblyQualifiedName (комбинация полного имени типа и имени сборки) содержит достаточный объем информации для исчерпывающей идентификации как обобщенного типа, так и его параметров типа.

Имена типов массивов и указателей

Массивы представляются с тем же суффиксом, который используется в выражении typeof:

```
Console.WriteLine (typeof ( int[] ).Name);           // Int32[]
Console.WriteLine (typeof ( int[,] ).Name);           // Int32[,]
Console.WriteLine (typeof ( int[,] ).FullName);        // System.Int32[,]
```

Типы указателей похожи:

```
Console.WriteLine (typeof (byte*).Name);             // Byte*
```

Имена типов параметров `ref` и `out`

Экземпляр Type, описывающий параметр ref или out, имеет суффикс &:

```
public void RefMethod (ref int p)
{
    Type t = MethodInfo.GetCurrentMethod().GetParameters()[0].ParameterType;
    Console.WriteLine (t.Name);                         // Int32&
}
```

Более подробно об этом речь пойдет в разделе “Рефлексия и вызов членов” далее в главе.

Базовые типы и интерфейсы

Класс Type открывает доступ к свойству BaseType:

```
Type base1 = typeof (System.String).BaseType;
Type base2 = typeof (System.IO.FileStream).BaseType;
Console.WriteLine (base1.Name);                      // Object
Console.WriteLine (base2.Name);                      // Stream
```

Метод GetInterfaces возвращает интерфейсы, которые тип реализует:

```
foreach (Type iType in typeof (Guid).GetInterfaces())
    Console.WriteLine (iType.Name);
```

Вот вывод:

```
IFormattable
IComparable
IComparable'1
IEquatable'1
```

(Метод GetInterfaceMap возвращает структуру, которая показывает, каким образом каждый член интерфейса реализован в классе или структуре — использование этого расширенного функционального средства иллюстрируется в разделе “Вызов статических виртуальных/абстрактных членов интерфейсов” далее в главе.)

Рефлексия предоставляет три динамических эквивалента статической операции `is` языка C#.

- `IsInstanceOfType`. Принимает тип и экземпляр.
- `IsAssignableFrom` и (начиная с .NET 5) `IsAssignableTo`. Принимают два типа.

Ниже приведен пример применения первого метода:

```
object obj      = Guid.NewGuid();
Type target    = typeof (IFormattable);
bool isTrue    = obj is IFormattable;           // Статическая операция C#
bool alsoTrue = target.IsInstanceOfType (obj); // Динамический эквивалент
```

Метод `IsAssignableFrom` более универсален:

```
Type target = typeof (IComparable), source = typeof (string);
Console.WriteLine (target.IsAssignableFrom (source)); // True
```

Метод `IsSubclassOf` работает по тому же самому принципу, что и `IsAssignableFrom`, но исключает интерфейсы.

Создание экземпляров типов

Динамически создать объект из его типа можно двумя способами:

- вызвать статический метод `Activator.CreateInstance`;
- вызвать метод `Invoke` на объекте `ConstructorInfo`, который получен в результате вызова метода `GetConstructor` на экземпляре `Type` (расширенные сценарии).

Метод `Activator.CreateInstance` принимает экземпляр `Type` и дополнительные аргументы, передаваемые конструктору:

```
int i = (int) Activator.CreateInstance (typeof (int));
DateTime dt = (DateTime) Activator.CreateInstance (typeof (DateTime),
                                                 2000, 1, 1);
```

Метод `CreateInstance` позволяет указывать многие другие данные, такие как сборка, из которой загружается тип, и необходимость привязки к неоткрытым конструкторам. Если исполняющей среде не удается найти подходящий конструктор, то генерируется исключение `MissingMethodException`.

Вызов метода `Invoke` класса `MethodInfo` нужен, когда значения аргументов не позволяют устранить неоднозначность между перегруженными конструкторами. Например, пусть класс `X` имеет два конструктора: один принимает параметр типа `string`, а другой — параметр типа `StringBuilder`. В случае передачи аргумента `null` методу `Activator.CreateInstance` выбор целевого конструктора будет неоднозначным. В такой ситуации взамен должен использоваться класс `ConstructorInfo`:

```
// Извлечь конструктор, который принимает единственный параметр типа string:  
ConstructorInfo ci = typeof (X).GetConstructor (new[] { typeof (string) });  
  
// Сконструировать объект с применением перегруженной версии,  
// передавая значение null:  
object foo = ci.Invoke (new object[] { null });
```

Или при нацеливании на .NET Core 1, более старый профиль Windows Store:

```
ConstructorInfo ci = typeof (X).GetTypeInfo ().DeclaredConstructors  
.FirstOrDefault (c =>  
    c.GetParameters ().Length == 1 &&  
    c.GetParameters () [0].ParameterType == typeof (string));
```

Чтобы получить неоткрытый конструктор, потребуется указать соответствующее значение перечисления `BindingFlags` — данный вопрос обсуждается в разделе “Доступ к неоткрытым членам” далее в главе.



Динамическое создание экземпляров добавляет несколько микросекунд ко времени, которое занимает конструирование объекта. В относительном выражении это довольно много, потому что CLR обычно создает объекты очень быстро (выполнение простой операции `new` на небольшом классе требует нескольких десятков наносекунд).

Чтобы динамически создать объект массива на основе только типа его элементов, сначала понадобится вызвать метод `MakeArrayType`. Можно также создавать экземпляры обобщенных типов, как будет показано в следующем разделе.

Для динамического создания объекта делегата необходимо вызвать метод `Delegate.CreateDelegate`. Ниже приведен пример, демонстрирующий создание делегата экземпляра и статического делегата:

```
class Program  
{  
    delegate int IntFunc (int x);  
  
    static int Square (int x) => x * x;           // Статический метод  
    int Cube (int x) => x * x * x;             // Метод экземпляра  
  
    static void Main()  
    {  
        Delegate staticD = Delegate.CreateDelegate  
            (typeof (IntFunc), typeof (Program), "Square");
```

```

        Delegate instanceD = Delegate.CreateDelegate
            (typeof (IntFunc), new Program(), "Cube");
        Console.WriteLine (staticD.DynamicInvoke (3));           // 9
        Console.WriteLine (instanceD.DynamicInvoke (3));         // 27
    }
}

```

Запустить возвращенный объект `Delegate` можно за счет вызова метода `DynamicInvoke`, как делалось в показанном примере, либо путем приведения к типизированному делегату:

```

IntFunc f = (IntFunc) staticD;
Console.WriteLine (f(3)); // 9 (но выполняется намного быстрее!)

```

Вместо имени метода в `CreateDelegate` можно передать объект `MethodInfo`. В разделе “Рефлексия и вызов членов” далее в главе мы опишем класс `MethodInfo` вместе с обоснованием приведения динамически созданного делегата обратно к типу статического делегата.

Обобщенные типы

Класс `Type` способен представлять закрытый или несвязанный обобщенный тип. Как и на этапе компиляции, экземпляр закрытого обобщенного типа может быть создан, а экземпляр несвязанного обобщенного типа — нет:

```

Type closed = typeof (List<int>);
List<int> list = (List<int>) Activator.CreateInstance (closed); // Допускается

Type unbound = typeof (List<>);
object anError = Activator.CreateInstance (unbound);           // Ошибка времени
                                                               // выполнения

```

Метод `MakeGenericType` преобразует несвязанный обобщенный тип в закрытый. Необходимо просто передать желаемые аргументы типа:

```

Type unbound = typeof (List<>);
Type closed = unbound.MakeGenericType (typeof (int));

```

Метод `GetGenericTypeDefinition` делает противоположное:

```
Type unbound2 = closed.GetGenericTypeDefinition(); // unbound == unbound2
```

Свойство `IsGenericType` возвращает `true`, если экземпляр `Type` является обобщенным, а свойство `IsGenericTypeDefinition` возвращает `true`, если обобщенный тип несвязанный. Приведенный далее код проверяет, является ли указанный тип типом значения, допускающим `null`:

```

Type nullable = typeof (bool?);
Console.WriteLine (
    nullable.IsGenericType &&
    nullable.GetGenericTypeDefinition() == typeof (Nullable<>)); // True

```

Метод `GetGenericArguments` возвращает аргументы типа для закрытых обобщенных типов:

```

Console.WriteLine (closed.GetGenericArguments () [0]); // System.Int32
Console.WriteLine (nullable.GetGenericArguments () [0]); // System.Boolean

```

Для несвязанных обобщенных типов метод `GetGenericArguments` возвращает псевдотипы, которые представляют типы-заполнители, указанные в определениях обобщенных типов:

```
Console.WriteLine (unbound.GetGenericArguments () [0]); // T
```



Во время выполнения все обобщенные типы будут либо *несвязанными*, либо *закрытыми*. Они оказываются несвязанными в (относительно редком) случае такого выражения, как `typeof (Foo<>)`; иначе они закрыты. Во время выполнения нет понятия *открытого* обобщенного типа: все открытые типы закрываются компилятором. Метод `Test` в следующем классе всегда выводит `False`:

```
class Foo<T>
{
    public void Test()
        => Console.Write (GetType () .IsGenericTypeDefinition);
}
```

Рефлексия и вызов членов

Метод `GetMembers` возвращает члены типа. Взгляните на показанный ниже класс:

```
class Walnut
{
    private bool cracked;
    public void Crack () { cracked = true; }
}
```

Выполнить рефлексию его открытых членов можно следующим образом:

```
MethodInfo[] members = typeof (Walnut) .GetMembers ();
foreach (MethodInfo m in members)
    Console.WriteLine (m);
```

Вот результат:

```
Void Crack()
System.Type GetType()
System.String ToString()
Boolean Equals(System.Object)
Int32 GetHashCode()
Void.ctor()
```

Выполнение рефлексии членов с помощью `TypeInfo`

Класс `TypeInfo` открывает доступ к другому (и в чем-то более простому) протоколу для проведения рефлексии членов. Использовать данный API-интерфейс не обязательно (за исключением приложений .NET Core 1 и более старых приложений Windows Store, т.к. точный эквивалент метода `GetMembers` в них отсутствует).

Вместо открытия доступа к методам, подобным `GetMembers`, который возвращает массивы, класс `TypeInfo` предлагает *свойства*, возвращающие объекты `IEnumerable<T>`, на которых обычно запускаются запросы LINQ. Самым широко применяемым свойством является `DeclaredMembers`:

```
IEnumerable<MemberInfo> members =  
    typeof(Walnut).GetTypeInfo().DeclaredMembers;
```

В отличие от метода `GetMembers` из результата исключены унаследованные члены:

```
Void Crack()  
Void .ctor()  
Boolean cracked
```

Предусмотрены также свойства для возвращения специфических разновидностей членов (`DeclaredProperties`, `DeclaredMethods`, `DeclaredEvents` и т.д.) и методы для возвращения конкретных членов по именам (например, `GetDeclaredMethod`). Последние не могут применяться для перегруженных методов (поскольку нет никакого способа указать типы параметров). Взамен в отношении свойства `DeclaredMethods` запускается запрос LINQ:

```
MethodInfo method = typeof(int).GetTypeInfo().DeclaredMethods  
.FirstOrDefault(m => m.Name == "ToString" &&  
    m.GetParameters().Length == 0);
```

В случае вызова без аргументов метод `GetMembers` возвращает все открытые члены для типа (и его базовых типов). Метод `GetMember` извлекает отдельный член по имени, хотя и возвращает массив, т.к. члены могут быть перегруженными:

```
MemberInfo[] m = typeof(Walnut).GetMember("Crack");  
Console.WriteLine(m[0]); // Void Crack()
```

В классе `MemberInfo` также имеется свойство по имени `MemberType` типа `MemberTypes`, который представляет собой перечисление флагов со следующими значениями:

All	Custom	Field	NestedType	TypeInfo
Constructor	Event	Method	Property	

Вызываемому методу `GetMembers` можно передать экземпляр `MemberTypes`, чтобы ограничить виды возвращаемых членов. В качестве альтернативы допускается ограничивать результирующий набор, вызывая методы `GetMethods`, `GetFields`, `GetProperties`, `GetEvents`, `GetConstructors` и `GetNestedTypes`. Для каждого из перечисленных методов доступны также версии с именами в единственном числе, позволяющие получать конкретный член.



При извлечении члена типа полезно придерживаться максимально возможной конкретизации, чтобы работа кода не нарушалась, если позже будут добавлены дополнительные члены. Если осуществляется извлечение метода по имени, тогда указание типов всех параметров гарантирует, что код сохранит работоспособность и после перегрузки метода в будущем (примеры будут приведены в разделе “Параметры методов” далее в главе).

Объект `MethodInfo` имеет свойство `Name` и два свойства, возвращающие экземпляр `Type`.

- `DeclaringType`. Возвращает экземпляр `Type`, который определяет член.
- `ReflectedType`. Возвращает экземпляр `Type`, на котором был вызван метод `GetMembers`.

Эти два свойства отличаются при вызове на члене, который определен в базовом типе: `DeclaringType` возвращает базовый тип, тогда как `ReflectedType` — подтип, что отражено в следующем примере:

```
// MethodInfo — это подкласс MethodInfo; см. рис. 18.1.  
MethodInfo test = typeof (Program).GetMethod ("ToString");  
MethodInfo obj = typeof (object) .GetMethod ("ToString");  
  
Console.WriteLine (test.DeclaringType);           // System.Object  
Console.WriteLine (obj.DeclaringType);           // System.Object  
Console.WriteLine (test.ReflectedType);          // Program  
Console.WriteLine (obj.ReflectedType);           // System.Object  
Console.WriteLine (test == obj);                 // False
```

Так как объекты `test` и `obj` имеют разные значения в свойстве `ReflectedType`, они не равны. Тем не менее, отличие между ними — чистая “выдумка” API-интерфейса рефлексии; тип `Program` не имеет отдельного метода `ToString` во внутренней системе типов. Мы можем удостовериться в том, что эти два объекта `MethodInfo` ссылаются на тот же самый метод, одним из двух способов:

```
Console.WriteLine (test.MethodHandle == obj.MethodHandle);    // True  
Console.WriteLine (test.MetadataToken == obj.MetadataToken  
    && test.Module == obj.Module);                         // True
```

Свойство `MethodHandle` уникально для каждого (по-настоящему отличающегося) метода внутри процесса, а свойство `MetadataToken` уникально среди всех типов и членов в рамках модуля сборки.

В классе `MethodInfo` также определены методы для возвращения специальных атрибутов (они рассматриваются в разделе “Извлечение атрибутов во время выполнения” далее в главе).



Получить объект `MethodBase` текущего выполняющегося метода можно путем вызова статического метода `MethodBase.GetCurrentMethod`.

Типы членов

Сам класс `MethodInfo` в плане членов легковесен, потому что он является абстрактным базовым классом для типов, показанных на рис. 18.1.

Экземпляр класса `MethodInfo` можно приводить к его подтипу на основе свойства `MemberType`. Если член получен через методы `GetMethod`, `GetField`, `GetProperty`, `GetEvent`, `GetConstructor` или `GetNestedType` (либо с помощью их версий с именами во множественном числе), тогда приведение не будет обязательным.

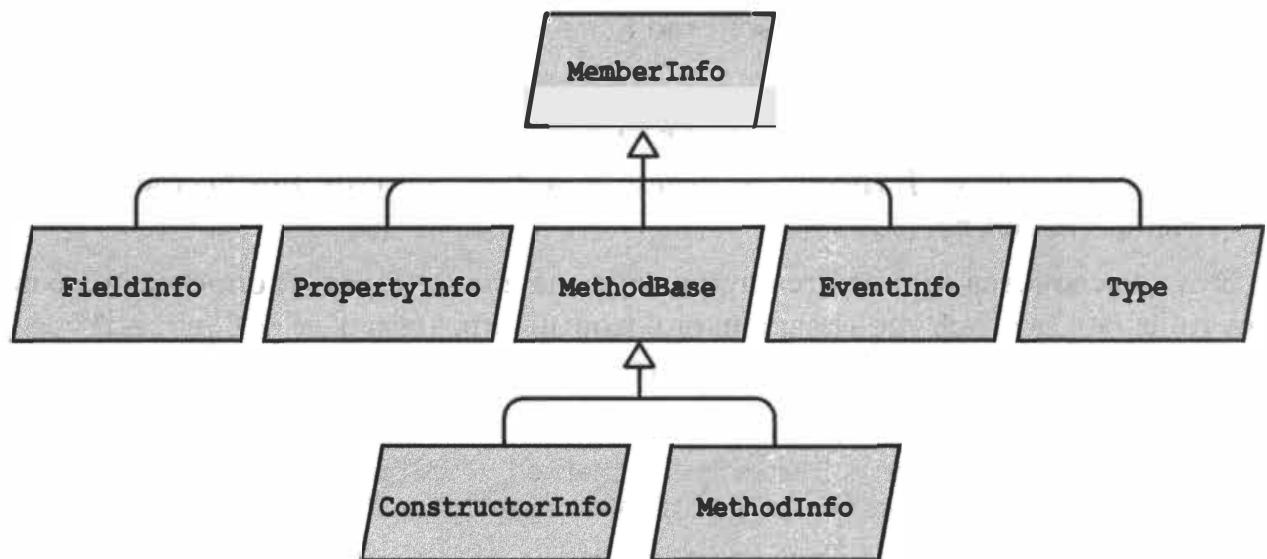


Рис. 18.1. Типы членов

В табл. 18.1 показано, какие методы должны использоваться для всех видов конструкций языка C#.

Таблица 18.1. Извлечение метаданных членов

Конструкция C#	Используемый метод	Используемое имя	Результат
Метод	GetMethod	(имя метода)	MethodInfo
Свойство	GetProperty	(имя свойства)	PropertyInfo
Индексатор	GetDefaultMembers		MemberInfo[] (массив, содержащий объекты PropertyInfo, если скомпилирован в C#)
Поле	GetField	(имя поля)	FieldInfo
Член перечисления	GetField	(имя члена)	FieldInfo
Событие	GetEvent	(имя события)	EventInfo
Конструктор	GetConstructor		ConstructorInfo
Финализатор	GetMethod	"Finalize"	MethodInfo
Операция	GetMethod	"op_" + имя операции	MethodInfo
Вложенный тип	GetNestedType	(имя типа)	Type

Каждый подкласс MemberInfo имеет множество свойств и методов, которые отражают все аспекты метаданных члена, в том числе видимость, модификаторы, аргументы обобщенных типов, параметры, возвращаемый тип и специальные атрибуты. Ниже демонстрируется применение метода GetMethod:

```

MethodInfo m = typeof (Walnut).GetMethod ("Crack");
Console.WriteLine (m);                                // Void Crack()
Console.WriteLine (m.ReturnType);                    // System.Void
  
```

Все экземпляры `*Info` кешируются API-интерфейсом рефлексии при первом использовании:

```
MethodInfo method = typeof (Walnut).GetMethod ("Crack");  
MemberInfo member = typeof (Walnut).GetMember ("Crack") [0];  
Console.Write (method == member); // True
```

Кроме предохранения идентичности объектов кеширование улучшает показатели производительности в противном случае довольно медленно работающего API-интерфейса рефлексии.

Сравнение членов C# и членов CLR

В табл. 18.1 видно, что некоторые функциональные конструкции C# не имеют однозначного соответствия с конструкциями CLR. Причина в том, что среди CLR и API-интерфейс рефлексии были спроектированы с учетом всех языков .NET; рефлексию можно использовать даже из кода Visual Basic.

Некоторые конструкции языка C# — в частности, индексаторы, перечисления, операции и финализаторы — обрабатываются средой CLR особым образом.

- Индексатор C# транслируется в свойство, принимающее один или более аргументов, которое помечено как `[DefaultMember]` на уровне типа.
- Перечисление C# транслируется в подтип `System.Enum` со статическим полем для каждого члена.
- Операция C# транслируется в статический метод со специальным именем, начинающимся с `op_`; примером может служить `op>Addition`.
- Финализатор C# транслируется в метод, который переопределяет `Finalize`.

Еще одна сложность связана с тем, что свойства и события на самом деле заключают в себе два компонента:

- метаданные, описывающие свойство или событие (инкапсулированные посредством `PropertyInfo` или `EventInfo`);
- один или два поддерживающих метода.

В программе C# поддерживающие методы инкапсулированы внутри определения свойства или события. Но после компиляции в IL поддерживающие методы представляются как обычные методы, которые можно вызывать подобно любым другим. Другими словами, `GetMethod` наряду с обычными методами возвращает поддерживающие методы свойств и событий:

```
class Test { public int X { get { return 0; } set {} } }  
void Demo()  
{  
    foreach (MethodInfo mi in typeof (Test).GetMethods())  
        Console.Write (mi.Name + " ");  
}
```

Вот вывод:

```
get_X set_X GetType ToString Equals GetHashCode
```

Идентифицировать эти методы можно через свойство `IsSpecialName` в классе `MethodInfo`. Свойство `IsSpecialName` возвращает `true` для методов доступа к свойствам, индексаторам и событиям, а также для операций. Оно возвращает `false` только для обычных методов C# и для метода `Finalize`, если определен финализатор.

Ниже представлены поддерживающие методы, генерируемые C#.

Конструкция C#	Тип члена	Методы в IL
Свойство	Property	<code>get_XXX</code> и <code>set_XXX</code>
Индексатор	Property	<code>get_Item</code> и <code>set_Item</code>
Событие	Event	<code>add_XXX</code> и <code>remove_XXX</code>

Каждый поддерживающий метод имеет собственный ассоциированный с ним объект `MethodInfo`. Получить к нему доступ можно следующим образом:

```
 PropertyInfo pi = typeof (Console).GetProperty ("Title");
 MethodInfo getter = pi.GetGetMethod(); // get_Title
 MethodInfo setter = pi.GetSetMethod(); // set_Title
 MethodInfo[] both = pi.GetAccessors(); // Length==2
```

Методы `GetAddMethod` и `GetRemoveMethod` делают аналогичную работу для класса `EventInfo`.

Чтобы двигаться в обратном направлении — из `MethodInfo` в связанный объект `PropertyInfo` или `EventInfo` — необходимо выполнить запрос. Для такой цели идеально подходит LINQ:

```
 PropertyInfo p = mi.DeclaringType.GetProperties()
    .First (x => x.GetAccessors (true).Contains (mi));
```

Свойства, допускающие только инициализацию

Свойства, допускающие только инициализацию, которые появились в версии C# 9, могут устанавливаться через инициализатор объекта, но впоследствии трактуются компилятором как допускающие только чтение. С точки зрения среды CLR средство доступа `init` похоже на обычное средство доступа `set`, но со специальным флагом, применяемым к возвращаемому типу метода `set` (который что-то означает для компилятора).

Любопытно, что этот флаг не кодируется как обычный атрибут. Взамен он применяет довольно непонятный механизм, называемый *обязательным модификатором* (`modreq`), который гарантирует, что предшествующие версии компилятора C# (не распознающие `modreq`) будут игнорировать средство доступа, а не интерпретировать свойство как записываемое.

Идентификатор `modreq` для свойств, допускающих только инициализацию, называется `IsExternalInit`, и запросить его можно следующим образом:

```
bool IsInitOnly ( PropertyInfo pi ) => pi
    .GetSetMethod ().ReturnParameter.GetRequiredCustomModifiers ()
    .Any (t => t.Name == "IsExternalInit");
```

NullabilityInfoContext

Начиная с версии .NET 6, класс NullabilityInfoContext позволяет получать информацию о возможности принятия значений null полем, свойством, событием или параметром:

```
void PrintPropertyNullability ( PropertyInfo pi )
{
    var info = new NullabilityInfoContext().Create ( pi );
    Console.WriteLine ( pi.Name + " read " + info.ReadState );
    Console.WriteLine ( pi.Name + " write " + info.WriteState );
    // Использовать info.Element для получения информации о возможности
    // принятия значений null элементами массива
}
```

Члены обобщенных типов

Метаданные членов можно получать как для несвязанных, так и для закрытых обобщенных типов:

```
 PropertyInfo unbound = typeof ( IEnumarator<> ) .GetProperty ( "Current" );
 PropertyInfo closed = typeof ( IEnumarator<int> ) .GetProperty ( "Current" );
 Console.WriteLine ( unbound );                                     // T Current
 Console.WriteLine ( closed );                                    // Int32 Current
 Console.WriteLine ( unbound.PropertyType.IsGenericParameter ); // True
 Console.WriteLine ( closed.PropertyType.IsGenericParameter ); // False
```

Объекты MemberInfo, возвращаемые из несвязанных и закрытых обобщенных типов, всегда отличаются — даже для членов, сигнатуры которых не содержат параметров обобщенных типов:

```
 PropertyInfo unbound = typeof ( List<> ) .GetProperty ( "Count" );
 PropertyInfo closed = typeof ( List<int> ) .GetProperty ( "Count" );
 Console.WriteLine ( unbound );                                 // Int32 Count
 Console.WriteLine ( closed );                                // Int32 Count
 Console.WriteLine ( unbound == closed );                     // False
 Console.WriteLine ( unbound.DeclaringType.IsGenericTypeDefinition ); // True
 Console.WriteLine ( closed.DeclaringType.IsGenericTypeDefinition ); // False
```

Члены несвязанных обобщенных типов не могут вызываться динамически.

Динамический вызов члена



Динамический вызов члена можно выполнить проще с помощью библиотеки с открытым кодом под названием Uncapsulator (<https://github.com/albahari/uncapsulator>), которая доступна на NuGet и GitHub. Она предлагает текущий API-интерфейс для вызова открытых и неоткрытых членов посредством рефлексии с применением специальной динамической привязки.

Получив объект MethodInfo, PropertyInfo или FieldInfo, к нему можно динамически обращаться либо извлекать/устанавливать его значение. Это на-

зывается *поздним связыванием*, т.к. выбор вызываемого члена производится во время выполнения, а не на этапе компиляции.

Например, в следующем коде применяется обычное *статическое связывание*:

```
string s = "Hello";
int length = s.Length;
```

А вот так же самое можно сделать динамически с помощью позднего связывания:

```
object s = "Hello";
 PropertyInfo prop = s.GetType().GetProperty ("Length");
 int length = (int) prop.GetValue (s, null); // 5
```

Методы `GetValue` и `SetValue` извлекают и устанавливают значение объекта `PropertyInfo` или `FieldInfo`. Первый аргумент — экземпляр, который может быть равен `null` для статического члена. Доступ к индексатору подобен доступу к свойству по имени `Item` за исключением того, что при вызове метода `GetValue` или `SetValue` во втором аргументе указываются значения индексатора.

Чтобы вызвать метод динамически, необходимо обратиться к методу `Invoke` на объекте `MethodInfo`, предоставив массив аргументов, которые должны передаваться вызываемому методу. Если окажется, что хотя бы один из аргументов имеет неподходящий тип, тогда во время выполнения генерируется исключение. При динамическом вызове утрачивается безопасность типов этапа компиляции, но по-прежнему поддерживается безопасность типов времени выполнения (такая же, как в случае использования ключевого слова `dynamic`).

Параметры методов

Предположим, что необходимо динамически вызвать метод `Substring` типа `string`. Статически пришлось бы поступить следующим образом:

```
Console.WriteLine ("stamp".Substring(2)); // "amp"
```

Ниже показан динамический эквивалент, в котором применяются рефлексия и позднее связывание:

```
Type type = typeof (string);
Type[] parameterTypes = { typeof (int) };
MethodInfo method = type.GetMethod ("Substring", parameterTypes);
object[] arguments = { 2 };
object returnValue = method.Invoke ("stamp", arguments);
Console.WriteLine (returnValue); // "amp"
```

Поскольку метод `Substring` перегружен, мы должны передать методу `GetMethod` массив типов параметров, чтобы указать желаемую версию. Без типов параметров метод `GetMethod` генерирует исключение `AmbiguousMatchException`.

Метод `GetParameters`, определенный в `MethodBase` (базовый класс для `MethodInfo` и `ConstructorInfo`), возвращает метаданные параметров. Предыдущий пример можно продолжить:

```

ParameterInfo[] paramList = method.GetParameters();
foreach (ParameterInfo x in paramList)
{
    Console.WriteLine (x.Name);           // startIndex
    Console.WriteLine (x.ParameterType);   // System.Int32
}

```

Работа с параметрами `ref` и `out`

Чтобы передать параметры `ref` или `out`, перед получением объекта метода необходимо вызвать `MakeByRefType` на типе. Например, представленный далее код:

```

int x;
bool successfulParse = int.TryParse ("23", out x);

```

можно выполнить динамически следующим образом:

```

object[] args = { "23", 0 };
Type[] argTypes = { typeof (string), typeof (int) .MakeByRefType () };
MethodInfo tryParse = typeof (int).GetMethod ("TryParse", argTypes);
bool successfulParse = (bool) tryParse.Invoke (null, args);
Console.WriteLine (successfulParse + " " + args[1]);      // True 23

```

Тот же самый подход работает для типов параметров `ref` и `out`.

Извлечение и вызов обобщенных методов

Явное указание типов параметров при вызове метода `GetMethod` может оказаться жизненно важным в разрешении неоднозначности перегруженных методов. Тем не менее, указывать типы обобщенных параметров невозможно. Например, рассмотрим класс `System.Linq.Enumerable`, в котором метод `Where` перегружен:

```

public static IEnumerable<TSource> Where<TSource>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, bool> predicate);
public static IEnumerable<TSource> Where<TSource>
    (this IEnumerable<TSource> source, Func<TSource, int, bool> predicate);

```

Чтобы получить конкретную перегруженную версию, потребуется извлечь все методы и затем вручную найти желаемую версию. Приведенный далее запрос извлекает первую перегруженную версию метода `Where`:

```

from m in typeof (Enumerable).GetMethods()
where m.Name == "Where" && m.IsGenericMethod
let parameters = m.GetParameters()
where parameters.Length == 2
let genArg = m.GetGenericArguments().First()
let enumerableOfT = typeof (IEnumerable<>).MakeGenericType (genArg)
let funcOfTBool = typeof (Func<,>).MakeGenericType (genArg, typeof (bool))
where parameters[0].ParameterType == enumerableOfT
    && parameters[1].ParameterType == funcOfTBool
select m

```

Вызов `.Single()` здесь дает корректный объект `MethodInfo` с параметрами несвязанного типа. Следующий шаг предусматривает закрытие параметров типа посредством вызова метода `MakeGenericMethod`:

```
var closedMethod = unboundMethod.MakeGenericMethod (typeof (int));
```

В данном случае мы закрываем `TSource` с использованием `int`, что позволяет вызывать метод `Enumerable.Where` с `source` типа `IEnumerable<int>` и `predicate` типа `Func<int, bool>`:

```
int[] source = { 3, 4, 5, 6, 7, 8 };
Func<int, bool> predicate = n => n % 2 == 1; // Только нечетные числа
```

Теперь закрытый обобщенный метод можно вызывать:

```
var query = (IEnumerable<int>) closedMethod.Invoke
    (null, new object[] { source, predicate });

foreach (int element in query) Console.Write (element + "|"); // 3|5|7|
```



В случае применения API-интерфейса `System.Linq.Expressions` для динамического построения выражений (см. главу 8) беспокоиться по поводу указания обобщенного метода не придется. Метод `Expression.Call` перегружен, чтобы позволить указывать аргументы закрытого типа метода, который требуется вызвать:

```
int[] source = { 3, 4, 5, 6, 7, 8 };
Func<int, bool> predicate = n => n % 2 == 1;

var sourceExpr = Expression.Constant (source);
var predicateExpr = Expression.Constant (predicate);

var callExpression = Expression.Call (
    typeof (Enumerable), "Where",
    new[] { typeof (int) }, // Закрытый обобщенный тип аргумента.
    sourceExpr, predicateExpr);
```

Использование делегатов для повышения производительности

Динамические вызовы относительно неэффективны и характеризуются накладными расходами, которые обычно укладываются в диапазон из нескольких микросекунд. Если метод вызывается многократно в цикле, то накладные расходы, приходящиеся на вызов, можно сместить в наносекундный диапазон, обращаясь вместо метода к динамически созданному экземпляру делегата, который нацелен на необходимый динамический метод. В следующем примере мы динамически вызываем метод `Trim` типа `string` миллион раз без значительных накладных расходов:

```
MethodInfo trimMethod = typeof (string).GetMethod ("Trim", new Type[0]);
var trim = (StringToString) Delegate.CreateDelegate
    (typeof (StringToString), trimMethod);
for (int i = 0; i < 1000000; i++)
    trim ("test");
delegate string StringToString (string s);
```

Такой код работает быстрее, потому что затратное позднее связывание (код, выделенный полужирным) происходит только один раз.

Доступ к неоткрытым членам

Все методы типов, применяемых для зондирования метаданных (например, `GetProperty`, `GetField` и т.д.), имеют перегруженные версии, которые принимают перечисление `BindingFlags`. Это перечисление служит фильтром метаданных и позволяет изменять стандартный критерий поиска. Наиболее распространенное использование связано с извлечением неоткрытых членов (работает только в настольных приложениях).

Например, пусть имеется следующий класс:

```
class Walnut
{
    private bool cracked;
    public void Crack() { cracked = true; }
    public override string ToString() { return cracked.ToString(); }
}
```

Вот как с ним можно поступить:

```
Type t = typeof (Walnut);
Walnut w = new Walnut();
w.Crack();
FieldInfo f = t.GetField ("cracked", BindingFlags.NonPublic |
                           BindingFlags.Instance);
f.SetValue (w, false);
Console.WriteLine (w); // False
```

Применение рефлексии для доступа к неоткрытым членам является мощным средством, однако оно также и небезопасно, поскольку позволяет обойти инкапсуляцию, создавая неуправляемую зависимость от внутренней реализации типа.

Перечисление `BindingFlags`

Перечисление `BindingFlags` предназначено для побитового комбинирования. Чтобы получить любое совпадение, необходимо начать с одной из следующих четырех комбинаций:

```
BindingFlags.Public | BindingFlags.Instance
BindingFlags.Public | BindingFlags.Static
BindingFlags.NonPublic | BindingFlags.Instance
BindingFlags.NonPublic | BindingFlags.Static
```

Флаг `NonPublic` охватывает квалификаторы доступа `internal`, `protected`, `protected internal` и `private`.

Приведенный ниже код извлекает все открытые статические члены типа `object`:

```
BindingFlags publicStatic = BindingFlags.Public | BindingFlags.Static;
MemberInfo[] members = typeof (object).GetMembers (publicStatic);
```

В показанном далее примере извлекаются все неоткрытые члены типа `object`, как статические, так и члены экземпляра:

```
BindingFlags nonPublicBinding =  
    BindingFlags.NonPublic | BindingFlags.Static | BindingFlags.Instance;  
MemberInfo[] members = typeof (object).GetMembers (nonPublicBinding);
```

Флаг `DeclaredOnly` исключает функции, унаследованные от базовых типов, если только они не были переопределены.



Флаг `DeclaredOnly` может несколько запутывать тем, что он *ограничивает* результирующий набор (тогда как все остальные флаги *расширяют* результирующий набор).

Обобщенные методы

Обобщенные методы не могут вызываться напрямую; следующий код приведет к генерации исключения:

```
class Program  
{  
    public static T Echo<T> (T x) { return x; }  
    static void Main()  
    {  
        MethodInfo echo = typeof (Program).GetMethod ("Echo");  
        Console.WriteLine (echo.IsGenericMethodDefinition); // True  
        echo.Invoke (null, new object[] { 123 } ); // Генерируется исключение  
    }  
}
```

Здесь потребуется дополнительный шаг, который предусматривает вызов метода `MakeGenericMethod` на объекте `MethodInfo` с указанием конкретных значений для аргументов обобщенных типов. В результате возвращается другой объект `MethodInfo`, к которому можно затем обращаться, как показано ниже:

```
MethodInfo echo = typeof (Program).GetMethod ("Echo");  
MethodInfo intEcho = echo.MakeGenericMethod (typeof (int));  
Console.WriteLine (intEcho.IsGenericMethodDefinition); // False  
Console.WriteLine (intEcho.Invoke (null, new object[] { 3 } )); // 3
```

Анонимный вызов членов обобщенного интерфейса

Рефлексия удобна, когда необходимо вызвать член обобщенного интерфейса, а параметры типа не известны вплоть до времени выполнения. Теоретически если типы спроектированы идеально, то потребность в подобном действии возникает редко; тем не менее, естественно, типы далеко не всегда проектируются идеальным образом.

Например, предположим, что нужно написать более мощную версию метода `ToString`, которая могла бы развертывать результат выполнения запросов LINQ. Мы могли бы начать так:

```
public static string ToStringEx <T> (IEnumerable<T> sequence)  
{  
    ...  
}
```

Это уже довольно ограничено. Что если параметр `sequence` содержит вложенные коллекции, по которым также необходимо выполнить перечисление? Чтобы справиться с такой задачей, приведенный метод придется перегрузить:

```
public static string ToStringEx <T> (IEnumerable<IEnumerable<T>> sequence)
```

А если `sequence` содержит группы или *проекции* вложенных последовательностей? Статическое решение перегрузки методов становится непрактичным — нам необходим подход, который допускает масштабирование с целью обработки произвольного графа объектов вроде такого:

```
public static string ToStringEx (object value)
{
    if (value == null) return "<null>";
    StringBuilder sb = new StringBuilder();
    if (value is List<>) // Ошибка
        sb.Append ("List of " + ((List<> value).Count + " items")); // Ошибка
    if (value is IGrouping<,>) // Ошибка
        sb.Append ("Group with key=" + ((IGrouping<,> value).Key)); // Ошибка
    // Выполнить перечисление элементов коллекции, если это коллекция,
    // рекурсивно вызывая метод ToStringEx
    // ...
    return sb.ToString();
}
```

К сожалению, код не скомпилируется: обращаться к членам *несвязанного* обобщенного типа, такого как `List<>` или `IGrouping<,>`, нельзя. В случае `List<>` проблему можно решить за счет использования вместо него необобщенного интерфейса `IList`:

```
if (value is IList)
    sb.AppendLine ("A list with " + ((IList) value).Count + " items");
```



Так можно поступать из-за того, что проектировщики типа `List<>` предусмотрительно реализовали классический интерфейс `IList` (а также *обобщенный* интерфейс `IList`). Тот же самый принцип полезно принимать во внимание при написании собственных обобщенных типов: наличие необобщенного интерфейса или базового класса, к которому потребители смогут прибегнуть как к запасному варианту, может оказаться исключительно полезным.

Для `IGrouping<,>` решение не настолько простое. Интерфейс `IGrouping<,>` определен следующим образом:

```
public interface IGrouping < TKey, TElement > : IEnumerable < TElement >,
    IEnumerable
{
    TKey Key { get; }
}
```

Здесь нет никакого необобщенного типа, который можно было бы применить для доступа к свойству `Key`, поэтому в данном случае придется использовать рефлексию. Решение заключается в том, чтобы обращаться не к членам *несвязанного* обобщенного типа (что невозможно), а к членам *закрытого* обобщенного типа, чьи аргументы типа устанавливаются во время выполнения.



В следующей главе мы решим такую задачу более простым способом с помощью ключевого слова `dynamic` языка C#. Хорошим признаком для применения динамического связывания является ситуация, когда в противном случае приходится предпринимать разнообразные трюки с типами, как делается в настоящий момент.

На первом шаге понадобится выяснить, реализует ли `value` интерфейс `IGrouping<,>`, и если да, то получить закрытый обобщенный интерфейс. Проще всего это сделать, выполнив запрос LINQ. Затем производится извлечение и обращение к свойству `Key`:

```
public static string ToStringEx (object value)
{
    if (value == null) return "<null>";
    if (value.GetType().IsPrimitive) return value.ToString();

    StringBuilder sb = new StringBuilder();
    if (value is IList)
        sb.Append ("List of " + ((IList)value).Count + " items: ");

    Type closedIGrouping = value.GetType () .GetInterfaces ()
        .Where (t => t .IsGenericType &&
            t .GetGenericTypeDefinition () == typeof (IGrouping<,>))
        .FirstOrDefault ();

    if (closedIGrouping != null)      // Обратиться к свойству Key
        // реализации IGrouping<,>
    {
        PropertyInfo pi = closedIGrouping.GetProperty ("Key");
        object key = pi.GetValue (value, null);
        sb.Append ("Group with key=" + key + ": ");
    }

    if (value is IEnumerable)
        foreach (object element in ((IEnumerable)value))
            sb.Append (ToStringEx (element) + " ");
    if (sb.Length == 0) sb.Append (value.ToString ());

    return "\r\n" + sb.ToString ();
}
```

Такой подход надежен: он работает независимо от того, как реализован интерфейс `IGrouping<,>` — неявно или явно. В следующем коде демонстрируется использование метода `ToStringEx`:

```
Console.WriteLine (ToStringEx (new List<int> { 5, 6, 7 } ));
Console.WriteLine (ToStringEx ("xyyzzz".GroupBy (c => c) ));
```

Вот вывод:

```
List of 3 items: 5 6 7
Group with key=x: x
Group with key=y: y y
Group with key=z: z z z
```

ВЫЗОВ СТАТИЧЕСКИХ ВИРТУАЛЬНЫХ/АБСТРАКТНЫХ ЧЛЕНОВ ИНТЕРФЕЙСОВ

Начиная с .NET 7 и C# 11, в интерфейсах можно определять статические виртуальные и абстрактные члены (см. раздел “Статические виртуальные/абстрактные члены интерфейсов” в главе 3). Примером является интерфейс `IParsable<TSelf>` в .NET:

```
public interface IParsable<TSelf> where TSelf : IParsable<TSelf>
{
    static abstract TSelf Parse (string s, IFormatProvider provider);
    ...
}
```

С помощью ограниченного параметра типа статические абстрактные члены интерфейса можно вызывать полиморфным образом:

```
T ParseAny<T> (string s) where T : IParsable<T> => T.Parse (s, null);
```

Чтобы вызвать статический абстрактный член интерфейса посредством рефлексии, понадобится получить объект `MethodInfo` из конкретного типа, реализующего интерфейс, а не из самого интерфейса. Очевидным решением будет получение конкретного члена по сигнатуре:

```
MethodInfo GetParseMethod (Type concreteType) =>
    concreteType.GetMethod ("Parse",
        new[] { typeof (string), typeof (IFormatProvider) });
```

Однако поступить так не удастся, если член был реализован явно. Для решения этой проблемы в общем виде мы начнем с написания функции, которая извлекает `MethodInfo` для конкретного типа, реализующего указанный метод интерфейса:

```
MethodInfo GetImplementedInterfaceMethod (Type concreteType,
    Type interfaceType, string methodName, Type[] paramTypes)
{
    var map = concreteType.GetInterfaceMap (interfaceType);
    return map.InterfaceMethods
        .Zip (map.TargetMethods)
        .Single (m => m.First.Name == methodName &&
            m.First.GetParameters ().Select (p => p.ParameterType)
                .SequenceEqual (paramTypes))
        .Second;
}
```

Основой здесь является вызов метода `GetInterfaceMap`, который возвращает следующую структуру:

```
public struct InterfaceMapping
{
    public MethodInfo[] InterfaceMethods;           // Все эти массивы имеют
    public MethodInfo[] TargetMethods;              // одну и ту же длину
    ...
}
```

Структура InterfaceMapping сообщает, каким образом члены реализованного интерфейса (InterfaceMethods) сопоставляются с членами конкретного типа (TargetMethods).



Метод GetInterfaceMap также работает с обычными методами (экземпляра); просто он оказывается особенно полезным, когда применяется в отношении статических абстрактных членов интерфейсов.

Затем мы использовали метод Zip из LINQ для выстраивания элементов в двух массивах, что позволило легко получить целевой метод, соответствующий методу интерфейса с желаемой сигнатурой.

Теперь мы можем применять это для написания метода ParseAny на основе рефлексии:

```
object ParseAny (Type type, string value)
{
    MethodInfo parseMethod = GetImplementedInterfaceMethod (type,
        type.GetInterface ("IParsable`1"),
        "Parse",
        new[] { typeof (string), typeof (IFormatProvider) });
    return parseMethod.Invoke (null, new[] { value, null });
}
Console.WriteLine (ParseAny (typeof (float), ".2")); // 0.2
```

При вызове метода GetImplementedInterfaceMethod необходимо предоставить (закрытый) тип интерфейса, который получен в результате вызова GetInterface("IParsable`1") для конкретного типа. Учитывая, что (в данном сценарии) желаемый интерфейс известен во время компиляции, взамен можно было бы использовать следующее выражение:

```
typeof (IParsable<>).MakeGenericType (type)
```

Рефлексия сборок

Для выполнения рефлексии сборки динамическим образом понадобится вызвать метод GetType или GetTypes на объекте Assembly. Приведенный ниже код извлекает из текущей сборки тип по имени TestProgram, определенный в пространстве имен Demos:

```
Type t = Assembly.GetExecutingAssembly ().GetType ("Demos.TestProgram");
```

Сборку можно также получить из существующего типа:

```
typeof (Foo).Assembly.GetType ("Demos.TestProgram");
```

В следующем примере выводится список всех типов в сборке mylib.dll из каталога e:\demo:

```
Assembly a = Assembly.LoadFile (@"e:\demo\mylib.dll");
foreach (Type t in a.GetTypes())
    Console.WriteLine (t);
```

или:

```
Assembly a = typeof (Foo).GetTypeInfo().Assembly;
foreach (Type t in a.ExportedTypes)
    Console.WriteLine (t);
```

Метод `GetTypes` и свойство `ExportedTypes` возвращают только типы верхнего уровня, но не вложенные типы.

Модули

Вызов метода `GetTypes` на многомодульной сборке возвращает все типы из всех модулей. В результате существование модулей можно проигнорировать и трактовать сборку как контейнер для типов. Однако есть один случай, когда модули имеют значение — работа с маркерами метаданных.

Маркер метаданных представляет собой целое число, которое уникальным образом ссылается на тип, член, строку или ресурс внутри области видимости модуля. Язык IL использует маркеры метаданных, а потому при синтаксическом разборе кода IL вы должны иметь возможность их распознавать. Предназначенные для такой цели методы определены в типе `Module` и называются `ResolveType`, `ResolveMember`, `ResolveString` и `ResolveSignature`. Мы вернемся к ним в последнем разделе главы при написании дизассемблера.

Получить список всех модулей в сборке можно с помощью метода `GetModules`. Свойство `ManifestModule` позволяет напрямую обращаться к главному модулю сборки.

Работа с атрибутами

Среда CLR позволяет посредством атрибутов присоединять дополнительные метаданные к типам, членам и сборкам. Это механизм, с помощью которого производится управление рядом важных функций CLR (таких как идентификация сборок или маршализация типов для собственной возможности взаимодействия), что делает атрибуты неотъемлемой частью приложения.

Ключевая характеристика механизма атрибутов заключается в том, что можно создавать собственные атрибуты и затем применять их подобно любым другим атрибутам для “декорирования” элементов кода дополнительной информацией. Такая дополнительная информация компилируется внутрь лежащей в основе сборки и может быть извлечена во время выполнения с использованием рефлексии для построения декларативно работающих служб, подобных автоматизированному модульному тестированию.

Основы атрибутов

Существуют три вида атрибутов:

- атрибуты с побитовым отображением;
- специальные атрибуты;
- псевдоспециальные атрибуты.

Из них расширяемыми являются только *специальные атрибуты*.



Сам по себе термин “атрибуты” может относиться к любому из указанных выше трех разновидностей, хотя в мире C# чаще всего будут иметься в виду специальные или псевдоспециальные атрибуты.

Атрибуты с побитовым отображением (bit-mapped attributes; наш термин) отображаются на выделенные биты в метаданных типа. Большинство ключевых слов модификаторов C# вроде public, abstract и sealed компилируются именно в атрибуты с побитовым отображением. Эти атрибуты очень эффективны, т.к. они задействуют минимальное пространство в метаданных (обычно всего лишь один бит), и среда CLR может находить их с небольшими затратами или вообще без таковых. Доступ к ним в API-интерфейсе рефлексии открывается через выделенные свойства класса Type (и других подклассов MemberInfo), такие как IsPublic, IsAbstract и IsSealed. Свойство Attributes возвращает перечисление флагов, которое описывает большинство атрибутов:

```
static void Main()
{
    TypeAttributes ta = typeof (Console).Attributes;
    MethodAttributes ma = MethodInfo.GetCurrentMethod().Attributes;
    Console.WriteLine (ta + "\r\n" + ma);
}
```

Ниже показан результат:

```
AutoLayout, AnsiClass, Class, Public, Abstract, Sealed, BeforeFieldInit
PrivateScope, Private, Static, HideBySig
```

По контрасту *специальные атрибуты* компилируются в двоичный блок, который находится в главной таблице метаданных типа. Все специальные атрибуты представлены подклассом класса System.Attribute и в отличие от атрибутов с побитовым отображением являются расширяемыми. Двоичный блок в метаданных идентифицирует класс атрибута, а также хранит значения любых позиционных либо именованных аргументов, которые были указаны, когда атрибут применялся. Специальные атрибуты, определяемые вами самостоятельно, архитектурно идентичны атрибутам, которые определены в библиотеках .NET.

В главе 4 было показано, каким образом присоединять специальные атрибуты к типу или члену в C#. Вот как присоединить предопределенный атрибут Obsolete к классу Foo:

```
[Obsolete] public class Foo { ... }
```

Тем самым компилятору сообщается о необходимости встраивания в метаданные для Foo экземпляра ObsoleteAttribute, который затем может быть извлечен через рефлексию во время выполнения посредством вызова метода GetCustomAttributes на объекте Type или MemberInfo.

Псевдоспециальные атрибуты выглядят и ведут себя подобно стандартным специальным атрибутам. Они представлены подклассом класса System.Attribute и присоединяются в стандартной манере:

```
[System.Runtime.InteropServices.StructLayout(LayoutKind.Sequential)]
class SystemTime { ... }
```

Отличие в том, что компилятор или среда CLR внутренне оптимизирует псевдоспециальные атрибуты, преобразуя их в атрибуты с побитовым отображением. Примеры включают `StructLayout`, `In` и `Out` (см. главу 24). Рефлексия открывает доступ к псевдоспециальным атрибутам через выделенные свойства вроде `IsLayoutSequential`, и во многих случаях они также возвращаются в виде объектов `System.Attribute` при вызове метода `GetCustomAttributes`. Это значит, что разница между псевдоспециальными и специальными атрибутами может быть (практически) проигнорирована (заметное исключение — использование пространства имен `Reflection.Emit` для динамической генерации типов во время выполнения; данная тема будет раскрыта в разделе “Выпуск сборок и типов” далее в главе).

Атрибут `AttributeUsage`

`AttributeUsage` является атрибутом, применяемым к классам атрибутов. Он инструктирует компилятор, каким образом должен использоваться целевой атрибут:

```
public sealed class AttributeUsageAttribute : Attribute
{
    public AttributeUsageAttribute (AttributeTargets validOn);
    public bool AllowMultiple      { get; set; }
    public bool Inherited         { get; set; }
    public AttributeTargets ValidOn { get; }
}
```

Свойство `AllowMultiple` управляет тем, может ли определяемый атрибут применяться к одной и той же цели более одного раза. Свойство `Inherited` указывает на то, должен ли атрибут, примененный к базовому классу, применяться также и к производным классам (или в случае методов — должен ли атрибут, примененный к виртуальному методу, применяться также к переопределенным методам). Свойство `ValidOn` определяет набор целей (классов, интерфейсов, свойств, методов, параметров и т.д.), к которым может быть присоединен атрибут. Оно принимает любую комбинацию значений перечисления `AttributeTargets`, которое содержит следующие члены:

All	Delegate	GenericParameter	Parameter
Assembly	Enum	Interface	Property
Class	Event	Method	ReturnValue
Constructor	Field	Module	Struct

В целях иллюстрации ниже показано, как авторы .NET применили атрибут `AttributeUsage` к атрибуту `Serializable`:

```
[AttributeUsage (AttributeTargets.Delegate |
                  AttributeTargets.Enum |
                  AttributeTargets.Struct |
                  AttributeTargets.Class,     Inherited = false)
]
public sealed class SerializableAttribute : Attribute { }
```

Фактически это почти полное определение атрибута `Serializable`. Написание класса атрибута, не имеющего свойств или специальных конструкторов, столь же просто.

Определение собственного атрибута

Вот шаги, которые потребуется выполнить для определения собственного атрибута.

1. Создайте класс, производный от `System.Attribute` или от потомка `System.Attribute`. По соглашению имя класса должно заканчиваться словом “`Attribute`”, хотя поступать так не обязательно.
2. Примените атрибут `AttributeUsage`, описанный в предыдущем разделе. Если атрибут не требует каких-либо свойств или аргументов в своем конструкторе, то работа закончена.
3. Напишите один или более открытых конструкторов. Параметры конструктора определяют позиционные параметры атрибута и становятся обязательными при использовании атрибута.
4. Объявите открытое поле или свойство для каждого именованного параметра, который планируется поддерживать. При использовании атрибута именованные параметры будут необязательными.



Свойства атрибута и параметры конструктора должны относиться к следующим типам:

- запечатанный примитивный тип, т.е. `bool`, `byte`, `char`, `double`, `float`, `int`, `long`, `short` или `string`;
- тип `Type`;
- тип перечисления;
- одномерный массив любого из упомянутых выше типов.

Когда атрибут применяется, у компилятора также должна быть возможность статической оценки каждого свойства или аргумента конструктора.

В следующем классе определяется атрибут для содействия системе автоматизированного модульного тестирования. Он указывает, что метод должен быть протестирован, устанавливает количество повторений теста и задает сообщение, выдаваемое в случае неудачи:

```
[AttributeUsage (AttributeTargets.Method)]
public sealed class TestAttribute : Attribute
{
    public int Repetitions;
    public string FailureMessage;

    public TestAttribute () : this (1) { }
    public TestAttribute (int repetitions) { Repetitions = repetitions; }
}
```

Ниже представлен код класса Foo с методами, которые декорированы атрибутом Test разнообразными способами:

```
class Foo
{
    [Test]
    public void Method1() { ... }

    [Test(20)]
    public void Method2() { ... }

    [Test(20, FailureMessage="Debugging Time!")]
    public void Method3() { ... }
}
```

Извлечение атрибутов во время выполнения

Есть два стандартных способа извлечения атрибутов во время выполнения:

- вызов метода `GetCustomAttributes` на любом объекте Type или MemberInfo;
- вызов метода `Attribute.GetCustomAttribute` или `Attribute.GetCustomAttributes`.

Последние два метода перегружены для приема любого объекта рефлексии, который соответствует допустимой цели атрибута (Type, Assembly, Module, MemberInfo или ParameterInfo).



Для получения информации об атрибутах можно также вызывать метод `GetCustomAttributesData` на типе или члене. Отличие между этим методом и `GetCustomAttributes` в том, что первый из них сообщает, каким образом атрибут создавался: он указывает перегруженную версию конструктора, которая была использована, и значение каждого аргумента и именованного параметра конструктора. Такие сведения полезны, когда требуется выпускать код или IL для воссоздания атрибута в том же самом состоянии (как объясняется в разделе “Выпуск членов типа” далее в главе).

Ниже показано, каким образом можно выполнить перечисление всех методов в предшествующем классе Foo, которые имеют атрибут `TestAttribute`:

```
foreach (MethodInfo mi in typeof (Foo) .GetMethods ())
{
    TestAttribute att = (TestAttribute) Attribute.GetCustomAttribute
        (mi, typeof (TestAttribute));
    if (att != null)
        Console.WriteLine ("Method {0} will be tested; reps={1}; msg={2}",
                           mi.Name, att.Repetitions, att.FailureMessage);
}
```

или:

```
foreach (MethodInfo mi in typeof (Foo) .GetTypeInfo () .DeclaredMethods)
    ...
```

Вот вывод:

```
Method Method1 will be tested; reps=1; msg=
Method Method2 will be tested; reps=20; msg=
Method Method3 will be tested; reps=20; msg=Debugging Time!
```

Чтобы завершить демонстрацию применения таких приемов при написании системы модульного тестирования, ниже представлен тот же самый пример, расширенный так, чтобы на самом деле вызывать методы, декорированные атрибутом [Test]:

```
foreach (MethodInfo mi in typeof (Foo).GetMethods ())
{
    TestAttribute att = (TestAttribute) Attribute.GetCustomAttribute
        (mi, typeof (TestAttribute));

    if (att != null)
        for (int i = 0; i < att.Repetitions; i++)
            try
            {
                mi.Invoke (new Foo(), null); // Вызвать метод без аргументов
            }
            catch (Exception ex) // Поместить исключение внутрь att.FailureMessage
            {
                throw new Exception ("Error: " + att.FailureMessage, ex); // Ошибка
            }
}
```

Возвращаясь к рефлексии атрибутов, далее представлен пример, в котором выводится список атрибутов, присутствующих в заданном типе:

```
object[] atts = Attribute.GetCustomAttributes (typeof (Test));
foreach (object att in atts) Console.WriteLine (att);

[Serializable, Obsolete]
class Test
{}
```

Вывод будет выглядеть следующим образом:

```
System.ObsoleteAttribute
System.SerializableAttribute
```

Динамическая генерация кода

Пространство имен `System.Reflection.Emit` содержит классы для создания метаданных и кода IL во время выполнения. Генерация кода динамическим образом полезна для решения определенных видов задач программирования. Примером может служить API-интерфейс регулярных выражений, который выпускает типы, настроенные на специфические регулярные выражения. Еще одним примером является инфраструктура Entity Framework Core, которая использует `Reflection.Emit` для генерации классов-посредников, чтобы сделать возможной ленивую загрузку.

Генерация кода IL с помощью класса `DynamicMethod`

Класс `DynamicMethod` — это легковесный инструмент в пространстве имен `System.Reflection.Emit`, предназначенный для генерации методов на лету. В отличие от `TypeBuilder` он не требует предварительной установки динамической сборки, модуля и типа, в котором должен содержаться метод. Такие характеристики делают класс `DynamicMethod` подходящим средством для решения простых задач, а также хорошим введением в пространство имен `Reflection.Emit`.



Объект `DynamicMethod` и связанный с ним код IL подвергаются сборке мусора, когда на них больше нет ссылок. Это значит, что динамические методы можно генерировать многократно, не заполняя излишне память. (Чтобы делать то же самое с динамическими сборками, при создании сборки потребуется применить флаг `AssemblyBuilderAccess.RunAndCollect`.)

Ниже представлен простой пример использования класса `DynamicMethod` для создания метода, который выводит на консоль строку `Hello world`:

```
public class Test
{
    static void Main()
    {
        var dynMeth = new DynamicMethod ("Foo", null, null, typeof (Test));
        ILGenerator gen = dynMeth.GetILGenerator();
        gen.EmitWriteLine ("Hello world");
        gen.Emit (OpCodes.Ret);
        dynMeth.Invoke (null, null); // Hello world
    }
}
```

Для каждого кода операции IL в классе `OpCodes` имеется статическое поле, допускающее только чтение. Большая часть функциональности доступна через различные коды операций, хотя в классе `ILGenerator` также есть специализированные методы для генерации меток и локальных переменных и для обработки исключений. Метод всегда завершается кодом операции `OpCodes.Ret`, который означает “возврат”, или разновидностью инструкции ветвления/генерации. Метод `EmitWriteLine` класса `ILGenerator` — это сокращение для выпуска нескольких кодов операций более низкого уровня. Мы могли бы получить тот же самый результат, заменив вызов `EmitWriteLine` следующим образом:

```
MethodInfo writeLineStr = typeof (Console).GetMethod ("WriteLine",
    new Type[] { typeof (string) });
gen.Emit (OpCodes.Ldstr, "Hello world"); // Загрузить строку
gen.Emit (OpCodes.Call, writeLineStr); // Вызвать метод
```

Обратите внимание, что мы передаем конструктору `DynamicMethod` аргумент `typeof (Test)`. Это предоставляет динамическому методу доступ к неоткрытым методам данного типа, разрешая поступать следующим образом:

```

public class Test
{
    static void Main()
    {
        var dynMeth = new DynamicMethod ("Foo", null, null, typeof (Test));
        ILGenerator gen = dynMeth.GetILGenerator();
        MethodInfo privateMethod = typeof (Test).GetMethod ("HelloWorld",
            BindingFlags.Static | BindingFlags.NonPublic);
        gen.Emit (OpCodes.Call, privateMethod);           // Вызвать метод HelloWorld
        gen.Emit (OpCodes.Ret);
        dynMeth.Invoke (null, null);                     // Hello world
    }

    static void HelloWorld()      // Закрытый метод, но мы можем вызвать его
    {
        Console.WriteLine ("Hello world");
    }
}

```

Освоение языка IL требует существенного времени. Вместо запоминания всех кодов операций намного проще скомпилировать какую-нибудь программу C# и затем исследовать, копировать и настраивать код IL. Средство LINQPad отображает код IL для любого метода или фрагмента кода, который вы введете, а инструменты для просмотра сборок, такие как ildasm или .NET Reflector, удобны для изучения существующих сборок.

Стек вычислений

Центральной концепцией в IL является *стек вычислений*. Чтобы вызвать метод с аргументами, сначала понадобится затолкнуть (“загрузить”) аргументы в стек вычислений и затем вызвать метод. Впоследствии метод извлекает необходимые аргументы из стека вычислений. Мы демонстрировали прием ранее при вызове `Console.WriteLine`. Ниже приведен похожий пример с целым числом:

```

var dynMeth = new DynamicMethod ("Foo", null, null, typeof (void));
ILGenerator gen = dynMeth.GetILGenerator();
MethodInfo writeLineInt = typeof (Console).GetMethod ("WriteLine",
    new Type[] { typeof (int) });

//Коды операций Ldc* загружают числовые литералы различных типов и размеров
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 123); //Затолкнуть в стек 4-байтовое целое число
gen.Emit (OpCodes.Call, writeLineInt);

gen.Emit (OpCodes.Ret);
dynMeth.Invoke (null, null);    // 123

```

Чтобы сложить два числа, нужно загрузить их в стек вычислений и вызвать `Add`. Код операции `Add` извлекает два значения из стека вычислений и заталкивает результат обратно в стек. Следующий код суммирует числа 2 и 2, после чего выводит результат с применением полученного ранее метода `WriteLine`:

```

gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 2);           // Затолкнуть 4-байтовое целое число,
                                         // значение = 2
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 2);           // Затолкнуть 4-байтовое целое число,
                                         // значение = 2
gen.Emit (OpCodes.Add);                // Сложить и получить результат
gen.Emit (OpCodes.Call, writeLineInt);

```

Чтобы вычислить выражение $10/2+1$, можно поступить либо так:

```

gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 10);
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 2);
gen.Emit (OpCodes.Div);
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 1);
gen.Emit (OpCodes.Add);
gen.Emit (OpCodes.Call, writeLineInt);

```

либо так:

```

gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 1);
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 10);
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 2);
gen.Emit (OpCodes.Div);
gen.Emit (OpCodes.Add);
gen.Emit (OpCodes.Call, writeLineInt);

```

Передача аргументов динамическому методу

Коды операций `Ldarg` и `Ldarg_XXX` загружают в стек аргумент, переданный методу. Чтобы значение возвратилось, перед завершением оно должно оставаться единственным значением в стеке. Для этого при вызове конструктора `DynamicMethod` потребуется указать возвращаемый тип и типы аргументов. В показанном ниже коде создается динамический метод, который возвращает сумму двух целых чисел:

```

DynamicMethod dynMeth = new DynamicMethod ("Foo",
    typeof (int),                                // Возвращаемый тип: int
    new[] { typeof (int), typeof (int) },          // Типы параметров: int, int
    typeof (void));
ILGenerator gen = dynMeth.GetILGenerator();

gen.Emit (OpCodes.Ldarg_0); // Затолкнуть в стек вычислений первый аргумент
gen.Emit (OpCodes.Ldarg_1); // Затолкнуть в стек вычислений второй аргумент
gen.Emit (OpCodes.Add);   // Сложить аргументы (результат остается в стеке)
gen.Emit (OpCodes.Ret);   // Возврат при стеке, содержащем одно значение

int result = (int) dynMeth.Invoke (null, new object[] { 3, 4 } ); // 7

```



По завершении стек вычислений должен содержать в точности 0 или 1 элемент (в зависимости от того, возвращает ли метод значение). Если нарушить данное требование, то среда CLR откажется выполнять метод. Удалить элемент из стека без обработки можно с помощью кода операции `OpCodes.Pop`.

Вместо вызова `Invoke` иногда удобнее оперировать динамическим методом как типизированным делегатом, для чего предназначен метод `CreateDelegate`. В нашем случае необходимый делегат имеет два целочисленных параметра и целочисленный возвращаемый тип. Для этой цели мы можем использовать делегат `Func<int, int, int>`. Тогда последнюю строку в предыдущем примере можно было бы заменить следующими строками:

```
var func = (Func<int,int,int>) dynMeth.CreateDelegate  
                    (typeof (Func<int,int,int>));  
int result = func (3, 4); // 7
```



Делегат также устраняет накладные расходы, связанные с динамическим вызовом метода, экономя несколько микросекунд на вызов.

Мы покажем, как передавать ссылку, в разделе “Выпуск членов типа” далее в главе.

Генерация локальных переменных

Объявить локальную переменную можно путем вызова метода `DeclareLocal` на экземпляре `ILGenerator`. В результате возвращается объект `LocalBuilder`, который можно использовать в сочетании с кодами операций, такими как `Ldloc` (загрузить локальную переменную) или `Stloc` (сохранить локальную переменную). Операция `Ldloc` засыпает в стек вычислений, а `Stloc` извлекает из него. Например, взгляните на показанный далее код C#:

```
int x = 6;  
int y = 7;  
x *= y;  
Console.WriteLine (x);
```

Приведенный ниже код динамически генерирует предыдущий код:

```
var dynMeth = new DynamicMethod ("Test", null, null, typeof (void));  
ILGenerator gen = dynMeth.GetILGenerator();  
  
LocalBuilder localX = gen.DeclareLocal (typeof (int)); // Объявить  
// переменную x  
LocalBuilder localY = gen.DeclareLocal (typeof (int)); // Объявить  
// переменную y  
  
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 6); // Затолкнуть в стек вычислений литерал 6  
gen.Emit (OpCodes.Stloc, localX); // Сохранить в localX  
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 7); // Затолкнуть в стек вычислений литерал 7  
gen.Emit (OpCodes.Stloc, localY); // Сохранить в localY  
  
gen.Emit (OpCodes.Ldloc, localX); // Затолкнуть в стек вычислений localX  
gen.Emit (OpCodes.Ldloc, localY); // Затолкнуть в стек вычислений localY  
gen.Emit (OpCodes.Mul); // Перемножить значения  
gen.Emit (OpCodes.Stloc, localX); // Сохранить результат в localX  
  
gen.EmitWriteLine (localX); // Вывести значение localX  
gen.Emit (OpCodes.Ret);  
  
dynMeth.Invoke (null, null); // 42
```

Ветвление

В языке IL отсутствуют циклы вроде `while`, `do` и `for`; вся работа делается с помощью меток плюс эквивалентов оператора `goto` и условного оператора `goto`. Существуют коды операций ветвления, такие как `Br` (безусловное ветвление), `Brtrue` (ветвление, если значение в стеке вычислений равно `true`) и `Blt` (ветвление, если первое значение меньше второго значения).

Для установки цели ветвления сначала понадобится вызвать метод `DefineLabel` (он возвращает объект `Label`) и затем вызвать метод `MarkLabel` в месте, к которому должна быть прикреплена метка. Например, рассмотрим следующий код C#:

```
int x = 5;
while (x <= 10) Console.WriteLine (x++);
```

Выпустить его можно так:

```
ILGenerator gen = ...
Label startLoop = gen.DefineLabel(); // Объявить метки
Label endLoop = gen.DefineLabel();

LocalBuilder x = gen.DeclareLocal (typeof (int)); // int x
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 5); // // x = 5
gen.Emit (OpCodes.Stloc, x);
gen.MarkLabel (startLoop);
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 10); // Загрузить в стек вычислений 10
gen.Emit (OpCodes.Ldloc, x); // Загрузить в стек вычислений x
gen.Emit (OpCodes.Blt, endLoop); // if (x > 10) goto endLoop
gen.EmitWriteLine (x); // Console.WriteLine (x)
gen.Emit (OpCodes.Ldloc, x); // Загрузить в стек вычислений x
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 1); // Загрузить в стек вычислений 1
gen.Emit (OpCodes.Add); // Выполнить сложение
gen.Emit (OpCodes.Stloc, x); // Сохранить результат в x
gen.Emit (OpCodes.Br, startLoop); // Вернуться в начало цикла
gen.MarkLabel (endLoop);
gen.Emit (OpCodes.Ret);
```

Создание объектов и вызов методов экземпляра

Эквивалентом операции `new` в языке IL является код операции `Newobj`, который обращается к конструктору и загружает созданный объект в стек вычислений. Например, следующий код конструирует объект `StringBuilder`:

```
var dynMeth = new DynamicMethod ("Test", null, null, typeof (void));
ILGenerator gen = dynMeth.GetILGenerator();
ConstructorInfo ci = typeof (StringBuilder).GetConstructor (new Type[0]);
gen.Emit (OpCodes.Newobj, ci);
```

После загрузки объекта в стек вычислений можно применять код операции `Call` или `Callvirt` для вызова его методов экземпляра. Расширяя рассматриваемый пример, мы запросим свойство `MaxCapacity` объекта `StringBuilder` путем вызова метода доступа `get` свойства и затем выведем результат:

```

gen.Emit (OpCodes.Callvirt, typeof (StringBuilder)
           .GetProperty ("MaxCapacity").GetMethod());
gen.Emit (OpCodes.Call, typeof (Console).GetMethod ("WriteLine",
           new[] { typeof (int) } ));
gen.Emit (OpCodes.Ret);
dynMeth.Invoke (null, null); // 2147483647

```

Вот как эмулировать семантику вызовов C#:

- используйте код операции Call для обращения к статическим методам и методам экземпляра типов значений;
- применяйте код операции Callvirt для обращения к методам экземпляра ссылочных типов (независимо от того, объявлены они виртуальными или нет).

В данном примере мы использовали Callvirt на экземпляре StringBuilder, несмотря на то, что свойство MaxCapacity не является виртуальным. Это не приводит к ошибке, а просто выполняет невиртуальный вызов. Вызов методов экземпляра ссылочных типов с помощью Callvirt позволяет избежать риска возникновения противоположного условия: обращения к виртуальному методу посредством Call. (Риск вполне реален. Автор целевого метода может позже изменить его объявление.) Преимущество операции Callvirt также в том, что она обеспечивает проверку получателя на равенство null.



Вызов виртуального метода с помощью операции Call обходит семантику виртуальных вызовов и обращается к методу напрямую, что редко является желательным и на самом деле нарушает безопасность типов.

В следующем примере мы создаем объект StringBuilder, передавая конструктору два аргумента, добавляем к нему строку ", world!" и вызываем метод ToString на этом объекте:

```

// Мы будем вызывать: new StringBuilder ("Hello", 1000)
ConstructorInfo ci = typeof (StringBuilder).GetConstructor (
    new[] { typeof (string), typeof (int) } );
gen.Emit (OpCodes.Ldstr, "Hello"); // Загрузить в стек вычислений строку
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 1000); // Загрузить в стек вычислений целое число
gen.Emit (OpCodes.Newobj, ci); // Сконструировать объект StringBuilder
Type[] strT = { typeof (string) };
gen.Emit (OpCodes.Ldstr, ", world!");
gen.Emit (OpCodes.Call, typeof (StringBuilder).GetMethod ("Append", strT));
gen.Emit (OpCodes.Callvirt, typeof (object).GetMethod ("ToString"));
gen.Emit (OpCodes.Call, typeof (Console).GetMethod ("WriteLine", strT));
gen.Emit (OpCodes.Ret);
dynMeth.Invoke (null, null); // Hello, world!

```

Ради интереса мы вызвали метод GetMethod на typeof (object), после чего использовали операцию Callvirt для выполнения вызова виртуального ме-

тода на `ToString`. Тот же результат можно было бы получить, вызвав метод `ToString` на самом типе `StringBuilder`:

```
gen.Emit (OpCodes.Callvirt, typeof (StringBuilder).GetMethod ("ToString",
    new Type[0] ));
```

(При вызове методу `GetMethod` должен передаваться пустой массив `Type`, т.к. `StringBuilder` перегружает метод `ToString` с применением другой сигнатуры.)



Если бы метод `ToString` типа `object` вызывался невиртуальным образом:

```
gen.Emit (OpCodes.Call,
    typeof (object).GetMethod ("ToString"));
```

тогда результатом оказалась бы строка `System.Text.StringBuilder`. Другими словами, мы должны обойти версию `ToString`, переопределенную в классе `StringBuilder`, и вызвать версию данного метода из `object`.

Обработка исключений

Класс `ILGenerator` предлагает выделенные методы для обработки исключений. Скажем, приведенный ниже код C#:

```
try { throw new NotSupportedException(); }
catch (NotSupportedException ex) { Console.WriteLine (ex.Message); }
finally { Console.WriteLine ("Finally"); }
```

можно сгенерировать следующим образом:

```
MethodInfo getMessageProp = typeof (NotSupportedException)
    .GetProperty ("Message").GetGetMethod();
MethodInfo writeLineString = typeof (Console).GetMethod ("WriteLine",
    new[] { typeof (object) } );
gen.BeginExceptionBlock();
ConstructorInfo ci = typeof (NotSupportedException).GetConstructor (
    new Type[0] );
gen.Emit (OpCodes.Newobj, ci);
gen.Emit (OpCodes.Throw);
gen.BeginCatchBlock (typeof (NotSupportedException));
gen.Emit (OpCodes.Callvirt, getMessageProp);
gen.Emit (OpCodes.Call, writeLineString);
gen.BeginFinallyBlock();
gen.EmitWriteLine ("Finally");
gen.EndExceptionBlock();
```

Как и в языке C#, можно иметь много блоков `catch`. Для повторной генерации исключения понадобится выпустить код операции `Rethrow`.



Класс `ILGenerator` предоставляет вспомогательный метод по имени `ThrowException`. Однако он содержит ошибку, которая не дает возможности его использовать с экземпляром `DynamicMethod`. Упомянутый метод работает только с экземпляром `MethodBuilder` (как будет показано в следующем разделе).

Выпуск сборок и типов

Несмотря на удобство класса `DynamicMethod`, он может генерировать только методы. Если необходимо выпускать любые другие конструкции (или целый тип), то придется применять полный “тяжеловесный” API-интерфейс. Это означает динамическое построение сборки и модуля. Тем не менее, сборка не обязательно должна находиться на диске (на самом деле она и не может, потому что .NET 5+ и .NET Core не разрешают сохранять сгенерированные сборки на диске).

Давайте предположим, что требуется динамически построить тип. Поскольку тип должен находиться в модуле внутри сборки, необходимо сначала создать сборку и модуль, чтобы создание типа стало возможным. За такую работу отвечают классы `AssemblyBuilder` и `ModuleBuilder`:

```
AssemblyName fname = new AssemblyName ("MyDynamicAssembly");  
AssemblyBuilder assemBuilder =  
    AssemblyBuilder.DefineDynamicAssembly (fname, AssemblyBuilderAccess.Run);  
ModuleBuilder modBuilder = assemBuilder.DefineDynamicModule ("DynModule");
```



Добавить тип в существующую сборку не удастся, т.к. после создания сборка становится неизменяемой.

Динамические сборки не подвергаются обработке сборщиком мусора и остаются в памяти вплоть до окончания процесса, если только при их определении не был указан флаг `AssemblyBuilder Access.RunAndCollect`. К сборкам, которые могут быть обработаны сборщиком мусора, применяются различные ограничения (<http://albahari.com/dynamiccollect>).

Получив модуль, в котором способен находиться тип, для создания типа можно использовать класс `TypeBuilder`. Вот как определить класс по имени `Widget`:

```
TypeBuilder tb = modBuilder.DefineType ("Widget", TypeAttributes.Public);
```

Перечисление флагов `TypeAttributes` поддерживает модификаторы типов CLR, которые можно увидеть после дизассемблирования типа с помощью `ildasm`. Помимо флагов видимости членов это перечисление включает такие модификаторы типов, как `Abstract` и `Sealed`, а также `Interface` для определения интерфейса .NET. Кроме того, имеется флаг `Serializable`, который эквивалентен применению атрибута `[Serializable]` в C#, и `Explicit`, эквивалентный применению атрибута `[StructLayout(LayoutKind.Explicit)]`. Мы покажем, как работать с другими разновидностями атрибутов, в разделе “Присоединение атрибутов” далее в главе.



Метод `DefineType` также принимает необязательный базовый тип:

- для определения структуры укажите базовый тип `System.ValueType`;
- для определения делегата укажите базовый тип `System.MulticastDelegate`;

- для реализации интерфейса используйте конструктор, который принимает массив типов интерфейсов;
- для определения интерфейса укажите комбинацию `TypeAttributes.Interface | TypeAttributes.Abstract`.

Определение типа делегата требует выполнения нескольких дополнительных шагов. Джоэль Побар объясняет, как это сделать, в своей статье “Creating delegate types via `Reflection.Emit`” (“Создание типов делегатов через `Reflection.Emit`”), доступной по ссылке <http://www.albahari.com/joelpob>.

Теперь внутри типа можно создавать члены:

```
MethodBuilder methBuilder = tb.DefineMethod ("SayHello",
                                             MethodAttributes.Public,
                                             null, null);

ILGenerator gen = methBuilder.GetILGenerator();
gen.EmitWriteLine ("Hello world");
gen.Emit (OpCodes.Ret);
```

Для создания типа все готово и ниже представлено завершение его определения:

```
Type t = tb.CreateType();
```

После того, как тип создан, с помощью обычной рефлексии его можно инспектировать и производить позднее связывание:

```
object o = Activator.CreateInstance (t);
t.GetMethod ("SayHello").Invoke (o, null); // Hello world
```

Объектная модель `Reflection.Emit`

На рис. 18.2 показаны основные типы в пространстве имен `System.Reflection.Emit`. Каждый тип описывает конструкцию CLR и основан на эквиваленте из пространства `System.Reflection`. В результате при построении какого-то типа на месте обычных конструкций можно применять генерированные конструкции. Например, ранее мы вызывали метод `Console.WriteLine` следующим образом:

```
MethodInfo writeLine = typeof (Console).GetMethod ("WriteLine",
                                                 new Type[] { typeof (string) });
gen.Emit (OpCodes.Call, writeLine);
```

Мы могли бы столь же легко вызвать динамически генерированный метод, обратившись к методу `gen.Emit` и передав ему объект `MethodInfo`, а не `MethodInfo`. Это очень важно — иначе не было бы возможности написать один динамический метод, который вызывает другой метод в том же типе.

Вспомните, что по завершении наполнения объекта `TypeBuilder` должен быть вызван его метод `CreateType`. Вызов `CreateType` запечатывает объект `TypeBuilder` и все его члены — так что ничего больше не может быть добавлено либо изменено — и возвращает обратно реальный тип `Type`, экземпляры которого можно создавать.

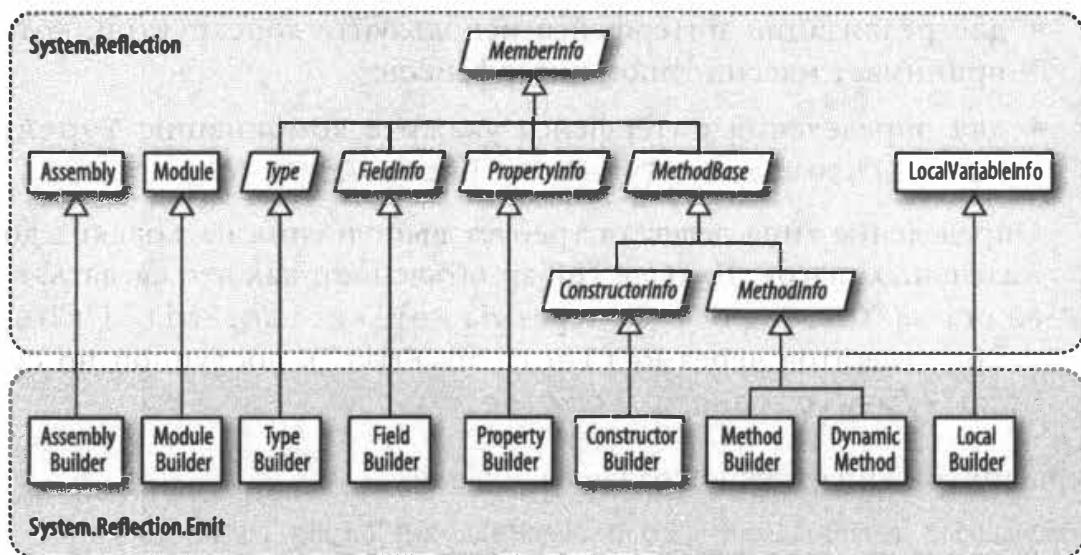


Рис. 18.2. Пространство имен System.Reflection.Emit

Перед вызовом метода `CreateType` объект `TypeBuilder` и его члены находятся в “несозданном” состоянии. Существуют значительные ограничения относительно того, что можно делать с несозданными конструкциями. В частности, нельзя вызывать члены, возвращающие объекты `MemberInfo`, такие как `GetMembers`, `GetMethod` или `GetProperty` — это приведет к генерации исключения. Чтобы сослаться на члены несозданного типа, придется использовать исходные выпуски:

```

TypeBuilder tb = ...

MethodBuilder method1 = tb.DefineMethod ("Method1", ...);
MethodBuilder method2 = tb.DefineMethod ("Method2", ...);

ILGenerator gen1 = method1.GetILGenerator();

// Предположим, что method1 должен вызывать method2:
gen1.Emit (OpCodes.Call, method2);                                // Правильно
gen1.Emit (OpCodes.Call, tb.GetMethod ("Method2"));                // Неправильно
    
```

После вызова метода `CreateType` можно проводить рефлексию и активизацию не только возвращенного объекта `Type`, но также исходного объекта `TypeBuilder`. Фактически `TypeBuilder` превращается в посредника для реального `Type`. Мы покажем, почему такая возможность важна, в разделе “Сложности, связанные с генерацией” далее в главе.

Выпуск членов типа

Во всех примерах настоящего раздела предполагается, что объект типа `TypeBuilder` по имени `tb` был создан следующим образом:

```

AssemblyName fname = new AssemblyName ("MyEmissions");
AssemblyBuilder assemBuilder = AssemblyBuilder.DefineDynamicAssembly (
    fname, AssemblyBuilderAccess.Run);

ModuleBuilder modBuilder = assemBuilder.DefineDynamicModule ("MainModule");
TypeBuilder tb = modBuilder.DefineType ("Widget", TypeAttributes.Public);
    
```

Выпуск методов

При вызове метода `DefineMethod` можно указывать возвращаемый тип и типы параметров в той же самой манере, как и при создании объекта `DynamicMethod`. Например, следующий метод:

```
public static double SquareRoot (double value) => Math.Sqrt (value);
```

может быть сгенерирован так:

```
MethodBuilder mb = tb.DefineMethod ("SquareRoot",
    MethodAttributes.Static | MethodAttributes.Public,
    CallingConventions.Standard,
    typeof (double), // Возвращаемый тип
    new[] { typeof (double) }  ); // Типы параметров

mb.DefineParameter (1, ParameterAttributes.None, "value"); // Назначить имя

ILGenerator gen = mb.GetILGenerator();
gen.Emit (OpCodes.Ldarg_0); // Загрузить первый аргумент
gen.Emit (OpCodes.Call, typeof(Math).GetMethod ("Sqrt"));
gen.Emit (OpCodes.Ret);

Type realType = tb.CreateType();
double x = (double) tb.GetMethod ("SquareRoot").Invoke (null,
    new object[] { 10.0 });
Console.WriteLine (x); // 3.16227766016838
```

Вызов метода `DefineParameter` является необязательным и обычно делается для назначения параметру имени. Число 1 ссылается на первый параметр (0 соответствует возвращаемому значению). Если `DefineParameter` не вызывается, тогда параметры неявно именуются как `_p1`, `_p2` и т.д. Назначение имен имеет смысл, если сборка будет записываться на диск; оно делает методы дружественными к потребителям.



Метод `DefineParameter` возвращает объект `ParameterBuilder`, на котором можно вызывать метод `SetCustomAttribute` для присоединения атрибутов (см. раздел “Присоединение атрибутов” далее в главе).

Для выпуска параметров, передаваемых по ссылке, таких как параметр в следующем методе C#:

```
public static void SquareRoot (ref double value)
    => value = Math.Sqrt (value);
```

необходимо вызвать метод `MakeByRefType` на типе параметра (или типах):

```
MethodBuilder mb = tb.DefineMethod ("SquareRoot",
    MethodAttributes.Static | MethodAttributes.Public,
    CallingConventions.Standard,
    null,
    new Type[] { typeof (double).MakeByRefType () }  );

mb.DefineParameter (1, ParameterAttributes.None, "value");

ILGenerator gen = mb.GetILGenerator();
```

```
gen.Emit (OpCodes.Ldarg_0);
gen.Emit (OpCodes.Ldarg_0);
gen.Emit (OpCodes.Ldind_R8);
gen.Emit (OpCodes.Call, typeof (Math).GetMethod ("Sqrt"));
gen.Emit (OpCodes.Stind_R8);
gen.Emit (OpCodes.Ret);

Type realType = tb.CreateType ();
object[] args = { 10.0 };
tb.GetMethod ("SquareRoot").Invoke (null, args);
Console.WriteLine (args[0]); // 3.16227766016838
```

Здесь коды операций были скопированы из дизассемблированного метода C#. Обратите внимание на разницу в семантике для доступа к параметрам, передаваемым по ссылке: коды операций Ldind и Stind означают соответственно “загрузить косвенно” (load indirectly) и “сохранить косвенно” (store indirectly). Сuffix R8 означает 8-байтовое число с плавающей точкой. Процесс выпуска параметров out идентичен за исключением того, что метод DefineParameter вызывается следующим образом:

```
mb.DefineParameter (1, ParameterAttributes.Out, "value");
```

Генерация методов экземпляра

Чтобы сгенерировать метод экземпляра, при вызове DefineMethod понадобится указать флаг MethodAttributes.Instance:

```
MethodBuilder mb = tb.DefineMethod ("SquareRoot",
    MethodAttributes.Instance | MethodAttributes.Public
    ...
```

В случае методов экземпляра нулевым аргументом неявно является `this`; нумерация остальных аргументов начинается с 1. Таким образом, `Ldarg_0` загружает в стек вычислений `this`, а `Ldarg_1` загружает первый реальный аргумент метода.

Переопределение методов

Переопределять виртуальный метод в базовом классе легко: нужно просто определить метод с идентичным именем, сигнатурой и возвращаемым типом, указав при вызове DefineMethod флаг MethodAttributes.Virtual. То же самое применимо при реализации методов интерфейса.

В классе TypeBuilder также доступен метод по имени DefineMethod Override, который переопределяет метод с другим именем. Использовать его имеет смысл только с явной реализацией интерфейса; в остальных сценариях следует применять метод DefineMethod.

Флаг HideBySig

В случае построения подкласса другого типа при определении методов почти всегда полезно указывать флаг MethodAttributes.HideBySig. Флаг HideBySig обеспечивает использование семантики скрытия методов в стиле C#, которая заключается в том, что метод базового класса скрывается только в случае, если в подтипе определен метод с такой же сигнатурой. Без HideBySig скрытие методов основывается только на имени, поэтому метод `Foo(string)` в подтипе скроет метод `Foo()` в базовом типе, хотя подобное обычно нежелательно.

Выпуск полей и свойств

Для создания поля необходимо вызвать метод `DefineField` на объекте `TypeBuilder`, указав ему желаемое имя поля, тип и видимость. Следующий код создает закрытое целочисленное поле по имени `length`:

```
FieldBuilder field = tb.DefineField ("length", typeof (int),  
                                     FieldAttributes.Private);
```

Создание свойства или индексатора требует выполнения нескольких дополнительных шагов. Первый из них — вызов метода `DefineProperty` на объекте `TypeBuilder` с передачей ему имени и типа свойства:

```
PropertyBuilder prop = tb.DefineProperty (  
    "Text", // Имя свойства  
    PropertyAttributes.None,  
    typeof (string), // Тип свойства  
    new Type[0] // Типы индексатора  
) ;
```

(При создании индексатора последний аргумент представляет собой массив типов индексатора.) Обратите внимание, что мы не указываем видимость свойства: это делается в индивидуальном порядке на основе методов аксессора.

Следующий шаг заключается в написании методов `get` и `set`. По соглашению их имена имеют префикс `get_` или `set_`. Затем готовые методы можно присоединить к свойству с помощью вызова методов `SetGetMethod` и `SetSetMethod` на объекте `PropertyBuilder`.

В качестве полного примера мы возьмем показанное ниже объявление поля и свойства:

```
string _text;  
public string Text  
{  
    get      => _text;  
    internal set => _text = value;  
}
```

и сгенерируем его динамически:

```
FieldBuilder field = tb.DefineField ("_text", typeof (string),  
                                     FieldAttributes.Private);  
PropertyBuilder prop = tb.DefineProperty (  
    "Text", // Имя свойства  
    PropertyAttributes.None,  
    typeof (string), // Тип свойства  
    new Type[0]); // Типы индексатора  
MethodBuilder getter = tb.DefineMethod (  
    "get_Text", // Имя метода  
    MethodAttributes.Public | MethodAttributes.SpecialName,  
    typeof (string), // Возвращаемый тип  
    new Type[0]); // Типы параметров  
ILGenerator getGen = getter.GetILGenerator();  
getGen.Emit (OpCodes.Ldarg_0); // Загрузить в стек вычислений this  
getGen.Emit (OpCodes.Ldfld, field); // Загрузить в стек вычислений  
// значение свойства
```

```

getGen.Emit (OpCodes.Ret);           // Выполнить возврат

MethodBuilder setter = tb.DefineMethod (
    "set_Text",
    MethodAttributes.Assembly | MethodAttributes.SpecialName,
    null,                                // Возвращаемый тип
    new Type[] { typeof (string) } );      // Типы параметров

ILGenerator setGen = setter.GetILGenerator();
setGen.Emit (OpCodes.Ldarg_0);          // Загрузить в стек вычислений this
setGen.Emit (OpCodes.Ldarg_1);          // Загрузить в стек вычислений
                                         // второй аргумент, т.е. значение
setGen.Emit (OpCodes.Stfld, field);     // Сохранить значение в поле
setGen.Emit (OpCodes.Ret);             // Выполнить возврат

prop.SetGetMethod (getter);            // Связать метод get и свойство
prop.SetSetMethod (setter);           // Связать метод set и свойство

```

Теперь свойство можно протестировать:

```

Type t = tb.CreateType();
object o = Activator.CreateInstance (t);
t.GetProperty ("Text").SetValue (o, "Good emissions!", new object[0]);
string text = (string) t.GetProperty ("Text").GetValue (o, null);
Console.WriteLine (text);              // Good emissions!

```

Обратите внимание, что в определении MethodAttributes для аксессора был включен флаг SpecialName. Он инструктирует компилятор о том, что прямое связывание с такими методами при статической ссылке на сборку не разрешено. Это также гарантирует соответствующую поддержку аксессоров инструментами рефлексии и средством IntelliSense в Visual Studio.



Выпускать события можно аналогично, вызывая метод DefineEvent на объекте TypeBuilder. Затем можно написать явные методы аксессора и присоединить их к объекту EventBuilder путем вызова методов SetAddOnMethod и SetRemoveOnMethod.

Выпуск конструкторов

Чтобы определить собственные конструкторы, понадобится вызвать метод DefineConstructor на объекте TypeBuilder. Поступать так не обязательно — стандартный конструктор без параметров будет предоставлен автоматически, если не было явно определено ни одного конструктора. В случае подтипа стандартный конструктор вызывает конструктор базового класса — точно как в C#. Определение одного или большего числа конструкторов приводит к устраниению стандартного конструктора.

Конструктор является удобным местом для инициализации полей. На самом деле он представляет собой единственное такое место: инициализаторы полей C# не имеют специальной поддержки в CLR — это просто синтаксическое сокращение для присваивания значений полям в конструкторе.

Таким образом, для воспроизведения следующего кода:

```
class Widget
{
    int _capacity = 4000;
}
```

потребуется определить конструктор, как показано ниже:

```
FieldBuilder field = tb.DefineField ("_capacity", typeof (int),
                                      FieldAttributes.Private);
ConstructorBuilder c = tb.DefineConstructor (
    MethodAttributes.Public,
    CallingConventions.Standard,
    new Type[0]);                                // Параметры конструктора
ILGenerator gen = c.GetILGenerator();
gen.Emit (OpCodes.Ldarg_0);          // Загрузить в стек вычислений this
gen.Emit (OpCodes.Ldc_I4, 4000);      // Загрузить в стек вычислений 4000
gen.Emit (OpCodes.Stfld, field);     // Сохранить это в поле field
gen.Emit (OpCodes.Ret);
```

Вызов конструкторов базовых классов

При построении подкласса другого типа конструктор, который был только что написан, *обойдет конструктор базового класса*. Ситуация отличается от C#, где конструктор базового класса вызывается всегда, прямо или косвенно. Например, имея приведенный далее код:

```
class A { public A() { Console.WriteLine ("A"); } }
class B : A { public B() {} }
```

компилятор в действительности будет транслировать вторую строку следующим образом:

```
class B : A { public B() : base() {} }
```

Однако это не так, когда генерируется код IL: если нужно, чтобы конструктор базового класса был выполнен, то он должен вызываться явно (что происходит почти всегда). Предполагая, что базовый класс имеет имя A, вот как нужно поступить:

```
gen.Emit (OpCodes.Ldarg_0);
ConstructorInfo baseConstr = typeof (A).GetConstructor (new Type[0]);
gen.Emit (OpCodes.Call, baseConstr);
```

Конструкторы с аргументами вызываются точно так же, как обычные методы.

Присоединение атрибутов

Присоединить специальные атрибуты к динамической конструкции можно путем вызова метода `SetCustomAttribute` с передачей ему объекта `CustomAttributeBuilder`. Например, пусть необходимо присоединить к полю или свойству следующее объявление атрибута:

```
[XmlElement ("FirstName", Namespace="http://test/", Order=3)]
```

Объявление полагается на конструктор класса `XmlElementAttribute`, который принимает одиночную строку. Для работы с объектом `CustomAttributeBuilder` потребуется извлечь как указанный конструктор, так и два дополнительных свойства, подлежащие установке (`Namespace` и `Order`):

```
Type attType = typeof (XmlElementAttribute);
ConstructorInfo attConstructor = attType.GetConstructor (
    new Type[] { typeof (string) } );
var att = new CustomAttributeBuilder (
    attConstructor, // Конструктор
    new object[] { "FirstName" }, // Аргументы конструктора
    new PropertyInfo[]
    {
        attType.GetProperty ("Namespace"), // Свойства
        attType.GetProperty ("Order")
    },
    new object[] { "http://test/", 3 } // Значения свойств
);
myFieldBuilder.SetCustomAttribute (att);
// или propBuilder.SetCustomAttribute (att);
// или typeBuilder.SetCustomAttribute (att); и т.д.
```

Выпуск обобщенных методов и типов

Во всех примерах раздела предполагается, что объект `modBuilder` был создан следующим образом:

```
AssemblyName fname = new AssemblyName ("MyEmissions");
AssemblyBuilder assemBuilder = AssemblyBuilder.DefineDynamicAssembly (
    fname, AssemblyBuilderAccess.Run);
ModuleBuilder modBuilder = assemBuilder.DefineDynamicModule ("MainModule");
```

Определение обобщенных методов

Для выпуска обобщенного метода выполните перечисленные шаги.

1. Вызовите метод `DefineGenericParameters` на объекте `MethodBuilder`, чтобы получить массив объектов `GenericTypeParameterBuilder`.
2. Вызовите метод `SetSignature` на объекте `MethodBuilder` с применением этих параметров обобщенных типов (т.е. массива объектов `GenericTypeParameterBuilder`).
3. При желании назначьте параметрам другие имена.

Например, следующий обобщенный метод:

```
public static T Echo<T> (T value)
{
    return value;
}
```

можно было бы сгенерировать так:

```

TypeBuilder tb = modBuilder.DefineType ("Widget", TypeAttributes.Public);
MethodBuilder mb = tb.DefineMethod ("Echo", MethodAttributes.Public |
                                    MethodAttributes.Static);
GenericTypeParameterBuilder[] genericParams
    = mb.DefineGenericParameters ("T");
mb.SetSignature (genericParams[0],           // Возвращаемый тип
                null, null,
                genericParams,          // Типы параметров
                null, null);

mb.DefineParameter (1, ParameterAttributes.None, "value"); // Необязательно
ILGenerator gen = mb.GetILGenerator();
gen.Emit (OpCodes.Ldarg_0);
gen.Emit (OpCodes.Ret);

```

Метод `DefineGenericParameters` принимает любое количество строковых аргументов — они соответствуют именам желаемых обобщенных типов. В данном примере необходим только один обобщенный тип по имени `T`. Класс `GenericTypeParameterBuilder` основан на `System.Type`, поэтому он может использоваться на месте `TypeBuilder` при выпуске кодов операций.

Класс `GenericTypeParameterBuilder` также позволяет указывать ограничение базового типа:

```
genericParams[0].SetBaseTypeConstraint (typeof (Foo));
```

и ограничения интерфейсов:

```
genericParams[0].SetInterfaceConstraints (typeof (IComparable));
```

Чтобы воспроизвести приведенный ниже код:

```
public static T Echo<T> (T value) where T : IComparable<T>
```

потребуется записать так:

```
genericParams[0].SetInterfaceConstraints (
    typeof (IComparable<>).MakeGenericType (genericParams[0]));
```

Для других видов ограничений нужно вызывать метод `SetGenericParameterAttributes`. Он принимает член перечисления `GenericParameterAttributes`, которое содержит следующие значения:

- `DefaultConstructorConstraint`
- `NotNullableValueTypeConstraint`
- `ReferenceTypeConstraint`
- `Covariant`
- `Contravariant`

Последние два значения эквивалентны применению к параметрам типа модификаторов `out` и `in`.

Определение обобщенных типов

Обобщенные типы определяются в похожей манере. Отличие заключается в том, что метод `DefineGenericParameters` вызывается на объекте `TypeBuilder`, а не `MethodBuilder`. Таким образом, для воспроизведения следующего определения:

```
public class Widget<T>
{
    public T Value;
}
```

потребуется написать такой код:

```
TypeBuilder tb = modBuilder.DefineType ("Widget", TypeAttributes.Public);
GenericTypeParameterBuilder[] genericParams
    = tb.DefineGenericParameters ("T");
tb.DefineField ("Value", genericParams[0], FieldAttributes.Public);
```

Как и в случае методов, можно добавлять обобщенные ограничения.

Сложности, связанные с генерацией

Во всех примерах данного раздела предполагается, что объект `modBuilder` создавался, как было показано в предшествующих разделах.

Несозданные закрытые обобщения

Пусть необходимо сгенерировать метод, который использует закрытый обобщенный тип:

```
public class Widget
{
    public static void Test() { var list = new List<int>(); }
```

Процесс довольно прямолинеен:

```
TypeBuilder tb = modBuilder.DefineType ("Widget", TypeAttributes.Public);
MethodBuilder mb = tb.DefineMethod ("Test", MethodAttributes.Public |
    MethodAttributes.Static);
ILGenerator gen = mb.GetILGenerator();
Type variableType = typeof (List<int>);
ConstructorInfo ci = variableType.GetConstructor (new Type[0]);
LocalBuilder listVar = gen.DeclareLocal (variableType);
gen.Emit (OpCodes.Newobj, ci);
gen.Emit (OpCodes.Stloc, listVar);
gen.Emit (OpCodes.Ret);
```

Теперь предположим, что вместо списка целых чисел требуется список объектов `Widget`:

```
public class Widget
{
    public static void Test() { var list = new List<Widget>(); }
```

Теоретически модификация проста — нужно лишь заменить строку:

```
Type variableType = typeof (List<int>);
```

строкой:

```
Type variableType = typeof (List<>).MakeGenericType (tb);
```

К сожалению, при последующем вызове метода `GetConstructor` генерируется исключение `NotSupportedException`. Проблема в том, что вызывать `GetConstructor` на обобщенном типе, закрытом с помощью несозданного построителя типа, не допускается. То же самое касается методов `GetField` и `GetMethod`.

Решение нельзя считать интуитивно понятным. В классе `TypeBuilder` присутствуют три статических метода:

```
public static ConstructorInfo GetConstructor (Type, ConstructorInfo);
public static FieldInfo GetField (Type, FieldInfo);
public static MethodInfo GetMethod (Type, MethodInfo);
```

Хотя они таковыми не выглядят, методы предназначены специально для получения членов обобщенных типов, закрытых посредством несозданных построителей типов! Первый параметр представляет собой закрытый обобщенный тип, а второй параметр — желаемый член из *несвязанного* обобщенного типа. Ниже приведена скорректированная версия рассматриваемого примера:

```
MethodBuilder mb = tb.DefineMethod ("Test", MethodAttributes.Public | MethodAttributes.Static);
ILGenerator gen = mb.GetILGenerator();
Type variableType = typeof (List<>).MakeGenericType (tb);
ConstructorInfo unbound = typeof (List<>).GetConstructor (new Type[0]);
ConstructorInfo ci = TypeBuilder.GetConstructor (variableType, unbound);
LocalBuilder listVar = gen.DeclareLocal (variableType);
gen.Emit (OpCodes.Newobj, ci);
gen.Emit (OpCodes.Stloc, listVar);
gen.Emit (OpCodes.Ret);
```

Циклические зависимости

Предположим, что необходимо построить два типа, которые ссылаются друг на друга, например:

```
class A { public B Bee; }
class B { public A Aye; }
```

Сгенерировать это динамически можно следующим образом:

```
var publicAtt = FieldAttributes.Public;
TypeBuilder aBuilder = modBuilder.DefineType ("A");
TypeBuilder bBuilder = modBuilder.DefineType ("B");
FieldBuilder bee = aBuilder.DefineField ("Bee", bBuilder, publicAtt);
FieldBuilder aye = bBuilder.DefineField ("Aye", aBuilder, publicAtt);
Type realA = aBuilder.CreateType();
Type realB = bBuilder.CreateType();
```

Обратите внимание, что мы не вызывали метод `CreateType` на объекте `aBuilder` или `bBuilder`, пока оба объекта не были заполнены. Здесь применяется следующий принцип: сначала все связывается, а затем производится вызов метода `CreateType` на каждом построителе типа.

Интересно отметить, что тип `realA` является допустимым, но *дисфункциональным* до тех пор, пока не будет вызван метод `CreateType` на `bBuilder`. (Если вы начнете использовать объект `aBuilder` до такого момента, то при попытке доступа к полю `Bee` генерируется исключение.)

Вас может заинтересовать, каким образом `bBuilder` узнает о необходимости “исправления” типа `realA` после создания `realB`? На самом деле он вовсе не знает об этом: тип `realA` может исправить себя *самостоятельно* при следующем его применении. Исправление возможно из-за того, что после вызова метода `CreateType` объект `TypeBuilder` превращается в посредника для действительного типа времени выполнения. Таким образом, благодаря своим ссылкам на `bBuilder` тип `realA` может легко получить метаданные, требующиеся для обновления.

Описанная система работает, когда построитель типа запрашивает простую информацию о несозданном типе — информацию, которая может быть *предварительно определена* — такую как тип, член и объектные ссылки. При создании `realA` построителю типа не нужно знать, скажем, сколько байтов памяти будет в итоге занимать `realB`. И это вполне нормально, т.к. тип `realB` пока еще не создан! Но теперь представьте, что тип `realB` был структурой. Окончательный размер `realB` теперь становится критически важной информацией при создании типа `realA`.

Если отношение между типами не является циклическим, например:

```
struct A { public B Bee; }
struct B { }
```

то задачу можно решить, сначала создав структуру `B`, а затем структуру `A`. Но взгляните на следующие определения:

```
struct A { public B Bee; }
struct B { public A Aye; }
```

Мы даже не будем пытаться выпустить такой код, поскольку определение двух структур, содержащих друг друга, лишено смысла (компилятор C# генерирует ошибку на этапе компиляции). Но показанная далее вариация как законна, так и полезна:

```
public struct S<T> { ... }           // Структура S может быть пустой
                                         // и эта демонстрация будет работать.

class A { S<B> Bee; }
class B { S<A> Aye; }
```

При создании класса `A` построитель типа теперь должен располагать знанием отпечатка памяти класса `B` и наоборот. В целях иллюстрации предположим, что структура `S` определена статически. Код для выпуска классов `A` и `B` мог бы выглядеть так:

```

var pub = FieldAttributes.Public;
TypeBuilder aBuilder = modBuilder.DefineType ("A");
TypeBuilder bBuilder = modBuilder.DefineType ("B");
aBuilder.DefineField ("Bee", typeof(S<>).MakeGenericType (bBuilder), pub);
bBuilder.DefineField ("Aye", typeof(S<>).MakeGenericType (aBuilder), pub);
Type realA = aBuilder.CreateType(); // Ошибка: не удается загрузить тип B
Type realB = bBuilder.CreateType();

```

Метод `CreateType` теперь генерирует исключение `TypeLoadException` независимо от порядка выполнения:

- если первым идет вызов `aBuilder.CreateType`, то исключение сообщает о невозможности загрузки типа B;
- если первым идет вызов `bBuilder.CreateType`, то исключение сообщает о невозможности загрузки типа A.

Чтобы решить проблему, вы должны позволить построителю типа создать `realB` частично через создание `realA`. Это делается за счет обработки события `TypeResolve` в классе `AppDomain` непосредственно перед вызовом метода `CreateType`. Таким образом, в рассматриваемом примере мы заменяем последние две строки следующим кодом:

```

TypeBuilder[] uncreatedTypes = { aBuilder, bBuilder };
ResolveEventHandler handler = delegate (object o, ResolveEventArgs args)
{
    var type = uncreatedTypes.FirstOrDefault (t => t.FullName == args.Name);
    return type == null ? null : type.CreateType().Assembly;
};

AppDomain.CurrentDomain.TypeResolve += handler;
Type realA = aBuilder.CreateType();
Type realB = bBuilder.CreateType();
AppDomain.CurrentDomain.TypeResolve -= handler;

```

Событие `TypeResolve` инициируется во время вызова метода `aBuilder.CreateType`, в точке, где нужно, чтобы вы вызвали `CreateType` на `bBuilder`.



Обработка события `TypeResolve`, как в представленном примере, также необходима при определении вложенного типа, когда вложенный и родительский типы ссылаются друг на друга.

Синтаксический разбор IL

Для получения информации о содержимом существующего метода понадобится вызвать метод `GetMethodBody` на объекте `MethodBase`. Вызов возвращает объект `MethodBody`, который имеет свойства для инспектирования локальных переменных метода, конструкций обработки исключений, размера стека и низкоуровневого кода IL. Очень похоже на противоположность метода `Reflection.Emit`!

Инспектирование низкоуровневого кода IL метода может быть полезно при профилировании кода. Простой сценарий использования мог бы предусматривать выяснение, какие методы в сборке изменились в результате ее обновления.

Для демонстрации синтаксического разбора IL мы напишем приложение, которое дизассемблирует код IL, работая в стиле iildasm. Приложение подобного рода могло бы служить отправной точкой для построения инструмента анализа кода или дизассемблера языка более высокого уровня.



Вспомните, что в API-интерфейсе рефлексии все функциональные конструкции C# либо представлены подтипом MethodBase, либо (в случае свойств, событий и индексаторов) имеют присоединенные к ним объекты MethodBase.

Написание дизассемблера

Ниже приведен пример вывода, который будет производить наш дизассемблер:

```
IL_00EB: ldfld      Disassembler._pos
IL_00F0: ldloc.2
IL_00F1: add
IL_00F2: ldelema    System.Byte
IL_00F7: ldstr      "Hello world"
IL_00FC: call       System.Byte.ToString
IL_0101: ldstr      " "
IL_0106: call       System.String.Concat
```

Чтобы получить такой вывод, потребуется провести синтаксический разбор двоичных лексем, из которых сформирован код IL. Первый шаг заключается в вызове метода GetILAsByteArray на объекте MethodBody для получения кода IL в виде байтового массива. Для упрощения оставшейся работы мы реализуем решение такой задачи в форме класса:

```
public class Disassembler
{
    public static string Disassemble (MethodBase method)
        => new Disassembler (method).Dis();
    StringBuilder _output; // Результат, который будет постоянно дополняться
    Module _module;       // Это пригодится в дальнейшем
    byte[] _il;           // Низкоуровневый байтовый код
    int _pos;              // Позиция внутри байтового кода
    Disassembler (MethodBase method)
    {
        _module = method.DeclaringType.Module;
        _il = method.GetMethodBody ().GetILAsByteArray ();
    }
    string Dis()
    {
        _output = new StringBuilder ();
        while (_pos < _il.Length) DisassembleNextInstruction ();
        return _output.ToString ();
    }
}
```

Статический метод Disassemble будет единственным открытым членом в данном классе. Все другие члены будут закрытыми по отношению к процессу дизассемблирования. Метод Dis содержит “главный” цикл, в котором мы обрабатываем каждую инструкцию.

Имея такой скелет, остается лишь написать метод DisassembleNextInstruction. Но перед тем как делать это, полезно загрузить все коды операций в статический словарь, чтобы к ним можно было обращаться по их 8- или 16-битным значениям. Простейший способ достичь такой цели — воспользоваться рефлексией для извлечения всех статических полей типа OpCode из класса OpCodes:

```
static Dictionary<short, OpCode> _opcodes = new Dictionary<short, OpCode>();
static Disassembler()
{
    Dictionary<short, OpCode> opcodes = new Dictionary<short, OpCode>();
    foreach (FieldInfo fi in typeof(OpCodes).GetFields
        (BindingFlags.Public | BindingFlags.Static))
        if (typeof(OpCode).IsAssignableFrom(fi.FieldType))
    {
        OpCode code = (OpCode) fi.GetValue(null); // Получить значение поля
        if (code.OpCodeType != OpCodeType.Nternal)
            _opcodes.Add(code.Value, code);
    }
}
```

Мы поместили код в статический конструктор, так что он будет выполняться только один раз.

Теперь можно заняться реализацией метода DisassembleNextInstruction. Каждая инструкция IL состоит из однобайтового или двухбайтового кода операции, за которым следует operand длиной 0, 1, 2, 4 или 8 байтов. (Исключением являются коды операций встроенных переключателей, за которыми следует переменное количество operandов.) Итак, мы читаем код операции, далее operand и затем выводим результат:

```
void DisassembleNextInstruction()
{
    int opStart = _pos;
    OpCode code = ReadOpCode();
    string operand = ReadOperand(code);
    _output.AppendFormat("IL_{0:X4}: {1,-12} {2}",
        opStart, code.Name, operand);
    _output.AppendLine();
}
```

Для чтения кода операции мы продвигаемся вперед на один байт и выясняем, является ли он допустимой инструкцией. Если нет, тогда мы продвигаемся вперед еще на один байт и проверяем, существует ли двухбайтовая инструкция:

```
OpCode ReadOpCode()
{
    byte byteCode = _il[_pos++];
    if (_opcodes.ContainsKey(byteCode)) return _opcodes[byteCode];
```

```

if (_pos == _il.Length) throw new Exception ("Unexpected end of IL");
// Неожиданный конец кода IL

short shortCode = (short) (byteCode * 256 + _il [_pos++]);
if (!_opcodes.ContainsKey (shortCode))
    throw new Exception ("Cannot find opcode " + shortCode);
return _opcodes [shortCode];
}

```

Чтобы прочитать операнд, сначала потребуется выяснить его длину. Это можно сделать на основе типа операнда. Поскольку большинство из них имеют 4 байта в длину, отклонения можно довольно легко отфильтровать в условной конструкции.

Следующий шаг заключается в вызове метода `FormatOperand`, который попытается сформатировать операнд:

```

string ReadOperand (OpCode c)
{
    int operandLength =
        c.OperandType == OperandType.InlineNone
            ? 0 :
        c.OperandType == OperandType.ShortInlineBrTarget ||
        c.OperandType == OperandType.ShortInlineI ||
        c.OperandType == OperandType.ShortInlineVar
            ? 1 :
        c.OperandType == OperandType.InlineVar
            ? 2 :
        c.OperandType == OperandType.InlineI8 ||
        c.OperandType == OperandType.InlineR
            ? 8 :
        c.OperandType == OperandType.InlineSwitch
            ? 4 * (BitConverter.ToInt32 (_il, _pos) + 1) :
            4; // Все остальные имеют длину 4 байта

    if (_pos + operandLength > _il.Length)
        throw new Exception ("Unexpected end of IL");
        // Неожиданный конец кода IL

    string result = FormatOperand (c, operandLength);
    if (result == null)
    { // Вывести байты операнда в шестнадцатеричном виде
        result = "";
        for (int i = 0; i < operandLength; i++)
            result += _il [_pos + i].ToString ("X2") + " ";
    }
    _pos += operandLength;
    return result;
}

```

Если после вызова метода `FormatOperand` значение `result` равно `null`, то это означает, что операнд не нуждается в специальном форматировании, и мы просто выводим его в шестнадцатеричном виде. Мы могли бы протестировать дизассемблер в данной точке, написав метод `FormatOperand`, который всегда возвращает `null`. Ниже показано, как будет выглядеть вывод:

```

IL_00A8: ldfld     98 00 00 04
IL_00AD: ldloc.2
IL_00AE: add
IL_00AF: ldelema   64 00 00 01
IL_00B4: ldstr     26 04 00 70
IL_00B9: call       B6 00 00 0A
IL_00BE: ldstr     11 01 00 70
IL_00C3: call       91 00 00 0A
...

```

Хотя коды операций корректны, операнды в таком виде не особенно полезны. Вместо шестнадцатеричных цифр нам необходимы имена членов и строки. После реализации метод FormatOperand решит проблему, идентифицируя специальные случаи, которые выигрывают от такого форматирования. Они включают большинство 4-байтовых операндов и сокращенные инструкции ветвления:

```

string FormatOperand (OpCode c, int operandLength)
{
    if (operandLength == 0) return "";
    if (operandLength == 4)
        return Get4ByteOperand (c);
    else if (c.OperandType == OperandType.ShortInlineBrTarget)
        return GetShortRelativeTarget ();
    else if (c.OperandType == OperandType.InlineSwitch)
        return GetSwitchTarget (operandLength);
    else
        return null;
}

```

Есть три вида 4-байтовых операндов, которые мы трактуем специальным образом. Первый вид относится к членам или типам — в данном случае мы извлекаем имя члена или типа, вызывая метод ResolveMember определяющего модуля. Второй вид — строки; они хранятся в метаданных модуля сборки и могут быть извлечены вызовом метода ResolveString. Третий вид касается целей ветвления, когда операнды ссылаются на байтовое смещение в коде IL. Мы форматируем их за счет работы с абсолютным адресом после текущей инструкции (+ 4 байта):

```

string Get4ByteOperand (OpCode c)
{
    int intOp = BitConverter.ToInt32 (_il, _pos);
    switch (c.OperandType)
    {
        case OperandType.InlineTok:
        case OperandType.InlineMethod:
        case OperandType.InlineField:
        case OperandType.InlineType:
            MemberInfo mi;
            try { mi = _module.ResolveMember (intOp); }
            catch { return null; }
            if (mi == null) return null;

```

```

        if (mi.ReflectedType != null)
            return mi.ReflectedType.FullName + "." + mi.Name;
        else if (mi is Type)
            return ((Type)mi).FullName;
        else
            return mi.Name;
    case OperandType.InlineString:
        string s = _module.ResolveString (intOp);
        if (s != null) s = "" + s + "";
        return s;
    case OperandType.InlineBrTarget:
        return "IL_" + (_pos + intOp + 4).ToString ("X4");
    default:
        return null;
    }
}

```



Точка, где мы вызываем `ResolveMember`, представляет собой хорошее окно для инструмента анализа кода, который сообщает о зависимостях методов.

Для любого другого 4-байтового кода операции мы возвращаем `null` (что заставляет метод `ReadOperand` форматировать operand в виде шестнадцатеричных цифр).

Последняя разновидность operandов, которая требует особого внимания — сокращенные цели ветвления и встроенные переключатели. Сокращенная цель ветвления описывает смещение назначения в виде одиночного байта со знаком, как в конце текущей инструкции (т.е. + 1 байт). За целью переключателя следует переменное количество 4-байтовых целей ветвления:

```

string GetShortRelativeTarget()
{
    int absoluteTarget = _pos + (sbyte) _il [_pos] + 1;
    return "IL_" + absoluteTarget.ToString ("X4");
}
string GetSwitchTarget (int operandLength)
{
    int targetCount = BitConverter.ToInt32 (_il, _pos);
    string [] targets = new string [targetCount];
    for (int i = 0; i < targetCount; i++)
    {
        int ilTarget = BitConverter.ToInt32 (_il, _pos + (i + 1) * 4);
        targets [i] = "IL_" + (_pos + ilTarget + operandLength).ToString ("X4");
    }
    return "(" + string.Join (", ", targets) + ")";
}

```

На этом написание дизассемблера завершено. Чтобы протестировать класс `Disassembler`, можно дизассемблировать один из его собственных методов:

```

MethodInfo mi = typeof (Disassembler).GetMethod (
    "ReadOperand", BindingFlags.Instance | BindingFlags.NonPublic);
Console.WriteLine (Disassembler.Disassemble (mi));

```



Динамическое программирование

В главе 4 объяснялась работа динамического связывания в языке C#. В этой главе мы кратко рассмотрим исполняющую среду динамического языка (Dynamic Language Runtime — DLR), после чего раскроем следующие паттерны динамического программирования:

- динамическое распознавание перегруженных членов;
- специальное связывание (реализация динамических объектов);
- взаимодействие с динамическими языками.



В главе 24 будет показано, каким образом ключевое слово `dynamic` может улучшить взаимодействие с COM.

Типы, рассматриваемые в главе, находятся в пространстве имен `System.Dynamic` за исключением типа `CallSite<>`, который расположен в пространстве имен `System.Runtime.CompilerServices`.

Исполняющая среда динамического языка

При выполнении динамического связывания язык C# полагается на среду DLR.

Несмотря на свое название, DLR не является динамической версией среды CLR. В действительности она представляет собой библиотеку, которая функционирует поверх CLR — точно так же, как любая другая библиотека вроде `System.Xml.dll`. Ее основная роль — снабжать службами времени выполнения для унификации динамического программирования на статически и динамически типизированных языках. Следовательно, такие языки, как C#, VB, IronPython и IronRuby, используют один и тот же протокол для вызова функций динамическим образом. Это позволяет им совместно использовать библиотеки и обращаться к коду, написанному на других языках.

Среда DLR также позволяет сравнительно легко создавать новые динамические языки в .NET. Вместо выпуска кода IL авторы динамических языков работают на уровне деревьев выражений (тех самых деревьев выражений из пространства имен `System.Linq.Expressions`, которые обсуждались в главе 8).

Среда DLR дополнительно гарантирует, что все потребители получают преимущество кеширования места вызова, представляющего собой оптимизацию, в соответствии с которой DLR избегает излишнего повторения потенциально затратных действий по распознаванию членов, предпринимаемых во время динамического связывания.

Что такое место вызова?

Когда компилятор встречает динамическое выражение, он не имеет никакого представления о том, кто или что будет вычислять это выражение во время выполнения. Например, рассмотрим следующий метод:

```
public dynamic Foo (dynamic x, dynamic y)
{
    return x / y;      // Динамическое выражение
}
```

Переменные `x` и `y` могут быть любыми объектами CLR, объектами COM или даже объектами, размещенными в среде какого-то динамического языка. Таким образом, компилятор не в состоянии применить обычный статический подход с выпуском вызова известного метода из известного типа. Взамен компилятор выпускает код, который в итоге дает дерево выражения. Такое дерево выражения описывает операцию, управляемую местом вызова (call site), к которому среда DLR привязается во время выполнения. По существу место вызова действует как посредник между вызывающим и вызываемым компонентами.

Место вызова представлено классом `CallSite<>` из сборки `System.Core.dll`. В этом можно убедиться, дизассемблировав предыдущий метод; результат будет выглядеть приблизительно так:

```
static CallSite<Func<CallSite,object,object,object>> divideSite;

[return: Dynamic]
public object Foo ([Dynamic] object x, [Dynamic] object y)
{
    if (divideSite == null)
        divideSite =
            CallSite<Func<CallSite,object,object,object>>.Create (
                Microsoft.CSharp.RuntimeBinder.Binder.Binder.BinaryOperation (
                    CSharpBinderFlags.None,
                    ExpressionType.Divide,
                    /* Для краткости остальные аргументы не показаны */ );
    return divideSite.Target (divideSite, x, y);
}
```

Как видите, место вызова кешируется в статическом поле, чтобы избежать накладных расходов, обусловленных его повторным созданием в каждом вызове. Среда DLR дополнительно кеширует результат фазы привязки и

фактические целевые объекты метода. (В зависимости от типов *x* и *y* может существовать множество целевых объектов.)

Затем происходит действительный динамический вызов за счет обращения к полю Target (делегат) места вызова с передачей ему операндов *x* и *y*.

Обратите внимание, что класс Binder специфичен для C#. Каждый язык с поддержкой динамического связывания предоставляет специфичный для языка связыватель, помогающий среде DLR интерпретировать выражения в манере, которая присуща языку и не является неожиданной для программиста. Например, если мы вызываем метод Foo с целочисленными значениями 5 и 2, то связыватель C# обеспечит получение обратно значения 2. В противоположность этому связыватель VB.NET приведет к возвращению значения 2.5.

Динамическое распознавание перегруженных членов

Вызов статически известных методов с динамически типизированными аргументами откладывает распознавание перегруженных членов с этапа компиляции до времени выполнения. Такой подход содействует упрощению решения определенных задач программирования вроде реализации паттерна проектирования “Посетитель” (Visitor). Кроме того, он удобен для обхода ограничений, накладываемых статической типизацией языка C#.

Упрощение паттерна “Посетитель”

По существу паттерн “Посетитель” позволяет “добавлять” метод в иерархию классов, не изменяя существующие классы. Несмотря на полезность, данный паттерн в своем статическом воплощении является неочевидным и не интуитивно понятным по сравнению с большинством других паттернов проектирования. Он также требует, чтобы посещаемые классы были сделаны “дружественными к паттерну ‘Посетитель’” за счет открытия доступа к методу Accept, что может оказаться невозможным, если классы находятся вне вашего контроля.

Посредством динамического связывания той же самой цели можно достигнуть более просто — и без необходимости в модификации существующих классов. В качестве иллюстрации рассмотрим следующую иерархию классов:

```
class Person
{
    public string FirstName { get; set; }
    public string LastName { get; set; }

    // Коллекция Friends может содержать объекты Customer и Employee:
    public readonly IList<Person> Friends = new Collection<Person> ();
}

class Customer : Person { public decimal CreditLimit { get; set; } }
class Employee : Person { public decimal Salary { get; set; } }
```

Предположим, что требуется написать метод, который программно экспортирует детали объекта Person в XML-элемент (объект XElement). Наиболее очевидное решение предусматривает реализацию внутри класса Person виртуального метода по имени ToXMLElement, который возвращает объект XElement, заполненный значениями свойств объекта Person. Затем метод ToXMLElement в классах Customer и Employee можно было бы переопределить, чтобы объект XElement также заполнялся значениями свойств CreditLimit и Salary. Однако такой паттерн может оказаться трудным в реализации по двум причинам.

- Вы можете не владеть кодом классов Person, Customer и Employee, что делает невозможным добавление к ним методов. (А расширяющие методы не обеспечивают полиморфное поведение.)
- Классы Person, Customer и Employee могут уже быть довольно большими. Часто встречающимся антипаттерном является “Божественный объект” (“God Object”), при котором класс, подобный Person, возлагает на себя настолько много функциональности, что его сопровождение превращается в самый настоящий кошмар. Хорошее противодействие этому — избегание добавления в класс Person функций, которым не нужен доступ к закрытому состоянию Person. Великолепным кандидатом может служить метод ToXMLElement.

Благодаря динамическому распознаванию перегруженных членов мы можем реализовать функциональность метода ToXMLElement в отдельном классе, не прибегая к неуклюжим операторам switch на основе типа:

```
class ToXMLElementPersonVisitor
{
    public XElement DynamicVisit (Person p) => Visit ((dynamic)p);

    XElement Visit (Person p)
    {
        return new XElement ("Person",
            new XAttribute ("Type", p.GetType ().Name),
            new XElement ("FirstName", p.FirstName),
            new XElement ("LastName", p.LastName),
            p.Friends.Select (f => DynamicVisit (f))
        );
    }

    XElement Visit (Customer c) // Специализированная логика для объектов Customer
    {
        XElement xe = Visit ((Person)c); // Вызов "базового" метода
        xe.Add (new XElement ("CreditLimit", c.CreditLimit));
        return xe;
    }

    XElement Visit (Employee e) // Специализированная логика для объектов Employee
    {
        XElement xe = Visit ((Person)e); // Вызов "базового" метода
        xe.Add (new XElement ("Salary", e.Salary));
        return xe;
    }
}
```

Метод `DynamicVisit` осуществляет динамическую диспетчеризацию — вызывает наиболее специфическую версию метода `Visit`, как определено во время выполнения. Обратите внимание на выделенную полужирным строку кода, в которой мы вызываем `DynamicVisit` на каждом объекте `Person` в коллекции `Friends`. Такой прием гарантирует, что если элемент коллекции `Friends` является объектом `Customer` или `Employee`, то будет вызвана корректная перегруженная версия метода.

Продемонстрировать использование класса `ToXMLElementPersonVisitor` можно следующим образом:

```
var cust = new Customer
{
    FirstName = "Joe", LastName = "Bloggs", CreditLimit = 123
};
cust.Friends.Add (
    new Employee { FirstName = "Sue", LastName = "Brown", Salary = 50000 }
);
Console.WriteLine (new ToXMLElementPersonVisitor () .DynamicVisit (cust));
```

Вот как выглядит результат:

```
<Person Type="Customer">
    <FirstName>Joe</FirstName>
    <LastName>Bloggs</LastName>
    <Person Type="Employee">
        <FirstName>Sue</FirstName>
        <LastName>Brown</LastName>
        <Salary>50000</Salary>
    </Person>
    <CreditLimit>123</CreditLimit>
</Person>
```

Вариации

Если планируется работа с несколькими классами посетителя, тогда удобная вариация предусматривает определение абстрактного базового класса для посетителей:

```
abstract class PersonVisitor<T>
{
    public T DynamicVisit (Person p) { return Visit ((dynamic)p); }
    protected abstract T Visit (Person p);
    protected virtual T Visit (Customer c) { return Visit ((Person) c); }
    protected virtual T Visit (Employee e) { return Visit ((Person) e); }
}
```

Тогда в подклассах не придется определять собственный метод `DynamicVisit`: они будут лишь переопределять версии метода `Visit`, поведение которых должно быть специализировано. Вдобавок появляются преимущества централизации методов, охватывающих иерархию `Person`, и возможность у реализующих классов вызывать базовые методы более естественным образом:

```

class ToXElementPersonVisitor : PersonVisitor< XElement>
{
    protected override XElement Visit (Person p)
    {
        return new XElement ("Person",
            new XAttribute ("Type", p.GetType ().Name),
            new XElement ("FirstName", p.FirstName),
            new XElement ("LastName", p.LastName),
            p.Friends.Select (f => DynamicVisit (f))
        );
    }

    protected override XElement Visit (Customer c)
    {
        XElement xe = base.Visit (c);
        xe.Add (new XElement ("CreditLimit", c.CreditLimit));
        return xe;
    }

    protected override XElement Visit (Employee e)
    {
        XElement xe = base.Visit (e);
        xe.Add (new XElement ("Salary", e.Salary));
        return xe;
    }
}

```

В дальнейшем можно даже создавать подклассы самого класса `ToXElementPersonVisitor`.

Анонимный вызов членов обобщенного типа

Строгость статической типизации C# — палка о двух концах. С одной стороны, она обеспечивает определенную степень корректности на этапе компиляции. С другой стороны, иногда она делает некоторые виды кода трудными в представлении или вовсе невозможными, и тогда приходится прибегать к рефлексии. В таких ситуациях динамическое связывание является более чистой и быстрой альтернативой рефлексии.

Примером может служить необходимость работы с объектом `G<T>`, где тип `T` неизвестен. Проиллюстрировать сказанное можно, определив следующий класс:

```
public class Foo<T> { public T Value; }
```

Предположим, что затем мы записываем метод, как показано ниже:

```
static void Write (object obj)
{
    if (obj is Foo<>)                                // Недопустимо
        Console.WriteLine ((Foo<>) obj).Value;          // Недопустимо
}
```

Такой код не скомпилируется: члены *несвязанных* обобщенных типов вызывать нельзя.

Динамическое связывание предлагает два средства, с помощью которых можно обойти данную проблему. Первое из них — доступ к члену `Value` динамическим образом:

```
static void Write (dynamic obj)
{
    try { Console.WriteLine (obj.Value); }
    catch (Microsoft.CSharp.RuntimeBinder.RuntimeBinderException) {...}
}
```

Множественная диспетчеризация

Язык C# и среда CLR всегда поддерживали ограниченную форму динамизма в виде вызовов виртуальных методов. Она отличается от динамического связывания C# тем, что для вызовов виртуальных методов компилятор должен фиксировать отдельный виртуальный член на этапе компиляции — основываясь на имени и сигнатуре вызываемого члена. Это означает, что справедливы приведенные ниже утверждения:

- выражение вызова должно полностью восприниматься компилятором (например, на этапе компиляции должно приниматься решение о том, чем является целевой член — полем или свойством);
- распознавание перегруженных членов должно осуществляться полностью компилятором на основе типов аргументов в течение этапа компиляции.

Следствие последнего утверждения заключается в том, что возможность выполнения вызовов виртуальных методов известна как *одиночная диспетчеризация*. Чтобы понять причину, взгляните на приведенный ниже вызов метода (где `Walk` — виртуальный метод):

```
animal.Walk (owner);
```

Принятие во время выполнения решения о том, какой метод `Walk` вызывать — класса `Dog` (собака) или класса `Cat` (кошка) — зависит только от типа *получателя*, т.е. `animal` (животное); отсюда и “одиночная” диспетчеризация. Если многочисленные перегруженные версии `Walk` принимают разные типы `owner`, тогда перегруженная версия выбирается на этапе компиляции безотносительно к тому, каким будет действительный тип объекта `owner` во время выполнения. Другими словами, только тип *получателя* во время выполнения может изменить то, какой метод будет вызван.

По контрасту динамический вызов откладывает распознавание перегруженных членов вплоть до времени выполнения:

```
animal.Walk ((dynamic) owner);
```

Окончательный выбор метода `Walk`, подлежащего вызову, теперь зависит и от `animal`, и от `owner` — это называется *множественной диспетчеризацией*, потому что в определении вызываемого метода `Walk` принимает участие не только тип получателя, но и типы аргументов времени выполнения.

Здесь имеется (потенциальное) преимущество работы с любым объектом, который определяет поле или свойство `Value`. Тем не менее, осталась еще пара проблем. Во-первых, перехват исключений в подобной манере несколько запутан и неэффективен (к тому же отсутствует возможность заранее узнать у DLR, будет ли эта операция успешной). Во-вторых, такой подход не будет работать, если `Foo` является интерфейсом (скажем, `IFoo<T>`) и удовлетворено одно из следующих условий:

- член `Value` не реализован явно;
- недоступен тип, который реализует интерфейс `IFoo<T>` (подробнее об этом речь пойдет позже).

Более удачное решение предусматривает написание перегруженного вспомогательного метода по имени `GetFooValue` и его вызов с применением *динамического распознавания перегруженных членов*:

```
static void Write (dynamic obj)
{
    object result = GetFooValue (obj);
    if (result != null) Console.WriteLine (result);
}

static T GetFooValue<T> (Foo<T> foo) { return foo.Value; }
static object GetFooValue (object foo) { return null; }
```

Обратите внимание, что мы перегрузили метод `GetFooValue` с целью приема параметра `object`, который действует в качестве запасного варианта для любого типа. Во время выполнения при вызове `GetFooValue` с динамическим аргументом динамический связыватель C# выберет наилучшую перегруженную версию. Если рассматриваемый объект не основан на `Foo<T>`, то вместо генерации исключения связыватель выберет перегруженную версию с параметром `object`.



Альтернатива предусматривает написание только первой перегруженной версии метода `GetFooValue` и последующий перехват исключения `RuntimeBinderException`. Преимущество такого подхода в том, что он различает случай, когда значение `foo.Value` равно `null`. Недостаток связан с появлением накладных расходов в плане производительности, которые обусловлены генерацией и перехватом исключения.

В главе 18 мы решали ту же самую проблему с интерфейсом, используя рефлексию — и прикладывали гораздо больше усилий (см. раздел “Анонимный вызов членов обобщенного интерфейса” в главе 18). Там рассматривался пример проектирования более мощной версии метода `ToString`, которая воспринимала бы объекты, реализующие `IEnumerable` и `IGrouping<, >`. Далее приведен тот же пример, решенный более элегантно за счет динамического связывания:

```
static string GetGroupKey<TKey, TElement> (IGrouping<TKey, TElement> group)
{
    return "Group with key=" + group.Key + ": ";
```

```

static string GetGroupKey (object source) { return null; }
public static string ToStringEx (object value)
{
    if (value == null) return "<null>";
    if (value is string s) return s;
    if (value.GetType().IsPrimitive) return value.ToString();
    StringBuilder sb = new StringBuilder();
    string groupKey = GetGroupKey ((dynamic)value); // Динамическая
                                                    // диспетчеризация
    if (groupKey != null) sb.Append (groupKey);
    if (value is IEnumerable)
        foreach (object element in ((IEnumerable)value))
            sb.Append (ToStringEx (element) + " ");
    if (sb.Length == 0) sb.Append (value.ToString());
    return "\r\n" + sb.ToString();
}

```

Ниже код демонстрируется в действии:

```
Console.WriteLine (ToStringEx ("xyyzzz".GroupBy (c => c)));
```

Вывод:

```
Group with key=x: x
Group with key=y: y y
Group with key=z: z z z
```

Обратите внимание, что для решения задачи мы применяли динамическое распознавание перегруженных членов. Если бы взамен мы поступили следующим образом:

```

dynamic d = value;
try { groupKey = d.Value; }
catch (Microsoft.CSharp.RuntimeBinder.RuntimeBinderException) {...}

```

то код потерпел бы неудачу, потому что LINQ-операция GroupBy возвращает тип, реализующий интерфейс `IGrouping<,>`, который сам по себе является внутренним и по этой причине недоступным:

```

internal class Grouping : IGrouping< TKey, TElement >, ...
{
    public TKey Key;
    ...
}

```

Хотя свойство `Key` объявлено как `public`, содержащий его класс ограничивает данное свойство до `internal`, делая доступным только через интерфейс `IGrouping<,>`. И как объяснялось в главе 4, при динамическом обращении к члену `Value` нет никакого способа сообщить среде DLR о необходимости привязки к указанному интерфейсу.

Реализация динамических объектов

Объект может предоставить свою семантику привязки, реализуя интерфейс `IDynamicMetaObjectProvider` или более просто — создавая подкласс `DynamicObject`, который предлагает стандартную реализацию этого интерфейса. Мы кратко демонстрировали такой подход в главе 4 с помощью следующего примера:

```
dynamic d = new Duck();
d.Quack();                      // Вызван метод Quack
d.Waddle();                     // Вызван метод Waddle

public class Duck : DynamicObject
{
    public override bool TryInvokeMember(
        InvokeMemberBinder binder, object[] args, out object result)
    {
        Console.WriteLine (binder.Name + " method was called");
        result = null;
        return true;
    }
}
```

DynamicObject

В предыдущем примере мы переопределили метод `TryInvokeMember`, который позволяет потребителю вызывать на динамическом объекте метод вроде `Quack` или `Waddle`. Класс `DynamicObject` открывает дополнительные виртуальные методы, которые дают потребителям возможность использовать также и другие программные конструкции. Ниже перечислены конструкции, имеющие представления в языке C#.

Метод	Конструкция программирования
<code>TryInvokeMember</code>	Метод
<code>TryGetMember</code> , <code>TrySetMember</code>	Свойство или поле
<code>TryGetIndex</code> , <code>TrySetIndex</code>	Индексатор
<code>TryUnaryOperation</code>	Унарная операция, такая как !
<code>TryBinaryOperation</code>	Бинарная операция, такая как ==
<code>TryConvert</code>	Преобразование (приведение) в другой тип
<code>TryInvoke</code>	Вызов на самом объекте, например, <code>d("foo")</code>

При успешном выполнении эти методы должны возвращать `true`. Если они возвращают `false`, тогда среда DLR будет прибегать к услугам связывателя языка в поиске подходящего члена в самом (подклассе) `DynamicObject`. В случае неудачи генерируется исключение `RuntimeBinderException`.

Мы можем продемонстрировать работу `TryGetMember` и `TrySetMember` с классом, который позволяет динамически получать доступ к атрибуту в объекте `XElement` (`System.Xml.Linq`):

```

static class XExtensions
{
    public static dynamic DynamicAttributes (this XElement e)
        => new XWrapper (e);
    class XWrapper : DynamicObject
    {
        XElement _element;
        public XWrapper (XElement e) { _element = e; }
        public override bool TryGetMember (GetMemberBinder binder,
                                         out object result)
        {
            result = _element.Attribute (binder.Name).Value;
            return true;
        }
        public override bool TrySetMember (SetMemberBinder binder,
                                         object value)
        {
            _element.SetAttributeValue (binder.Name, value);
            return true;
        }
    }
}

```

А так он применяется:

```

 XElement x = XElement.Parse (@"<Label Text=""Hello"" Id=""5""/>");
 dynamic da = x.DynamicAttributes();
 Console.WriteLine (da.Id);           // 5
 da.Text = "Foo";
 Console.WriteLine (x.ToString());     // <Label Text="Foo" Id="5" />

```

Следующий код выполняет аналогичное действие для интерфейса System.Data.IDataRecord, упрощая его использование средствами чтения данных:

```

public class DynamicReader : DynamicObject
{
    readonly IDataRecord _dataRecord;
    public DynamicReader (IDataRecord dr) { _dataRecord = dr; }
    public override bool TryGetMember (GetMemberBinder binder,
                                     out object result)
    {
        result = _dataRecord [binder.Name];
        return true;
    }
}
...
using (IDataReader reader = someDbCommand.ExecuteReader())
{
    dynamic dr = new DynamicReader (reader);
    while (reader.Read())
    {
        int id = dr.ID;
        string firstName = dr.FirstName;
        DateTime dob = dr.DateOfBirth;
        ...
    }
}

```

В приведенном ниже коде демонстрируется работа TryBinaryOperation и TryInvoke:

```
dynamic d = new Duck();
Console.WriteLine (d + d);                                // foo
Console.WriteLine (d (78, 'x'));                          // 123
public class Duck : DynamicObject
{
    public override bool TryBinaryOperation (BinaryOperationBinder binder,
                                             object arg, out object result)
    {
        Console.WriteLine (binder.Operation);                // Add
        result = "foo";
        return true;
    }
    public override bool TryInvoke (InvokeBinder binder,
                                   object[] args, out object result)
    {
        Console.WriteLine (args[0]);                         // 78
        result = 123;
        return true;
    }
}
```

Класс DynamicObject также открывает доступ к ряду виртуальных методов в интересах динамических языков. В частности, переопределение метода GetDynamicMemberNames позволяет возвращать список имен всех членов, которые предоставляет динамический объект.



Еще одна причина реализации GetDynamicMemberNames связана с тем, что отладчик Visual Studio задействует данный метод при отображении представления динамического объекта.

ExpandoObject

Другое простое практическое применение DynamicObject касается написания динамического класса, который хранит и извлекает объекты в словаре с ключами-строками. Тем не менее, эта функциональность уже предлагается классом ExpandoObject:

```
dynamic x = new ExpandoObject();
x.FavoriteColor = ConsoleColor.Green;
x.FavoriteNumber = 7;
Console.WriteLine (x.FavoriteColor);                      // Green
Console.WriteLine (x.FavoriteNumber);                     // 7
```

Класс ExpandoObject реализует интерфейс `IDictionary<string, object>` и потому мы можем продолжить наш пример, как показано ниже:

```
var dict = (IDictionary<string, object>) x;
Console.WriteLine (dict ["FavoriteColor"]);               // Green
Console.WriteLine (dict ["FavoriteNumber"]);              // 7
Console.WriteLine (dict.Count);                          // 2
```

Взаимодействие с динамическими языками

Хотя в языке C# поддерживается динамическое связывание через ключевое слово `dynamic`, оно не заходит настолько далеко, чтобы позволить вычислять выражение, описанное в строке, во время выполнения:

```
string expr = "2 * 3";
// "Выполнить" expr не удастся
```

Причина в том, что код для трансляции строки в дерево выражения требует лексического и семантического анализатора. Такие средства встроены в компилятор C# и не доступны в виде какой-то службы времени выполнения. Во время выполнения компилятор C# просто предоставляет *связыватель*, который сообщает среде DLR о том, как интерпретировать уже построенное дерево выражения.

Подлинные динамические языки, подобные IronPython и IronRuby, позволяют выполнять произвольную строку, что полезно при решении таких задач, как написание сценариев, динамическое конфигурирование и реализация процессоров динамических правил. Таким образом, хотя большую часть приложения можно написать на C#, для решения указанных задач удобно обращаться к какому-то динамическому языку. Кроме того, может возникнуть желание задействовать API-интерфейс, реализованный на динамическом языке, функциональность которого не имеет эквивалента в библиотеке .NET.



Пакет NuGet для написания сценариев Roslyn под названием `Microsoft.CodeAnalysis.CSharp.Scripting` предлагает API-интерфейс, который позволяет выполнять строку с кодом C#, хотя делает это, сначала компилируя код в программу. Накладные расходы на компиляцию делают его медленнее взаимодействия с Python, если только вы не намерены выполнять одно и то же выражение многократно.

В следующем примере мы используем язык IronPython, чтобы вычислить выражение, созданное во время выполнения, внутри кода C#. Данный сценарий мог бы применяться при реализации калькулятора.



Чтобы запустить этот код, добавьте в свое приложение NuGet-пакеты `DynamicLanguageRuntime` (не путайте его с пакетом `System.Dynamic.Runtime`) и `IronPython`.

```
using System;
using IronPython.Hosting;
using Microsoft.Scripting;
using Microsoft.Scripting.Hosting;

int result = (int) Calculate ("2 * 3");
Console.WriteLine (result); // 6
object Calculate (string expression)
{
    ScriptEngine engine = Python.CreateEngine();
    return engine.Execute (expression);
}
```

Поскольку мы передаем строку в Python, выражение будет вычисляться согласно правилам языка Python, а не C#. Это также означает возможность применения языковых средств Python, таких как списки:

```
var list = (IEnumerable) Calculate ("[1, 2, 3] + [4, 5]");
foreach (int n in list) Console.Write (n); // 12345
```

Передача состояния между C# и сценарием

Чтобы передать переменные из C# в Python, потребуется предпринять несколько дополнительных шагов, проиллюстрированных в следующем примере, который может служить основой для построения процессора правил:

```
// Следующая строка может поступать из файла или базы данных:
string auditRule = "taxPaidLastYear / taxPaidThisYear > 2";

ScriptEngine engine = Python.CreateEngine ();
ScriptScope scope = engine.CreateScope ();
scope.SetVariable ("taxPaidLastYear", 20000m);
scope.SetVariable ("taxPaidThisYear", 8000m);

ScriptSource source = engine.CreateScriptSourceFromString (
    auditRule, SourceCodeKind.Expression);

bool auditRequired = (bool) source.Execute (scope);
Console.WriteLine (auditRequired); // True
```

Вызвав метод `GetVariable`, переменные можно получить обратно:

```
string code = "result = input * 3";
ScriptEngine engine = Python.CreateEngine ();
ScriptScope scope = engine.CreateScope ();
scope.SetVariable ("input", 2);

ScriptSource source = engine.CreateScriptSourceFromString (code,
    SourceCodeKind.SingleStatement);
source.Execute (scope);
Console.WriteLine (engine.GetVariable (scope, "result")); // 6
```

Обратите внимание, что во втором примере мы указали значение `SourceCodeKind.SingleStatement` (а не `Expression`), чтобы сообщить процессору о необходимости выполнения оператора.

Типы автоматически маршализируются между мирами .NET и Python. Можно даже обращаться к членам объектов .NET со стороны сценария:

```
string code = @"sb.Append ("Hello")";
ScriptEngine engine = Python.CreateEngine ();
ScriptScope scope = engine.CreateScope ();
var sb = new StringBuilder ("Hello");
scope.SetVariable ("sb", sb);

ScriptSource source = engine.CreateScriptSourceFromString (
    code, SourceCodeKind.SingleStatement);
source.Execute (scope);
Console.WriteLine (sb.ToString()); // HelloWorld
```



20

Криптография

В настоящей главе обсуждаются основные API-интерфейсы криптографии в .NET:

- защита данных Windows;
- хеширование;
- симметричное шифрование;
- шифрование с открытым ключом и подписание.

Типы, рассматриваемые в главе, определены в следующих пространствах имен:

System.Security;
System.Security.Cryptography;

Обзор

В табл. 20.1 приведена сводка по вариантам криптографии в .NET. Мы кратко рассмотрим их в оставшихся разделах главы.

Пространство имен System.Security.Cryptography.Xml в .NET обеспечивает более специализированную поддержку для создания и проверки подписей, основанных на XML, а пространство имен System.Security.Cryptography.X509Certificates предлагает типы для работы с цифровыми сертификатами.

Защита данных Windows



Защита данных Windows доступна только в Windows, а попытка ее использования в средах других ОС приводит к генерации исключения PlatformNotSupportedException.

В разделе “Операции с файлами и каталогами” главы 15 было показано, как использовать File.Encrypt для запрашивания у операционной системы прозрачного шифрования файла:

```
File.WriteAllText ("myfile.txt", "");  
File.Encrypt ("myfile.txt");  
File.AppendAllText ("myfile.txt", "sensitive data");
```

Таблица 20.1. Варианты шифрования и хеширования в .NET

Вариант	Количество ключей, подлежащих управлению	Скорость	Прочность	Примечания
File.Encrypt	0	Высокая	Зависит от пароля пользователя	Защищает файлы прозрачным образом при поддержке со стороны файловой системы. Ключ неявно выводится из учетных данных вошедшего в систему пользователя. Только Windows
Защита данных Windows	0	Высокая	Зависит от пароля пользователя	Шифрует и расшифровывает байтовые массивы, используя неявно выведенный ключ
Хеширование	0	Высокая	Высокая	Однонаправленная (необратимая) трансформация. Применяется для хранения паролей, сравнения файлов и проверки данных на предмет разрушения
Симметричное шифрование	1	Высокая	Высокая	Для универсального шифрования/расшифровки. При шифровании и расшифровке используется один и тот же ключ. Может применяться для защиты сообщений при транспортировке
Шифрование с открытым ключом	2	Низкая	Высокая	При шифровании и расшифровке используются разные ключи. Применяется для обмена симметричным ключом во время передачи сообщений и для цифрового подписания файлов

В данном случае шифрование применяет ключ, выведенный из пароля пользователя, который вошел в систему. Тот же самый неявно выведенный ключ можно использовать для шифрования байтового массива с помощью API-интерфейса защиты данных Windows (Data Protection API — DPAPI). Интерфейс DPAPI доступен через класс `ProtectedData` — простой тип с двумя статическими методами:

```
public static byte[] Protect (byte[] userData, byte[] optionalEntropy,
                           DataProtectionScope scope);
public static byte[] Unprotect (byte[] encryptedData, byte[] optionalEntropy,
                               DataProtectionScope scope);
```

Все, что вы включите в `optionalEntropy`, добавится к ключу, повышая тем самым его безопасность. Аргумент типа перечисления `DataProtectionScope` имеет два члена: `CurrentUser` и `LocalMachine`. В случае `CurrentUser` ключ выводится из учетных данных вошедшего в систему пользователя, а в случае

`LocalMachine` применяется ключ уровня машины, общий для всех пользователей. Это означает, что в области действия `CurrentUser` данные, зашифрованные одним пользователем, не могут быть расшифрованы другим. Ключ `LocalMachine` обеспечивает менее сильную защиту, но работает с Windows-службой или программой, которая должна функционировать под управлением множества учетных записей.

Ниже приведена простая демонстрация шифрования и расшифровки:

```
byte[] original = {1, 2, 3, 4, 5};  
DataProtectionScope scope = DataProtectionScope.CurrentUser;  
  
byte[] encrypted = ProtectedData.Protect (original, null, scope);  
byte[] decrypted = ProtectedData.Unprotect (encrypted, null, scope);  
// decrypted теперь содержит {1, 2, 3, 4, 5}
```

Защита данных Windows обеспечивает умеренное противодействие атакующему злоумышленнику, имеющему полный доступ к компьютеру, которое зависит от прочности пользовательского пароля. На уровне `LocalMachine` такая защита эффективна только против злоумышленников с ограниченным физическим и электронным доступом.

Хеширование

Алгоритм хеширования превращает потенциально крупное количество байтов в небольшой хеш-код фиксированной длины. Алгоритмы хеширования спроектированы так, что изменение одиночного бита где угодно в исходных данных приводит к получению существенно отличающегося хеш-кода. Данный факт делает их подходящими для сравнения файлов либо выявления случайной (либо умышленной) порчи файла или потока данных.

Хеширование также действует как одностороннее шифрование, потому что преобразовать хеш-код обратно в исходные данные практически невозможно. Оно идеально подходит для хранения паролей в базе данных, т.к. в случае взлома вашей базы данных вы не хотите, чтобы злоумышленник получил доступ к паролям в виде простого текста. Для аутентификации вы всего лишь хешируете то, что вводит пользователь, и сравниваете его с хеш-кодом, который хранится в базе данных.

Для выполнения хеширования вы вызываете метод `ComputeHash` на одном из подклассов `HashAlgorithm`, таком как `SHA1` или `SHA256`:

```
byte[] hash;  
using (Stream fs = File.OpenRead ("checkme.doc"))  
    hash = SHA1.Create ().ComputeHash (fs); // Хеш SHA1 имеет длину 20 байтов
```

Метод `ComputeHash` также принимает байтовый массив, что удобно при хешировании паролей (более защищенный прием будет описан в разделе “Хеширование паролей” далее в главе):

```
byte[] data = System.Text.Encoding.UTF8.GetBytes ("strong&password");  
byte[] hash = SHA256.Create ().ComputeHash (data);
```



Метод `GetBytes` объекта `Encoding` преобразует строку в байтовый массив; метод `GetString` осуществляет обратное преобразование. Тем не менее, объект `Encoding` не может преобразовывать зашифрованный или хешированный байтовый массив в строку, потому что такие данные обычно нарушают правила кодирования текста. Взамен придется использовать методы `Convert.ToString` и `Convert.FromString`: они выполняют преобразования между любым байтовым массивом и допустимой (к тому же дружественной к XML или JSON) строкой.

Алгоритмы хеширования в .NET

`SHA1` и `SHA256` — два подтипа `HashAlgorithm`, предоставляемые .NET. Ниже представлены основные алгоритмы, расположенные в порядке возрастания степени безопасности.

Класс	Алгоритм	Длина хеша в байтах	Надежность
MD5	MD5	16	Очень низкая
SHA1	SHA-1	20	Низкая
SHA256	SHA-2	32	Высокая
SHA384	SHA-2	48	Высокая
SHA512	SHA-2	64	Высокая

Все текущие реализации классов обеспечивают примерно одинаковую скорость работы за исключением `SHA256`, который в 2-3 раза быстрее (скорость может варьироваться в зависимости от оборудования и операционной системы). На современном настольном компьютере или сервере для всех алгоритмов можно ожидать производительность не менее 500 Мбайт в секунду. Более длинные хеши уменьшают вероятность возникновения коллизии (когда два отличающихся файла дают один и тот же хеш).



При хешировании паролей и других уязвимых данных применяйте, *по меньшей мере*, алгоритм `SHA256`. Алгоритмы `MD5` и `SHA1` для этих целей считаются ненадежными, и они подходят только для защиты от случайного повреждения данных, а не от их преднамеренной подделки.



В .NET 8 и более поздних версиях также поддерживается последняя версия алгоритма хеширования `SHA-3` через классы `SHA3_256`, `SHA3_384` и `SHA3_512`. Алгоритмы `SHA-3` считаются более безопасными (и медленными), чем перечисленные ранее алгоритмы, но требуют операционной системы Windows сборки 25324+ или Linux с OpenSSL 1.1.1+. Вы можете проверить, доступна ли поддержка со стороны операционной системы, с помощью статического свойства `IIsSupported` указанных классов.

Хеширование паролей

Более длинные алгоритмы SHA подходят как основа для хеширования паролей, если вы обеспечите применение политики сильных паролей во избежание *словарной атаки* — стратегии, при которой злоумышленник строит таблицу поиска пароля путем хеширования каждого слова из словаря.

Стандартный прием при хешировании паролей предусматривает включение “начального значения” — длинной последовательности байтов, которую вы предварительно получаете через генератор случайных чисел и затем перед хешированием объединяете с каждым паролем. Такой подход срывает планы взломщиков двумя способами:

- они также должны знать байты начального значения;
- они не могут использовать *радужные таблицы* (rainbow table), которые представляют собой заранее рассчитанные базы данных паролей и их хеш-кодов, хотя словарная атака по-прежнему может быть возможной при наличии достаточной вычислительной мощности.

Вы можете дополнительно усилить защиту, “растягивая” хеши паролей, т.е. многократно производя повторное хеширование для получения байтовых последовательностей, которые требуют более интенсивных вычислений. Если выполнить повторное хеширование 100 раз, то словарная атака, которая иначе заняла бы месяц, может потребовать примерно восемь лет. Именно такой вид растяжения выполняют классы KeyDerivation, Rfc2898DeriveBytes и PasswordDeriveBytes, одновременно также позволяя удобно указывать начальные значения. Наилучшее хеширование предлагает метод KeyDerivation.Pbkdf2:

```
byte[] encrypted = KeyDerivation.Pbkdf2 (
    password: "stRhong&pword",
    salt: Encoding.UTF8.GetBytes ("j78Y#p) /saREN!y3@"),
    prf: KeyDerivationPrf.HMACSHA512,
    iterationCount: 100,
    numBytesRequested: 64);
```



Метод KeyDerivation.Pbkdf2 требует NuGet-пакета Microsoft.AspNetCore.Cryptography.KeyDerivation. Несмотря на то что он находится в пространстве имен ASP.NET Core, его можно применять в любом приложении .NET.

Симметричное шифрование

При симметричном шифровании один и тот же ключ используется для шифрования и расшифровки. В .NET BCL предлагаются четыре алгоритма симметричного шифрования, главный из которых — алгоритм Рэндала (Rijndael); остальные алгоритмы предназначены по большей части для совместимости со старыми приложениями. Алгоритм Рэндала является быстрым и надежным и имеет две реализации:

- класс Rijndael;
- класс Aes.

Указанные два класса в основном идентичны за исключением того, что Aes не позволяет ослаблять шифр, изменяя размер блока. Класс Aes рекомендуется к применению командой разработчиков, которая отвечает за безопасность CLR.

Классы Rijndael и Aes допускают использование симметричных ключей длиной 16, 24 или 32 байта: все они считаются безопасными. Ниже показано, как зашифровать последовательности байтов при записи их в файл с применением 16-байтового ключа:

```
byte[] key = {145,12,32,245,98,132,98,214,6,77,131,44,221,3,9,50};  
byte[] iv = {15,122,132,5,93,198,44,31,9,39,241,49,250,188,80,7};  
byte[] data = { 1, 2, 3, 4, 5 }; // Данные, которые будут зашифрованы.  
  
using (SymmetricAlgorithm algorithm = Aes.Create())  
using (ICryptoTransform encryptor = algorithm.CreateEncryptor(key, iv))  
using (Stream f = File.Create ("encrypted.bin"))  
using (Stream c = new CryptoStream (f, encryptor, CryptoStreamMode.Write))  
    c.Write (data, 0, data.Length);
```

Следующий код расшифровывает содержимое этого файла:

```
byte[] key = {145,12,32,245,98,132,98,214,6,77,131,44,221,3,9,50};  
byte[] iv = {15,122,132,5,93,198,44,31,9,39,241,49,250,188,80,7};  
byte[] decrypted = new byte[5];  
  
using (SymmetricAlgorithm algorithm = Aes.Create())  
using (ICryptoTransform decryptor = algorithm.CreateDecryptor(key, iv))  
using (Stream f = File.OpenRead ("encrypted.bin"))  
using (Stream c = new CryptoStream (f, decryptor, CryptoStreamMode.Read))  
    for (int b; (b = c.ReadByte ()) > -1;)  
        Console.Write (b + " "); // 1 2 3 4 5
```

В приведенном примере мы формируем ключ из 16 случайно выбранных байтов. Если при расшифровке указан неправильный ключ, тогда CryptoStream генерирует исключение CryptographicException. Перехват данного исключения — единственный способ проверки корректности ключа.

Помимо ключа мы строим *вектор инициализации* (Initialization Vector — IV). Такая 16-байтовая последовательность формирует часть шифра (почти как ключ), но не считается *секретной*. При передаче зашифрованного сообщения вектор IV можно отправлять в виде простого текста (скажем, в заголовке сообщения) и затем *изменять в каждом сообщении*. Это сделает каждое зашифрованное сообщение нераспознаваемым на основе любых предшествующих сообщений, даже если их незашифрованные версии были похожими либо идентичными.



Если защита посредством вектора IV не нужна или нежелательна, то ее можно аннулировать, используя одно и то же 16-байтовое значение для ключа и вектора IV. Тем не менее, отправка множества сообщений с одинаковым вектором IV ослабляет шифр и даже делает возможным его взлом.

Работа, связанная с криптографией, разделена между классами. Класс Aes решает математические задачи; он применяет алгоритм шифрования вместе с его объектами шифратора и дешифратора. Класс CryptoStream является связующим звеном; он заботится о взаимодействии с потоками. Класс Aes можно заменить другим классом симметричного алгоритма, но по-прежнему пользоваться CryptoStream.

Класс CryptoStream является *дву направленным*, что означает возможность чтения или записи в поток в зависимости от выбора CryptoStreamMode.Read или CryptoStreamMode.Write. Шифратор и дешифратор способны выполнять чтение и запись, давая в результате четыре комбинации. Чтение может быть удобно моделировать как “выталкивание”, а запись — как “заталкивание”. В случае сомнений начните с Write для шифрования и Read для расшифровки; зачастую такой подход будет наиболее естественным.

Для генерации случайного ключа или вектора IV применайте класс RandomNumberGenerator из пространства имен System.Cryptography. Числа, которые он производит, являются по-настоящему непредсказуемыми, или *криптостойкими* (класс System.Random подобное не гарантирует). Вот пример:

```
byte[] key = new byte [16];
byte[] iv = new byte [16];
RandomNumberGenerator rand = RandomNumberGenerator.Create();
rand.GetBytes (key);
rand.GetBytes (iv);
```

Или, начиная с версии .NET 6:

```
byte[] key = RandomNumberGenerator.GetBytes (16);
byte[] iv = RandomNumberGenerator.GetBytes (16);
```

Если ключ и вектор IV не указаны, тогда криптостойкие случайные числа генерируются автоматически. Ключ и вектор IV можно получить через свойства Key и IV объекта Aes.

Шифрование в памяти

В .NET 6 и последующих версиях можно использовать методы EncryptCbc и DecryptCbc для ускорения процесса шифрования и расшифровки байтовых массивов:

```
public static byte[] Encrypt (byte[] data, byte[] key, byte[] iv)
{
    using Aes algorithm = Aes.Create();
    algorithm.Key = key;
    return algorithm.EncryptCbc (data, iv);
}

public static byte[] Decrypt (byte[] data, byte[] key, byte[] iv)
{
    using Aes algorithm = Aes.Create();
    algorithm.Key = key;
    return algorithm.DecryptCbc (data, iv);
}
```

Вот эквивалентный код, который работает во всех версиях .NET:

```
public static byte[] Encrypt (byte[] data, byte[] key, byte[] iv)
{
    using (Aes algorithm = Aes.Create())
        using (ICryptoTransform encryptor = algorithm.CreateEncryptor (key, iv))
            return Crypt (data, encryptor);
}

public static byte[] Decrypt (byte[] data, byte[] key, byte[] iv)
{
    using (Aes algorithm = Aes.Create())
        using (ICryptoTransform decryptor = algorithm.CreateDecryptor (key, iv))
            return Crypt (data, decryptor);
}

static byte[] Crypt (byte[] data, ICryptoTransform cryptor)
{
    MemoryStream m = new MemoryStream();
    using (Stream c = new CryptoStream (m, cryptor, CryptoStreamMode.Write))
        c.Write (data, 0, data.Length);
    return m.ToArray();
}
```

Здесь `CryptoStreamMode.Write` хорошо работает как для шифрования, так и для расшифровки, поскольку в обоих случаях осуществляется “заталкивание” внутрь нового потока в памяти.

Ниже приведены перегруженные версии методов, которые принимают и возвращают строки:

```
public static string Encrypt (string data, byte[] key, byte[] iv)
{
    return Convert.ToBase64String (
        Encrypt (Encoding.UTF8.GetBytes (data), key, iv));
}

public static string Decrypt (string data, byte[] key, byte[] iv)
{
    return Encoding.UTF8.GetString (
        Decrypt (Convert.FromBase64String (data), key, iv));
}
```

Их использование демонстрируется в следующем коде:

```
byte[] key = new byte[16];
byte[] iv = new byte[16];

var cryptoRng = RandomNumberGenerator.Create();
cryptoRng.GetBytes (key);
cryptoRng.GetBytes (iv);

string encrypted = Encrypt ("Yeah!", key, iv);
Console.WriteLine (encrypted); // R1/5gYvcxyR2vzPjnT7yaQ==

string decrypted = Decrypt (encrypted, key, iv);
Console.WriteLine (decrypted); // Yeah!
```

Соединение в цепочку потоков шифрования

Класс `CryptoStream` представляет собой декоратор, что означает возможность его соединения в цепочки с другими потоками. В показанном ниже примере мы записываем сжатый зашифрованный текст в файл, после чего читаем его обратно:

```
byte[] key = new byte [16];
byte[] iv = new byte [16];
var cryptoRng = RandomNumberGenerator.Create();
cryptoRng.GetBytes (key);
cryptoRng.GetBytes (iv);
using (Aes algorithm = Aes.Create())
{
    using (ICryptoTransform encryptor = algorithm.CreateEncryptor(key, iv))
        using (Stream f = File.Create ("serious.bin"))
            using (Stream c = new CryptoStream (f, encryptor, CryptoStreamMode.Write))
                using (Stream d = new DeflateStream (c, CompressionMode.Compress))
                    using (StreamWriter w = new StreamWriter (d))
                        await w.WriteLineAsync ("Small and secure!");
    using (ICryptoTransform decryptor = algorithm.CreateDecryptor(key, iv))
        using (Stream f = File.OpenRead ("serious.bin"))
            using (Stream c = new CryptoStream (f, decryptor, CryptoStreamMode.Read))
                using (Stream d = new DeflateStream (c, CompressionMode.Decompress))
                    using (StreamReader r = new StreamReader (d))
                        Console.WriteLine (await r.ReadLineAsync()); // Small and secure!
}
```

(В качестве финального штриха мы сделали программу асинхронной, вызывая методы `WriteLineAsync` и `ReadLineAsync`, а затем ожидая результат.)

В данном примере все однобуквенные переменные формируют часть цепочки. Объекты `algorithm`, `encryptor` и `decryptor` помогают `CryptoStream` выполнять работу по шифрованию, как проиллюстрировано на рис. 20.1.

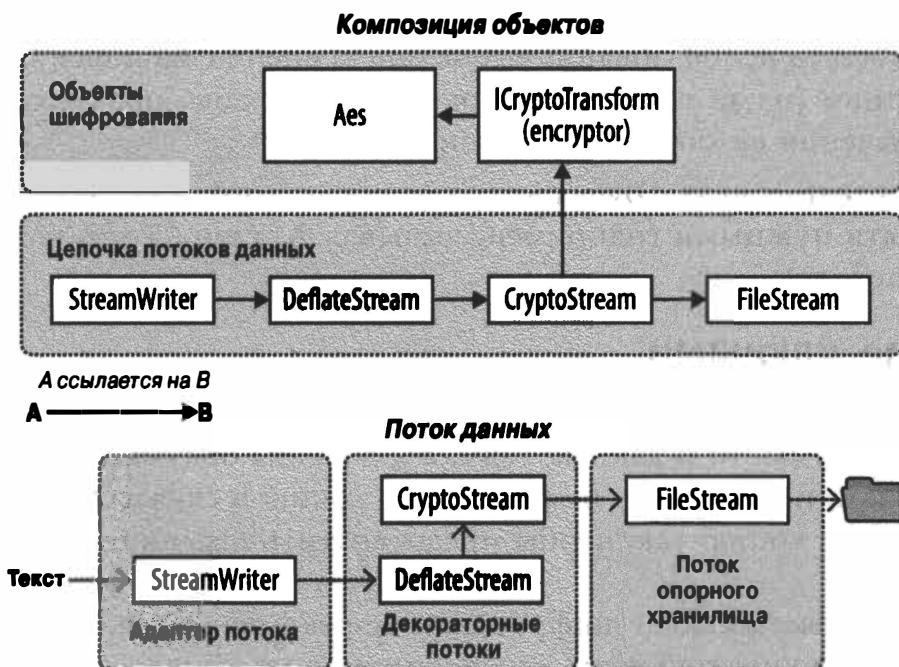


Рис. 20.1. Соединение в цепочку потоков шифрования и сжатия

Соединение в цепочку потоков в такой манере требует мало памяти вне зависимости от конечных размеров потоков.

Освобождение объектов шифрования

Освобождение объекта `CryptoStream` гарантирует, что содержимое его внутреннего кеша данных будет сброшено в лежащий в основе поток. Внутреннее кеширование является необходимым для алгоритмов шифрования, т.к. они обрабатывают данные блоками, а не по одному байту за раз.

Класс `CryptoStream` необычен тем, что его метод `Flush` ничего не делает. Чтобы сбросить поток (не освобождая его), потребуется вызвать метод `FlushFinalBlock`. В противоположность методу `Flush` метод `FlushFinalBlock` может быть вызван только однократно, после чего никакие дополнительные данные записать не удастся.

В рассматриваемых примерах мы также освобождаем объект `Aes` и объекты, реализующие `ICryptoTransform` (`encryptor` и `decryptor`). Когда трансформации Рэндала освобождаются, они очищают в памяти симметричный ключ и связанные с ним данные, предотвращая последующее их обнаружение другим программным обеспечением, которое функционирует на компьютере (речь идет о вредоносном ПО). В выполнении этой работы нельзя полагаться на сборщик мусора, поскольку он просто помечает разделы памяти как свободные, не обнуляя все их байты.

Простейший способ освободить объект `Aes` за пределами оператора `using` — вызвать метод `Clear`. Его метод `Dispose` скрыт через явную реализацию (чтобы сигнализировать о необычной семантике освобождения, согласно которой он очищает память, а не освобождает неуправляемые ресурсы).



Вы можете дополнительно снизить уязвимость своего приложения в плане утечки секретных данных через освобожденную память, предпринимая следующие меры:

- избегать использования строк для хранения защищенной информации (из-за того, что строки неизменяемы, после создания их значения не могут быть очищены);
- перезаписывать буферы сразу после того, как они перестают быть нужными (например, вызывая `Array.Clear` на байтовом массиве).

Управление ключами

Управление ключами — критически важный элемент безопасности: если ваши ключи уязвимы, то и данные тоже. Вы должны обдумать, кто будет иметь доступ к ключам, и как делать их резервную копию в случае аппаратного сбоя, при этом хранить копию так, чтобы предотвратить несанкционированный доступ к ней.

Жестко кодировать ключи шифрования не рекомендуется, потому что существуют популярные инструменты для декомпиляции сборок, требующие незначительного опыта для их использования. Более удачное решение (в Windows)

предусматривает построение для каждой установки случайного ключа и его хранение безопасным образом с помощью защиты данных Windows.

Для приложений, развертываемых в облаке, Microsoft Azure и Amazon Web Services (AWS) предлагают системы управления ключами с дополнительными средствами, которые могут оказаться полезными в производственной среде (например, аудит).

Если вы шифруете поток сообщений, тогда шифрование с открытым ключом обеспечивает еще лучший вариант.

Шифрование с открытым ключом и подписание

Криптография с открытым ключом является *асимметричной*, что означает применение разных ключей для шифрования и расшифровки.

В отличие от симметричного шифрования, где ключом может служить любая произвольная последовательность байтов подходящей длины, асимметричная криптография требует специально сформированных пар ключей. Пара ключей содержит компоненты *открытого ключа* и *секретного ключа*, которые работают вместе следующим образом:

- открытый ключ шифрует сообщения;
- секретный ключ расшифровывает сообщения.

Участник, “формирующий” пару ключей, хранит секретный ключ вдали от глаз, а открытый ключ распространяет свободно. Особенность такого типа криптографии заключается в том, что вычислить секретный ключ на основе открытого ключа невозможно. Таким образом, в случае утери секретного ключа зашифрованные данные не могут быть восстановлены; если же произошла утечка секретного ключа, тогда вся система шифрования становится бесполезной.

Предоставление открытого ключа позволяет двум компьютерам взаимодействовать защищенным образом через публичную сеть без предварительного контакта и без существующего общего секрета. Чтобы посмотреть, как это работает, предположим, что компьютер *Origin* должен отправить конфиденциальное сообщение компьютеру *Target*.

1. Компьютер *Target* генерирует пару открытого и секретного ключей и затем отправляет открытый ключ компьютеру *Origin*.
2. Компьютер *Origin* шифрует конфиденциальное сообщение с использованием открытого ключа компьютера *Target*, после чего отправляет его *Target*.
3. Компьютер *Target* расшифровывает конфиденциальное сообщение с помощью своего секретного ключа.

А вот что будет видеть пассивный перехватчик сообщений:

- открытый ключ компьютера *Target*;
- конфиденциальное сообщение, зашифрованное посредством открытого ключа компьютера *Target*.

Однако без секретного ключа компьютера *Target* сообщение не может быть расшифровано.



Шифрование с открытым ключом не предотвращает атаки типа “человек посередине”: другими словами, компьютер *Origin* не может знать, является компьютер *Target* злоумышленным участником или нет. Для аутентификации получателя отправитель уже должен знать открытый ключ получателя либо иметь возможность проверить достоверность ключа через *цифровой сертификат сайта*.

Из-за того, что шифрование с открытым ключом выполняется относительно медленно, а размер сообщений ограничен, конфиденциальное сообщение, отправленное из компьютера *Origin* в компьютер *Target*, обычно содержит новый ключ для последующего *симметричного шифрования*. Это позволяет прекратить шифрование с открытым ключом для оставшейся части сеанса и отдать предпочтение симметричному алгоритму, способному обрабатывать более крупные сообщения. Такой протокол особенно безопасен, если для каждого сеанса генерируется новая пара открытого и секретного ключей, так что хранить какие-либо ключи ни на том, ни на другом компьютере не понадобится.



Алгоритмы шифрования с открытым ключом полагаются на то, что сообщение по размерам меньше ключа. В итоге они становятся подходящими для шифрования только небольших объемов данных, таких как ключ для последующего симметричного шифрования. Если вы попытаетесь зашифровать сообщение, которое намного больше половины размера ключа, тогда поставщик криптографии сгенерирует исключение.

Класс RSA

.NET предлагает несколько асимметричных алгоритмов, самым популярным из которых является RSA. Ниже показано, как шифровать и расшифровывать с помощью RSA:

```
byte[] data = { 1, 2, 3, 4, 5 }; // Это данные, которые будут шифроваться.  
using (var rsa = new RSACryptoServiceProvider())  
{  
    byte[] encrypted = rsa.Encrypt (data, true);  
    byte[] decrypted = rsa.Decrypt (encrypted, true);  
}
```

Поскольку мы не указали открытый или секретный ключ, поставщик криптографии автоматически генерирует пару ключей, применяя стандартную длину 1024 бита; посредством конструктора можно запросить более длинные ключи с приращением в 8 байтов. Для приложений, критических в отношении безопасности, разумно запрашивать длину в 2048 бит:

```
var rsa = new RSACryptoServiceProvider (2048);
```

Генерация пары ключей связана с интенсивными вычислениями, требуя примерно 10 мс. По указанной причине реализация RSA задерживает генерацию вплоть до момента, когда ключ действительно необходим, скажем, при вызове метода Encrypt. Это дает шанс загрузить существующий ключ или пару ключей, если она существует.

Методы ImportCspBlob и ExportCspBlob загружают и сохраняют ключи в формате байтового массива. Методы FromXmlString и ToXmlString делают то же самое в формате строки, содержащей XML-фрагмент. Флаг типа bool позволяет указывать, нужно ли при сохранении включать секретный ключ. Ниже демонстрируется построение пары ключей и сохранение ее на диске:

```
using (var rsa = new RSACryptoServiceProvider())
{
    File.WriteAllText ("PublicKeyOnly.xml", rsa.ToXmlString (false));
    File.WriteAllText ("PublicPrivate.xml", rsa.ToXmlString (true));
}
```

Так как мы не предоставили существующие ключи, метод ToXmlString создаст новую пару ключей (при первом вызове). В следующем примере мы читаем эти ключи и используем их для шифрования и расшифровки сообщения:

```
byte[] data = Encoding.UTF8.GetBytes ("Message to encrypt");

string publicKeyOnly = File.ReadAllText ("PublicKeyOnly.xml");
string publicPrivate = File.ReadAllText ("PublicPrivate.xml");

byte[] encrypted, decrypted;
using (var rsaPublicOnly = new RSACryptoServiceProvider ())
{
    rsaPublicOnly.FromXmlString (publicKeyOnly);
    encrypted = rsaPublicOnly.Encrypt (data, true);
    // Следующая строка кода генерирует исключение, потому что
    // для расшифровки необходим секретный ключ:
    // decrypted = rsaPublicOnly.Decrypt (encrypted, true);
}

using (var rsaPublicPrivate = new RSACryptoServiceProvider ())
{
    // С помощью секретного ключа можно успешно расшифровывать:
    rsaPublicPrivate.FromXmlString (publicPrivate);
    decrypted = rsaPublicPrivate.Decrypt (encrypted, true);
}
```

Цифровые подписи

Алгоритмы с открытым ключом могут также применяться для цифрового подписания сообщений или документов. Подпись подобна хешу за исключением того, что ее создание требует секретного ключа, а потому она не может быть подделана. Для проверки подлинности подписи используется открытый ключ. Ниже приведен пример:

```
byte[] data = Encoding.UTF8.GetBytes ("Message to sign");
byte[] publicKey;
byte[] signature;
object hasher = SHA1.Create(); // Выбранный алгоритм хеширования.
```

```

// Сгенерировать новую пару ключей, затем с ее помощью подписать данные:
using (var publicPrivate = new RSACryptoServiceProvider())
{
    signature = publicPrivate.SignData (data, hasher);
    publicKey = publicPrivate.ExportCspBlob (false); // Получить открытый ключ
}

// Создать новый объект поставщика шифрования RSA, используя
// только открытый ключ, затем протестировать подпись
using (var publicOnly = new RSACryptoServiceProvider())
{
    publicOnly.ImportCspBlob (publicKey);
    Console.Write (publicOnly.VerifyData (data, hasher, signature)); // True

    // Давайте теперь подделаем данные и перепроверим подпись:
    data[0] = 0;
    Console.Write (publicOnly.VerifyData (data, hasher, signature)); // False

    // Следующий вызов генерирует исключение из-за отсутствия секретного ключа:
    signature = publicOnly.SignData (data, hasher);
}

```

Подписание работает за счет хеширования данных с последующим применением к результирующему хешу асимметричного алгоритма. Из-за того, что хеши имеют небольшой фиксированный размер, крупные документы могут подписываться относительно быстро (шифрование с открытым ключом намного интенсивнее эксплуатирует центральный процессор, чем хеширование). При желании можно выполнить хеширование самостоятельно, а затем вызвать метод `SignHash` вместо `SignData`:

```

using (var rsa = new RSACryptoServiceProvider())
{
    byte[] hash = SHA1.Create().ComputeHash (data);
    signature = rsa.SignHash (hash, CryptoConfig.MapNameToOID ("SHA1"));
    ...
}

```

Методу `SignHash` по-прежнему необходимо знать, какой алгоритм хеширования использовался; метод `CryptoConfig.MapNameToOID` предоставляет эту информацию в корректном формате на основе дружественного имени, такого как "SHA1".

Класс `RSACryptoServiceProvider` генерирует подписи, размер которых соответствует размеру ключа. В настоящее время ни один из основных алгоритмов не генерирует защищенные подписи, длина которых была бы значительно меньше 128 байтов (подходящие, например, для кодов активации продуктов).



Чтобы подписание было эффективным, получатель должен знать и доверять открытому ключу отправителя, что можно обеспечить через заблаговременные коммуникации, предварительную конфигурацию или сертификат сайта. Сертификат сайта представляет собой электронную запись открытого ключа и имени отправителя, которая сама подписана независимым доверенным центром. Типы для работы с сертификатами определены в пространстве имен `System.Security.Cryptography.X509Certificates`.



Расширенная многопоточность

Глава 14 начиналась с рассмотрения основ многопоточности в качестве подготовки к исследованию задач и асинхронности. В частности, было показано, каким образом запускать и конфигурировать поток. Вдобавок были раскрыты такие важные концепции, как организация пула потоков, блокировка, зацикливание и контексты синхронизации. Кроме того, обсуждалась блокировка и безопасность к потокам и демонстрировалась простейшая сигнализирующая конструкция `ManualResetEvent`.

В настоящей главе мы возвращаемся к теме многопоточности. В первых трех разделах будут предоставлены дополнительные сведения по синхронизации, блокировке и безопасности в отношении потоков. Затем мы рассмотрим следующие темы:

- немонопольное блокирование (`Semaphore` и блокировки объектов чтения/записи);
- все сигнализирующие конструкции (`AutoResetEvent`, `ManualResetEvent`, `CountdownEvent` и `Barrier`);
- ленивая инициализация (`Lazy<T>` и `LazyInitializer`);
- локальное хранилище потока (`ThreadStaticAttribute`, `ThreadLocal<T>` и `GetData/SetData`);
- таймеры.

Многопоточность является настолько обширной темой, так что по ссылке <http://albahari.com/threading/> доступны дополнительные материалы, посвященные перечисленным ниже более тонким темам:

- использование методов `Monitor.Wait` и `Monitor.Pulse` в специализированных сигнализирующих сценариях;
- приемы неблокирующей синхронизации для микрооптимизации (`Interlocked`, барьеры памяти, `volatile`);
- применение типов `SpinLock` и `SpinWait` в сценариях с высоким уровнем параллелизма.

Обзор синхронизации

Синхронизация представляет собой акт координирования параллельно выполняемых действий с целью получения предсказуемых результатов. Синхронизация особенно важна, когда множество потоков получают доступ к одним и тем же данным; в этой области удивительно легко столкнуться с серьезными трудностями.

Вероятно, простейшими и наиболее удобными инструментами синхронизации считаются продолжения и комбинаторы задач, описанные в главе 14. За счет представления параллельных программ в виде асинхронных операций, связанных вместе продолжениями и комбинаторами, уменьшается необходимость в блокировке и сигнализации. Тем не менее, по-прежнему встречаются ситуации, когда в игру вступают низкоуровневые конструкции. Конструкции синхронизации могут быть разделены на три описанные ниже категории.

- **Монопольное блокирование.** Конструкции монопольного блокирования позволяют выполнять некоторое действие или запускать определенный раздел кода только одному потоку в каждый момент времени. Их основное назначение заключается в том, чтобы предоставить потокам возможность доступа к допускающему запись совместно используемому состоянию, не влияя друг на друга. Конструкциями монопольного блокирования являются `lock`, `Mutex` и `SpinLock`.
- **Немонопольное блокирование.** Немонопольное блокирование позволяет ограничивать параллелизм. Конструкциями немонопольного блокирования являются `Semaphore` (`SemaphoreSlim`) и `ReaderWriterLock` (`ReaderWriterLockSlim`).
- **Сигнализация.** Сигнализация позволяет потоку блокироваться вплоть до получения одного или большего числа уведомлений от другого потока (потоков). Сигнализирующие конструкции включают `ManualResetEvent` (`ManualResetEventSlim`), `AutoResetEvent`, `CountdownEvent` и `Barrier`. Первые три конструкции называются *дескрипторами ожидания событий*.

Кроме того, возможно (хотя и сложно) выполнять определенные параллельные операции на совместно используемом состоянии без блокирования за счет использования *неблокирующих конструкций синхронизации*. Существуют методы `Thread.MemoryBarrier`, `Thread.VolatileRead` и `Thread.VolatileWrite`, ключевое слово `volatile`, а также класс `Interlocked`. Эта тема раскрывается в статье по ссылке <http://albahari.com/threading/>; там же приведено описание методов `Wait/Pulse` класса `Monitor`, которые могут применяться для написания специальной сигнализирующей логики.

Монопольное блокирование

Доступны три конструкции монопольного блокирования: оператор `lock`, класс `Mutex` и структура `SpinLock`. Конструкция `lock` является наиболее удобной и часто используемой, в то время как другие две конструкции ориентированы на собственные сценарии:

- класс Mutex позволяет охватывать множество процессов (блокировки на уровне компьютера);
- структура SpinLock реализует микрооптимизацию, которая может уменьшить количество переключений контекста в сценариях с высоким уровнем параллелизма (см. <http://albahari.com/threading/>).

Оператор lock

Для иллюстрации потребности в блокировании рассмотрим следующий класс:

```
class ThreadUnsafe
{
    static int _val1 = 1, _val2 = 1;
    static void Go()
    {
        if (_val2 != 0) Console.WriteLine (_val1 / _val2);
        _val2 = 0;
    }
}
```

Класс ThreadUnsafe не безопасен в отношении потоков: если метод Go был вызван двумя потоками одновременно, то появляется возможность получения ошибки деления на ноль. Дело в том, что в одном потоке поле _val2 может быть установлено в 0 как раз тогда, когда выполнение в другом потоке находится между оператором if и вызовом метода Console.WriteLine. Ниже показано, как исправить проблему с помощью lock:

```
class ThreadSafe
{
    static readonly object _locker = new object();
    static int _val1 = 1, _val2 = 1;
    static void Go()
    {
        lock (_locker)
        {
            if (_val2 != 0) Console.WriteLine (_val1 / _val2);
            _val2 = 0;
        }
    }
}
```

В каждый момент времени блокировать объект синхронизации (в данном случае _locker) может только один поток, и любые соперничающие потоки задерживаются до тех пор, пока блокировка не будет освобождена. Если за блокировку соперничают несколько потоков, тогда они ставятся в “очередь готовности” с предоставлением блокировки на основе “первым пришел — первым обслужен”¹. Говорят, что монопольные блокировки иногда приводят к последовательному доступу к объекту, защищаемому блокировкой, т.к. доступ одного

¹ Равноправие в этой очереди временами может нарушаться из-за нюансов поведения Windows и CLR.

потока не может совмещаться с доступом другого. В рассматриваемом случае мы защищаем логику внутри метода Go, а также поля `_val1` и `_val2`.

Monitor.Enter и Monitor.Exit

Фактически оператор `lock` в C# является синтаксическим сокращением для вызова методов `Monitor.Enter` и `Monitor.Exit` с добавленным блоком `try/finally`. Ниже показана упрощенная версия того, что на самом деле происходит внутри метода `Go` из предыдущего примера:

```
Monitor.Enter (_locker);
try
{
    if (_val2 != 0) Console.WriteLine (_val1 / _val2);
    _val2 = 0;
} finally { Monitor.Exit (_locker); }
```

Вызов метода `Monitor.Exit` без предварительного вызова `Monitor.Enter` на том же объекте приводит к генерации исключения.

Перегруженная версия Monitor.Enter, принимающая аргумент lockTaken

В продемонстрированном выше коде присутствует тонкая уязвимость. Представим себе (маловероятный) случай генерации исключения между вызовом метода `Monitor.Enter` и блоком `try` (возможно, `OutOfMemoryException` или прекращения работы потока в .NET Framework). При таком сценарии блокировка может быть получена или не получена. Если блокировка *получена*, то она не будет освобождена, поскольку мы никогда не войдем в блок `try/finally`. В результате происходит утечка блокировки. Во избежание подобной опасности была определена следующая перегруженная версия `Monitor.Enter`:

```
public static void Enter (object obj, ref bool lockTaken);
```

Значение `lockTaken` станет равным `false`, если (и только если) метод `Enter` сгенерировал исключение, и блокировка не была получена.

Вот как выглядит более надежный шаблон применения (именно так компилятор C# транслирует оператор `lock`):

```
bool lockTaken = false;
try
{
    Monitor.Enter (_locker, ref lockTaken);
    // Выполнить необходимые действия...
}
finally { if (lockTaken) Monitor.Exit (_locker); }
```

TryEnter

Класс `Monitor` также предлагает метод `TryEnter`, который позволяет указывать тайм-аут в миллисекундах или в виде структуры `TimeSpan`. Метод `TryEnter` возвращает `true`, если блокировка получена, или `false`, если никаких блокировок не получено из-за истечения времени тайм-аута.

Метод TryEnter можно также вызывать без аргументов, что дает возможность “проверить” блокировку, немедленно инициируя тайм-аут, если блокировка не может быть получена сразу. Как и Enter, метод TryEnter перегружен для приема аргумента lockTaken.

Выбор объекта синхронизации

Использовать в качестве объекта синхронизации можно любой объект, видимый каждому участвующему потоку, но при одном жестком условии: он должен быть ссылочного типа. Объект синхронизации обычно является закрытым (потому что это помогает инкапсулировать логику блокирования) и, как правило, представляет собой поле экземпляра или статическое поле. Объект синхронизации может дублировать защищаемый посредством него объект, что и делает поле `_list` в следующем примере:

```
class ThreadSafe
{
    List <string> _list = new List <string>();
    void Test()
    {
        lock (_list)
        {
            _list.Add ("Item 1");
            ...
        }
    }
}
```

Поле, выделенное для целей блокирования (вроде `_locker` в предыдущем примере), обеспечивает точный контроль над областью видимости и степенью детализации блокировки. Применяться в качестве объекта синхронизации может также содержащий объект (`this`) либо даже его тип:

```
lock (this) { ... }
```

или:

```
lock (typeof (Widget)) { ... } // Для защиты доступа к статическим членам
```

Недостаток блокирования подобным образом связан с тем, что логика блокирования не инкапсулирована, а потому предотвратить взаимоблокировки и избыточные блокировки становится труднее.

Можно также блокировать локальные переменные, захваченные лямбда-выражениями или анонимными методами.



Блокирование никак не ограничивает доступ к самому объекту синхронизации. Другими словами, вызов `x.ToString()` не будет блокироваться из-за того, что другой поток вызывает `lock (x)`; чтобы блокирование произошло, вызывать `lock (x)` должны оба потока.

Когда нужна блокировка

Запомните базовое правило: блокировка необходима при доступе к любому совместно используемому полю, допускающему запись. Синхронизация должна приниматься во внимание даже в таком простейшем случае, как операция при-

сваивания для одиночного поля. В следующем классе ни метод Increment, ни метод Assign не является безопасным в отношении потоков:

```
class ThreadUnsafe
{
    static int _x;
    static void Increment() { _x++; }
    static void Assign() { _x = 123; }
}
```

А вот безопасные к потокам версии методов Increment и Assign:

```
static readonly object _locker = new object();
static int _x;

static void Increment() { lock (_locker) _x++; }
static void Assign() { lock (_locker) _x = 123; }
```

Когда блокировки отсутствуют, могут возникать две проблемы.

- Операции вроде инкрементирования значения переменной (а в определенных обстоятельствах даже чтение/запись переменной) не являются атомарными.
- Компилятор, среда CLR и процессор имеют право изменять порядок следования инструкций и кэшировать переменные в регистрах центрального процессора в целях улучшения производительности — до тех пор, пока такие оптимизации не изменяют поведение однопоточной программы (или многопоточной программы, в которой используются блокировки).

Блокирование смягчает вторую проблему, т.к. оно создает барьер памяти до и после блокировки. Барьер памяти представляет собой “заграждающую метку”, которую не могут пересечь указанные эффекты либо изменение порядка следования и кэширование.



Сказанное применимо не только к блокировкам, но и ко всем конструкциям синхронизации. Таким образом, если используется, например, сигнализирующая конструкция, которая гарантирует, что в каждый момент времени переменная читается/записывается только одним потоком, тогда блокировка не нужна. Следовательно, показанный ниже код является безопасным к потокам без блокирования x:

```
var signal = new ManualResetEvent (false);
int x = 0;
new Thread (() => { x++; signal.Set(); }).Start();
signal.WaitOne();
Console.WriteLine (x); // 1 (всегда)
```

В разделе “Nonblocking Synchronization” (“Неблокирующая синхронизация”) по ссылке <http://albahari.com/threading/> мы объясняем, как возникла такая потребность, и показываем, каким образом барьеры памяти и класс Interlocked могут предложить альтернативы блокированию в подобных ситуациях.

Блокирование и атомарность

Если группа переменных всегда читается и записывается внутри одной и той же блокировки, то можно говорить о том, что эти переменные читаются и записываются *атомарно*. Давайте предположим, что поля *x* и *y* всегда читаются и устанавливаются внутри блокировки на объекте *locker*:

```
lock (locker) { if (x != 0) y /= x; }
```

Можно сказать, что доступ к *x* и *y* производится атомарно, поскольку блок кода не может быть разделен или вытеснен действиями другого потока так, что он изменит содержимое *x* или *y* и *сделает результаты недействительными*. Обеспечивая доступ к *x* и *y* всегда внутри одной и той же монопольной блокировки, вы никогда не получите ошибку деления на ноль.



Предоставляемая блокировкой атомарность нарушается, если внутри блока *lock* генерируется исключение (независимо от наличия или отсутствия многопоточности). Например, взгляните на следующий код:

```
decimal _savingsBalance, _checkBalance;
void Transfer (decimal amount)
{
    lock (_locker)
    {
        _savingsBalance += amount;
        _checkBalance -= amount + GetBankFee();
    }
}
```

Если метод *GetBankFee* генерирует исключение, тогда банк потеряет деньги. В таком случае мы могли бы избежать проблемы, вызвав *GetBankFee* раньше. Решение для более сложных ситуаций предусматривает реализацию логики “отката” внутри блока *catch* или *finally*.

Атомарность инструкций представляет собой другую, хотя и похожую концепцию: инструкция считается атомарной, если она выполняется неделимым образом на лежащем в основе процессоре.

Вложенное блокирование

Поток может многократно блокировать один и тот же объект вложенным (реинтерабельным) образом:

```
lock (locker)
lock (locker)
lock (locker)
{
    // Выполнить необходимые действия...
}
```

или по-другому:

```
Monitor.Enter (locker); Monitor.Enter (locker); Monitor.Enter (locker);
// Выполнить необходимые действия...
Monitor.Exit (locker); Monitor.Exit (locker); Monitor.Exit (locker);
```

В таких сценариях объект деблокируется, только когда завершается самый внешний оператор `lock` или выполняется совпадающее количество операторов `Monitor.Exit`. Вложенное блокирование удобно, если один метод вызывает другой изнутри блокировки:

```
object locker = new object();

lock (locker)
{
    AnotherMethod();
    // Мы по-прежнему имеем блокировку, т.к. она является реентерабельной.
}

void AnotherMethod()
{
    lock (locker) { Console.WriteLine ("Another method"); }
}
```

Поток может блокироваться только на первой (самой внешней) блокировке.

Взаимоблокировки

Взаимоблокировка случается, когда каждый из двух потоков ожидает ресурс, удерживаемый другим потоком, так что ни один из них не может продолжить работу. Сказанное проще всего проиллюстрировать с помощью двух блокировок:

```
object locker1 = new object();
object locker2 = new object();

new Thread (() => {
    lock (locker1)
    {
        Thread.Sleep (1000);
        lock (locker2);      // Взаимоблокировка
    }
}).Start();

lock (locker2)
{
    Thread.Sleep (1000);
    lock (locker1);      // Взаимоблокировка
}
```

Три и большее количество потоков могут породить более сложные цепочки взаимоблокировок.



В стандартной среде размещения система CLR не похожа на SQL Server; она не обнаруживает и не устраняет взаимоблокировки автоматически, принудительно прекращая работу одного из нарушителей. Взаимоблокировка потоков приводит к тому, что участвующие потоки блокируются на неопределенный срок, если только не был указан тайм-аут блокировки. (Тем не менее, под управлением хоста интеграции CLR с SQL Server взаимоблокировки *обнаруживаются* автоматически с генерацией перехватываемого исключения в одном из потоков.)

Взаимоблокировка является одной из самых сложных проблем многопоточности — особенно, когда есть множество взаимосвязанных объектов. По существу сложность кроется в том, что вы не можете с уверенностью сказать, какие блокировки получил *вызывающий поток*.

Таким образом, вы можете блокировать закрытое поле `a` внутри своего класса `x`, не зная, что вызывающий поток (или поток, обращающийся к вызывающему потоку) уже заблокировал поле `b` в классе `y`. Тем временем другой поток делает обратное, создавая взаимоблокировку. По иронии судьбы проблема усугубляется (хорошими) паттернами объектно-ориентированного проектирования, потому что паттерны подобного рода создают цепочки вызовов, которые не определены вплоть до стадии выполнения.

Хотя популярный совет блокировать объекты в согласованном порядке во избежание взаимоблокировок был полезен в начальном примере, он труден в применении к только что описанному сценарию. Лучшая стратегия заключается в том, чтобы проявлять осторожность при блокировании обращений к методам в объектах, которые могут иметь ссылки на ваш объект. Кроме того, следует подумать, действительно ли нужна блокировка обращений к методам в других классах (как будет показано в разделе “Блокирование и безопасность к потокам” далее в главе, это делается часто, но иногда доступны другие возможности). В большей степени полагаясь на высокоуровневые средства синхронизации, такие как продолжения/комбинаторы задач, параллелизм данных и неизменяемые типы (рассматриваются далее в главе), потребность в блокировании можно снизить.



Существует альтернативный путь восприятия данной проблемы: когда вы обращаетесь к другому коду, удерживая блокировку, инкапсуляция такой блокировки незаметно исчезает. Это не ошибка в CLR, а фундаментальное ограничение блокирования в целом. Проблемы блокирования решаются в рамках разнообразных исследовательских проектов, включая проект *Software Transactional Memory* (Программная транзакционная память).

Еще один сценарий взаимоблокировки возникает при вызове метода `Dispatcher.Invoke` (в приложении WPF) или `Control.Invoke` (в приложении Windows Forms) во время владения блокировкой. Если случится так, что пользовательский интерфейс выполняет другой метод, который ожидает ту же самую блокировку, то именно здесь и возникнет взаимоблокировка. Часто проблему можно устраниТЬ, просто вызывая метод `BeginInvoke` вместо `Invoke` (или положиться на асинхронные функции, которые делают это неявно, когда присутствует контекст синхронизации). В качестве альтернативы перед вызовом `Invoke` можно освободить свою блокировку, хотя прием не сработает, если блокировку отобрал *вызывающий поток*.

Производительность

Блокировка выполняется быстро: можно ожидать, что получение и освобождение блокировки на современном (2020-х годов) компьютере займет менее 20 нс при отсутствии соперничества за эту блокировку. В случае соперничества

побочное переключение контекста смещает накладные расходы ближе к микросекундной области, хотя они могут оказаться еще больше перед тем, как действительно произойдет повторное планирование потока.

Mutex

Класс Mutex похож на оператор `lock` языка C#, но он способен работать во множество процессов. Другими словами, Mutex может иметь область действия на уровне *компьютера и приложения*. Получение и освобождение объекта Mutex требует около половины микросекунды при отсутствии соперничества, т.е. он более чем в 20 раз медленнее оператора `lock`.

В случае класса Mutex для блокирования вызывается его метод `WaitOne`, а для разблокирования — метод `ReleaseMutex`. Как и оператор `lock`, объект Mutex может быть освобожден из того же самого потока, в котором он был получен.



Если вы забудете вызвать метод `ReleaseMutex` и просто сделаете вызов `Close` или `Dispose`, то в любом другом потоке, ожидающем данный объект Mutex, сгенерируется исключение `AbandonedMutexException`.

Межпроцессный объект Mutex часто используется для обеспечения того, что в каждый момент времени может выполняться только один экземпляр программы. Ниже показано, как это делается.

```
//Назначение объекту Mutex имени делает его доступным на уровне всего компьютера
// Используйте имя, являющееся уникальным для вашей компании и приложения
// (например, включите в него URL компании)

using var mutex = new Mutex (true, @"Global\oreilly.com OneAtATimeDemo");
// Ожидать несколько секунд, если возникло соперничество; в этом случае
// другой экземпляр программы все еще находится в процессе завершения
if (!mutex.WaitOne (TimeSpan.FromSeconds (3), false))
{
    Console.WriteLine ("Another instance of the app is running. Bye!");
    // Выполняется другой экземпляр программы. Завершение
    return;
}
try { RunProgram(); }
finally { mutex.ReleaseMutex(); }

void RunProgram()
{
    Console.WriteLine ("Running. Press Enter to exit");
    // Программа выполняется; нажмите Enter для завершения
    Console.ReadLine();
}
```



При выполнении под управлением терминальных служб (Terminal Services) или в отдельных консолях Unix объект Mutex уровня компьютера обычно виден только приложениям в том же самом сеансе. Чтобы сделать его видимым всем сеансам терминального сервера, добавьте к его имени префикс `Global \`, как было сделано в примере.

Блокирование и безопасность к потокам

Программа или метод является безопасным в отношении потоков, если обладает способностью корректно работать в любом многопоточном сценарии. Безопасность к потокам достигается главным образом за счет блокирования и уменьшения возможностей взаимодействия потоков.

По перечисленным ниже причинам универсальные типы редко бывают безопасными к потокам в полном объеме.

- Затраты при разработке, необходимые для обеспечения полной безопасности к потокам, могут оказаться значительными, особенно если тип имеет множество полей (в произвольном многопоточном контексте каждое поле потенциально открыто для взаимодействия).
- Безопасность к потокам может повлечь за собой снижение производительности (частично зависящее от того, применяется ли тип во множестве потоков).
- Безопасный в отношении потоков тип не обязательно автоматически превращает использующую его программу в безопасную к потокам. Часто работа, связанная с построением программы, делает избыточными усилия по достижению безопасности к потокам самого типа.

Таким образом, безопасность к потокам обычно реализуется только там, где она нужна, с целью поддержки специфичного многопоточного сценария.

Однако есть несколько способов “схитрить” и заставить крупные и сложные классы безопасно выполнять в многопоточной среде. Один из них предусматривает принесение в жертву степени детализации за счет помещения больших разделов кода — даже кода доступа ко всему объекту — внутрь единственной монопольной блокировки, обеспечивая последовательный доступ на высоком уровне. На самом деле такая тактика жизненно важна, если необходимо применять небезопасный к потокам код третьей стороны (или большинство типов .NET, если уж на то пошло) в многопоточном контексте. Уловка заключается просто в использовании одной и той же монопольной блокировки для защиты доступа ко всем свойствам, методам и полям небезопасного к потокам объекта. Такое решение хорошо работает, если все методы объекта выполняются быстро (в противном случае будет много блокирований).



Оставив в стороне примитивные типы, лишь очень немногие типы .NET позволяют создавать экземпляры, которые безопасны к потокам за рамками простого параллельного доступа только для чтения. Ответственность за обеспечение безопасности к потокам, обычно посредством монопольных блокировок, возлагается на разработчика. (Исключением являются коллекции из пространства имен `System.Collections.Concurrent`, которые мы рассмотрим в главе 22.)

Другой способ схитрить предполагает минимизацию взаимодействия потоков за счет сведения к минимуму совместно используемых данных. Это великолепный подход, который неявно применяется в лишенных состояния серверах

приложений среднего уровня и серверах веб-страниц. Поскольку множественные клиентские запросы могут поступать одновременно, серверные методы, к которым они обращаются, должны быть безопасными к потокам. Проектное решение, при котором состояние не запоминается (популярное по причинам масштабируемости), по существу ограничивает возможность взаимодействия, т.к. классы не сохраняют данные между запросами. Взаимодействие потоков затем ограничивается только статическими полями, которые могут создаваться для таких целей, как кеширование часто используемых данных в памяти и представление инфраструктурных служб вроде аутентификации и аудита.

Еще одно решение (в насыщенных клиентских приложениях) предусматривает запуск кода, который получает доступ к совместно используемому состоянию в потоке пользовательского интерфейса. Как было показано в главе 14, асинхронные функции упрощают реализацию такого подхода.

Безопасность к потокам и типы .NET

Блокирование может использоваться для преобразования небезопасного к потокам кода в код, безопасный в отношении потоков. Хорошим сценарием его применения следует считать саму платформу .NET. Почти все непримитивные типы в ней не являются безопасными к потокам (когда задачи выходят за рамки простого доступа только по чтению), но при этом они могут использоваться в многопоточном коде, если доступ к любому объекту защищен посредством блокировки. Ниже приведен пример, в котором два потока одновременно добавляют элемент к одной и той же коллекции `List`, после чего организуют перечисление этой коллекции:

```
class ThreadSafe
{
    static List <string> _list = new List <string>();
    static void Main()
    {
        new Thread (AddItem).Start();
        new Thread (AddItem).Start();
    }
    static void AddItem()
    {
        lock (_list) _list.Add ("Item " + _list.Count);
        string[] items;
        lock (_list) items = _list.ToArray();
        foreach (string s in items) Console.WriteLine (s);
    }
}
```

В данном случае мы блокируем сам объект `_list`. Если бы существовали два взаимосвязанных списка, то для применения блокировки мы должны были бы выбрать общий объект (на его место можно было бы назначить один из списков или — что еще лучше — использовать независимое поле).

Перечисление коллекций .NET также не является безопасным к потокам в том смысле, что если список изменяется во время перечисления, тогда генери-

руется исключение. В приведенном примере вместо блокирования на протяжении всего перечисления мы сначала копируем элементы в массив, что позволяет избежать удержания блокировки чрезмерно долго, если действия, предпринимаемые при перечислении, потенциально могут отнимать много времени. (Другое решение предусматривает использование блокировки объекта чтения/записи, как объясняется в разделе “Блокировки объектов чтения/записи” далее в главе.)

Блокирование безопасных к потокам объектов

Иногда блокировку также необходимо применять при доступе к объектам, безопасным в отношении потоков. В целях иллюстрации предположим, что класс `List` из .NET на самом деле безопасен к потокам, и нужно добавить элемент в список:

```
if (!list.Contains (newItem)) list.Add (newItem);
```

Вне зависимости от того, безопасен список к потокам или нет, приведенный оператор таковым определено не является! Весь этот оператор `if` должен быть помещен внутрь блокировки, чтобы предотвратить вытеснение в промежутке между проверкой наличия элемента в списке и добавлением нового элемента. Ту же самую блокировку затем нужно использовать везде, где список модифицируется. Например, следующий оператор также требует помещения в идентичную блокировку, чтобы его не вытеснил предшествующий оператор:

```
_list.Clear();
```

Другими словами, нам пришлось бы применять блокировки точно так же, как мы поступали с классами небезопасных к потокам коллекций (делая гипотетическую безопасность к потокам класса `List` избыточной).



Применение блокировки к коду доступа в коллекцию может привести к чрезмерному блокированию в средах с высокой степенью параллелизма. Именно потому .NET предлагает безопасные к потокам версии очереди, стека и словаря, которые обсуждаются в главе 22.

Статические члены

Помещение кода доступа к объекту внутрь специальной блокировки работает, только если все параллельные потоки осведомлены — и используют — данную блокировку. Это может быть не так, если объект имеет широкую область видимости. Худший случай касается статических членов в открытом типе. Например, представьте ситуацию, когда статическое свойство структуры `DateTime`, такое как `DateTime.Now`, не является безопасным к потокам, и два параллельных вызова могут дать в результате искаженный вывод либо исключение. Единственный способ устраниТЬ проблему с помощью внешнего блокирования может предусматривать блокировку самого типа, т.е. `lock(typeof(DateTime))`, перед вызовом `DateTime.Now`. Прием сработает, только если все программисты согласятся поступать подобным образом (что маловероятно). Более того, блокировка типа привносит собственные проблемы.

По указанной причине статические члены структуры `DateTime` были осмотрительно запрограммированы как безопасные к потокам. Такой шаблон при-

меняется в .NET повсеместно: *статические члены являются безопасными к потокам, а члены экземпляра — нет*. Следовать упомянутому шаблону также имеет смысл при написании типов для общественного потребления, поскольку он позволяет избежать создания неразрешимых проблем с безопасностью в отношении потоков. Другими словами, делая статические методы безопасными к потокам, вы программируете так, чтобы не препятствовать безопасности к потокам для потребителей данного типа.



Безопасность к потокам в статических методах придется кодировать явным образом: она не появляется автоматически только в силу того, что метод определен как статический!

Безопасность к потокам для доступа только по чтению

Превращение типов в безопасные к потокам для параллельного доступа только по чтению (там, где возможно) дает преимущество в том, что потребители могут избежать излишнего блокирования. Данный принцип соблюдают многие типы в .NET: например, коллекции являются безопасными к потокам для параллельных объектов чтения.

Следовать такому принципу довольно просто: если вы документировали тип как безопасный к потокам для параллельного доступа только по чтению, то не производите запись в поля внутри методов, которые по ожиданиям потребителя должны допускать только чтение (или помещаете такой код внутрь блокировки). Например, реализация метода `ToArray` в коллекции может начинаться с уплотнения внутренней структуры коллекции. Тем не менее, это сделало бы метод небезопасным к потокам для потребителей, которые ожидают, что он допускает только чтение.

Безопасность к потокам для доступа только по чтению является одной из причин, по которым перечислители отделены от классов, поддерживающих перечисление: два потока могут одновременно перечислять коллекцию, потому что каждый из них получает отдельный объект перечислителя.



Если документация по типу отсутствует, тогда имеет смысл проявлять осторожность в предположениях о том, что тот или иной метод по своей природе является предназначенным только для чтения. Хорошим примером может служить класс `Random`: при вызове метода `Random.Next` его внутренняя реализация требует обновления закрытых начальных значений. Следовательно, вы должны либо применять блокировку к коду, использующему класс `Random`, либо поддерживать отдельные экземпляры `Random` для каждого потока.

Безопасность к потокам в серверах приложений

Серверы приложений должны быть многопоточными, чтобы обрабатывать одновременные клиентские запросы. Приложения ASP.NET Core и Web API являются неявно многопоточными. Это означает, что при написании кода на серверной стороне вы должны принимать во внимание безопасность к потокам,

если есть хотя бы малейшая возможность взаимодействия между потоками, обрабатывающими клиентские запросы. К счастью, такая ситуация возникает редко; типичный серверный класс либо не сохраняет состояние (поля отсутствуют), либо имеет модель активизации, которая создает отдельный его экземпляр для каждого клиента или каждого запроса. Взаимодействие обычно происходит только через статические поля, которые иногда применяются для кеширования в памяти частей базы данных с целью повышения производительности.

Например, предположим, что имеется метод `RetrieveUser`, выдающий запрос к базе данных:

```
// User - специальный класс с полями для хранения данных о пользователе
internal User RetrieveUser (int id) { ... }
```

Если метод `RetrieveUser` вызывается часто, тогда показатели производительности можно было бы улучшить, кешируя результаты в статическом объекте `Dictionary`. Ниже показано концептуально простое решение, учитывающее безопасность к потокам:

```
static class UserCache
{
    static Dictionary <int, User> _users = new Dictionary <int, User>();
    internal static User GetUser (int id)
    {
        User u = null;
        lock (_users)
            if (_users.TryGetValue (id, out u))
                return u;
        u = RetrieveUser (id); // Метод для извлечения информации из базы данных
        lock (_users) _users [id] = u;
        return u;
    }
}
```

Для обеспечения безопасности в отношении потоков мы должны, как минимум, применить блокировку к чтению и обновлению словаря. В приведенном примере мы отдаем предпочтение практическому компромиссу между простотой и производительностью в блокировании. Наше проектное решение создает небольшой потенциал для неэффективности: если два потока одновременно вызовут данный метод с одним и тем же ранее не извлеченным идентификатором `id`, то метод `RetrieveUser` будет вызван дважды — и словарь обновится лишний раз. Одиночное блокирование всего метода могло бы предотвратить такую ситуацию, но породить серьезную неэффективность: на протяжении вызова `RetrieveUser` блокировался бы целый кеш и в это время другие потоки не могли бы извлекать информацию о любых пользователях.

Для идеального решения необходимо использовать стратегию, описанную в разделе “Синхронное завершение” главы 14. Вместо кеширования объекта `User` мы кешируем объект `Task<User>`, на котором вызывающий код организует ожидание:

```

static class UserCache
{
    static Dictionary <int, Task<User>> _userTasks =
        new Dictionary <int, Task<User>>();

    internal static Task<User> GetUserAsync (int id)
    {
        lock (_userTasks)
            if (_userTasks.TryGetValue (id, out var userTask))
                return userTask;
            else
                return _userTasks [id] = Task.Run (() => RetrieveUser (id));
    }
}

```

Обратите внимание, что теперь у нас есть единственная блокировка, которая охватывает логику целого метода. Мы можем поступать так без ущерба параллелизму, поскольку все, что делается внутри блокировки, связано с доступом в словарь и (потенциально) инициированием асинхронной операции (посредством вызова `Task.Run`). Если два потока вызовут этот метод одновременно с тем же самым идентификатором, то в итоге они будут ожидать ту же самую задачу, что как раз и является желательным исходом.

Неизменяемые объекты

Неизменяемым является такой объект, состояние которого не может быть модифицировано, ни внешне, ни внутренне. Поля в неизменяемом объекте обычно объявляются как предназначенные только для чтения и полностью инициализируются во время его конструирования.

Неизменяемость является признаком функционального программирования, где вместо изменения существующего объекта создается новый объект с отличающимися свойствами. Указанной парадигме следует язык LINQ. Неизменяемость также полезна в случае многопоточности — она позволяет избежать проблемы допускающего запись совместно используемого состояния, устранивая (или сводя к минимуму) возможность записи.

Один из шаблонов предусматривает применение неизменяемых объектов для инкапсуляции группы связанных полей, чтобы снизить до минимума продолжительность действия блокировок. В качестве очень простого примера предположим, что имеются два следующих поля:

```

int _percentComplete;
string _statusMessage;

```

Пусть их необходимо читать и записывать атомарным образом. Вместо применения блокировки к этим полям мы можем определить неизменяемый класс, как показано ниже:

```

class ProgressStatus // Представляет ход некоторого действия
{
    public readonly int PercentComplete;
    public readonly string StatusMessage;
    // Этот класс может иметь намного больше полей...
}

```

```
public ProgressStatus (int percentComplete, string statusMessage)
{
    PercentComplete = percentComplete;
    StatusMessage = statusMessage;
}
```

Затем можно определить одиночное поле такого типа вместе с объектом блокировки:

```
readonly object _statusLocker = new object();
ProgressStatus _status;
```

Теперь значения типа `ProgressStatus` можно читать и записывать, не удерживая блокировку для чего-то большего, чем одиночное присваивание:

```
var status = new ProgressStatus (50, "Working on it");
// Здесь можно было бы выполнять присваивание многих других полей...
// ...
lock (_statusLocker) _status = status; // Очень короткая блокировка
```

Чтобы прочитать объект, мы сначала получаем копию ссылки на него (внутри блокировки). Затем мы можем читать его значения без необходимости в удержании блокировки:

```
ProgressStatus status;
lock (_statusLocker) status = _status; // И снова короткая блокировка
int pc = status.PercentComplete;
string msg = status.StatusMessage;
...
```

Немонопольное блокирование

Конструкции немонопольного блокирования предназначены для *ограничения параллелизма*. В этом разделе будут раскрыты семафоры и блокировки объектов чтения/записи, а также показано, как класс `SemaphoreSlim` может ограничивать параллелизм с помощью асинхронных операций.

Семафор

Семафор чем-то похож на ночной клуб с ограниченной вместительностью, за которой следит вышибала. Когда клуб переполнен, никто в него больше не сможет войти, и снаружи образуется очередь.

Счетчик семафора соответствует количеству мест в ночном клубе. *Освобождение семафора увеличивает счетчик*; обычно это происходит, когда кто-то покидает клуб (что соответствует освобождению ресурса), а также когда семафор инициализируется (для установки его начальной емкости). Можно также в любой момент вызвать `Release`, чтобы увеличить емкость.

Ожидание семафора *уменьшает* счетчик и обычно происходит до получения ресурса. Вызов `Wait` на семафоре, текущее значение счетчика которого больше 0, завершается немедленно.

Семафор может необязательно иметь максимальное значение счетчика, которое служит жестким ограничением. Увеличение счетчика сверх этого ограниче-

ния приводит к генерации исключения. При создании семафора вы указываете начальное значение счетчика (начальную емкость) и при необходимости максимальный предел.

Семафор с начальным значением счетчика, равным единице, подобен Mutex или lock за исключением того, что семафор не имеет “владельца” — он независим от потоков. Любой поток способен вызывать метод Release объекта Semaphore, тогда как в случае Mutex и lock освободить блокировку может только поток, который ее получил.



Существуют две функционально похожие версии данного класса: Semaphore и SemaphoreSlim. Последняя версия оптимизирована для удовлетворения требованиям низкой задержки, которые предъявляются параллельным программированием. Она также полезна при традиционном многопоточном программировании, т.к. позволяет указывать признак отмены во время ожидания (см. раздел “Отмена” в главе 14) и открывает доступ к методу WaitAsync для асинхронного программирования. Тем не менее, SemaphoreSlim не может использоваться для сигнализирования между процессами.

Класс Semaphore требует около одной микросекунды при вызове метода WaitOne или Release, а класс SemaphoreSlim — примерно одну десятую этого времени.

Семафоры могут оказаться удобными для ограничения параллелизма, предотвращая выполнение отдельной порции кода слишком большим количеством потоков. В следующем примере пять потоков пытаются войти в ночной клуб, который разрешает вход только трем потокам одновременно:

```
class TheClub // Никаких списков дверей!
{
    static SemaphoreSlim _sem = new SemaphoreSlim (3); //Вместительность равна 3
    static void Main()
    {
        for (int i = 1; i <= 5; i++) new Thread (Enter).Start (i);
    }

    static void Enter (object id)
    {
        Console.WriteLine (id + " wants to enter"); // Поток, желающий войти
        _sem.Wait();                                // Одновременно здесь
        Console.WriteLine (id + " is in!");           // могут находиться
        Thread.Sleep (1000 * (int) id);              // только три потока
        Console.WriteLine (id + " is leaving");
        _sem.Release();
    }
}
```

А так выглядит вывод:

```
1 wants to enter
1 is in!
2 wants to enter
```

```
2 is in!
3 wants to enter
3 is in!
4 wants to enter
5 wants to enter
1 is leaving
4 is in!
2 is leaving
5 is in!
```

Также допустимо создать семафор с начальным значением счетчика (емкости), равным 0, а затем вызвать `Release` для увеличения его счетчика. Следующие два семафора эквивалентны:

```
var semaphore1 = new SemaphoreSlim (3);
var semaphore2 = new SemaphoreSlim (0); semaphore2.Release (3);
```

Если объекту `Semaphore` назначено имя, тогда он может охватывать множество процессов тем же способом, что и `Mutex` (именованные объекты `Semaphore` доступны только в Windows, тогда как именованные объекты `Mutex` работают также и в средах Unix).

Асинхронные семафоры и блокировки

Блокировать оператор `await` не разрешено:

```
lock (_locker)
{
    await Task.Delay (1000); // Ошибка на этапе компиляции
    ...
}
```

Поступать так не имеет смысла, потому что блокировки удерживаются потоком, который обычно изменяется при возвращении из `await`. Кроме того, блокировки приводят к **блокированию**, а блокирование в течение потенциально длительного периода времени — это вовсе *не* та цель, к которой вы стремитесь, применяя асинхронные функции.

Однако иногда все-таки желательно выполнять асинхронные операции последовательно или ограничивать параллелизм так, чтобы одновременно выполнялось не более *n* операций. Например, возьмем веб-браузер, который должен выполнять асинхронные загрузки параллельно: он может наложить ограничение, которое устанавливает максимальное количество одновременных загрузок равным 10. Достичь цели можно с использованием объекта `SemaphoreSlim`:

```
SemaphoreSlim _semaphore = new SemaphoreSlim (10);
async Task<byte[]> DownloadWithSemaphoreAsync (string uri)
{
    await _semaphore.WaitAsync();
    try { return await new WebClient ().DownloadDataTaskAsync (uri); }
    finally { _semaphore.Release(); }
}
```

Уменьшение значения `initialCount` семафора до 1 снижает максимальный параллелизм до единицы, превращая все в асинхронную блокировку.

Написание расширяющего метода EnterAsync

Следующий расширяющий метод упрощает асинхронное применение объекта `SemaphoreSlim` за счет использования класса `Disposable`, который был написан в разделе “Анонимное освобождение” главы 12:

```
public static async Task<IDisposable> EnterAsync (this SemaphoreSlim ss)
{
    await ss.WaitAsync().ConfigureAwait (false);
    return Disposable.Create (() => ss.Release());
}
```

С помощью метода `EnterAsync` мы можем переделать метод `DownloadWithSemaphoreAsync`, как показано ниже:

```
async Task<byte[]> DownloadWithSemaphoreAsync (string uri)
{
    using (await _semaphore.EnterAsync())
        return await new WebClient().DownloadDataTaskAsync (uri);
}
```

Parallel.ForEachAsync

Начиная с версии .NET 6, доступен еще один подход к ограничению асинхронного параллелизма, предусматривающий использование метода `Parallel.ForEachAsync`. Предполагая, что в массиве `uris` находятся URI, подлежащие загрузке, вот как можно загрузить их параллельно, ограничивая при этом параллелизм максимум десятью параллельными загрузками:

```
await Parallel.ForEachAsync (uris,
    new ParallelOptions { MaxDegreeOfParallelism = 10 },
    async (uri, cancelToken) =>
{
    var download = await new HttpClient().GetByteArrayAsync (uri);
    Console.WriteLine ($"Downloaded {download.Length} bytes");
});
```

Остальные методы класса `Parallel` предназначены для сценариев параллельного программирования (связанных с вычислениями), которые будут описаны в главе 22.

Блокировки объектов чтения/записи

Довольно часто экземпляры типа являются безопасными в отношении потоков для параллельных операций чтения, но не для параллельных обновлений (и не для параллельных операций чтения с обновлением). Это также может быть верным для ресурсов, подобных файлам. Хотя защита экземпляров таких типов посредством простой монопольной блокировки для всех режимов доступа обычно требует ухищрений, она может чрезмерно ограничить параллелизм, когда существует много операций чтения и только несколько операций обновления. Примером, когда такая ситуация может возникнуть, является сервер бизнес-приложений, где часто используемые данные кешируются в статических полях с целью их быстрого извлечения. Класс `ReaderWriterLockSlim` предназначен для обеспечения блокирования с максимальной доступностью именно в таких сценариях.



Класс `ReaderWriterLockSlim` представляет собой замену более старого “тяжеловесного” класса `ReaderWriterLock`. Класс `ReaderWriterLock` обладает похожей функциональностью, но он в несколько раз медленнее и содержит внутреннюю проектную ошибку в механизме, который отвечает за обработку повышений уровня блокировок.

Тем не менее, по сравнению с обычным оператором `lock` (`Monitor.Enter/Monitor.Exit`) класс `ReaderWriterLockSlim` все равно работает в два раза медленнее. Компромиссом является меньшая степень соперничества (когда производится много операций чтения и минимум операций записи).

С обоими классами связаны два базовых вида блокировок — блокировка чтения и блокировка записи:

- блокировка записи является универсально монопольной;
- блокировка чтения совместима с другими блокировками чтения.

Следовательно, поток, удерживающий блокировку записи, блокирует все другие потоки, которые пытаются получить блокировку чтения или записи (и наоборот). Но если потоки, удерживающие блокировку записи, отсутствуют, тогда параллельно получить блокировку чтения может любое количество потоков.

В классе `ReaderWriterLockSlim` определены методы для получения и освобождения блокировок чтения/записи:

```
public void EnterReadLock();
public void ExitReadLock();
public void EnterWriteLock();
public void ExitWriteLock();
```

В добавок есть версии `Try` всех методов `EnterXXX`, которые принимают аргументы тайм-аута в стиле метода `Monitor.TryEnter` (тайм-ауты могут происходить довольно часто, если ресурс подвержен серьезному соперничеству). Класс `ReaderWriterLock` предлагает аналогичные методы, именуемые `AcquireXXX` и `ReleaseXXX`. Когда случается тайм-аут, вместо возвращения `false` они генерируют исключение `ApplicationException`.

В приведенной далее программе демонстрируется применение класса `ReaderWriterLockSlim`. Три потока постоянно выполняют перечисление списка, в то время как два других потока каждые 100 мс добавляют в список случайное число. Блокировка чтения защищает потоки, читающие список, а блокировка записи — потоки, выполняющие запись в список.

```
class SlimDemo
{
    static ReaderWriterLockSlim _rw = new ReaderWriterLockSlim();
    static List<int> _items = new List<int>();
    static Random _rand = new Random();

    static void Main()
    {
        new Thread (Read).Start();
    }

    static void Read()
    {
        _rw.EnterReadLock();
        foreach (int item in _items)
        {
            Console.WriteLine(item);
        }
        _rw.ExitReadLock();
    }

    static void Write()
    {
        _rw.EnterWriteLock();
        int item = _rand.Next(1, 100);
        _items.Add(item);
        _rw.ExitWriteLock();
    }
}
```

```

new Thread (Read).Start();
new Thread (Read).Start();

new Thread (Write).Start ("A");
new Thread (Write).Start ("B");
}

static void Read()
{
    while (true)
    {
        _rw.EnterReadLock();
        foreach (int i in _items) Thread.Sleep (10);
        _rw.ExitReadLock();
    }
}

static void Write (object threadID)
{
    while (true)
    {
        int newNumber = GetRandNum (100);
        _rw.EnterWriteLock();
        _items.Add (newNumber);
        _rw.ExitWriteLock();
        Console.WriteLine ("Thread " + threadID + " added " + newNumber);
        Thread.Sleep (100);
    }
}

static int GetRandNum (int max) { lock (_rand) return _rand.Next (max); }
}

```



В производственный код обычно будут добавляться блоки `try/finally`, гарантирующие освобождение блокировок в случае генерации исключения.

Вот результат:

```

Thread B added 61
Thread A added 83
Thread B added 55
Thread A added 33
...

```

Класс `ReaderWriterLockSlim` делает возможным действие `Read` с большей степенью параллелизма, чем простая блокировка. Это можно проиллюстрировать помещением следующей строки в начало цикла `while` внутри метода `Write`:

```
Console.WriteLine (_rw.CurrentReadCount + " concurrent readers");
```

Данная строка почти всегда будет сообщать о наличии трех параллельных читающих потоков (большую часть своего времени методы `Read` тратят внутри циклов `foreach`). Помимо `CurrentReadCount` класс `ReaderWriterLockSlim` предлагает следующие свойства для слежения за блокировками:

```
public bool IsReadLockHeld          { get; }
public bool IsUpgradeableReadLockHeld { get; }
public bool IsWriteLockHeld         { get; }

public int WaitingReadCount        { get; }
public int WaitingUpgradeCount     { get; }
public int WaitingWriteCount       { get; }

public int RecursiveReadCount      { get; }
public int RecursiveUpgradeCount   { get; }
public int RecursiveWriteCount     { get; }
```

БЛОКИРОВКИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ

Иногда в одиночной атомарной операции блокировку чтения удобно заменять блокировкой записи. Например, предположим, что вы хотите добавлять элемент в список, только если этот элемент в списке отсутствует. В идеальном случае желательно минимизировать время, затрачиваемое на удержание (монархической) блокировки записи, а потому можно поступить так, как описано ниже.

1. Получить блокировку чтения.
2. Проверить, существует ли элемент в списке; если он существует, тогда освободить блокировку и произвести возврат.
3. Освободить блокировку чтения.
4. Получить блокировку записи.
5. Добавить элемент.

Проблема в том, что между шагом 3 и шагом 4 может проскользнуть другой поток и модифицировать список (например, добавив тот же самый элемент). Класс `ReaderWriterLockSlim` решает такую проблему через блокировку третьего вида, которая называется **блокировкой с возможностью повышения уровня**. Блокировка с возможностью повышения уровня похожа на блокировку чтения за исключением того, что позже она может быть повышена до уровня блокировки записи в атомарной операции. Вот как ее использовать.

1. Вызвать метод `EnterUpgradeableReadLock`.
2. Выполнить действия, связанные с чтением (например, проверить, существует ли элемент в списке).
3. Вызвать метод `EnterWriteLock` (что преобразует блокировку с возможностью повышения уровня в блокировку записи).
4. Выполнить действия, связанные с записью (например, добавить элемент в список).
5. Вызвать метод `ExitWriteLock` (что преобразует блокировку записи обратно в блокировку с возможностью повышения уровня).
6. Выполнить любые другие действия, связанные с чтением.
7. Вызвать метод `ExitUpgradeableReadLock`.

С точки зрения вызывающего кода все довольно похоже на вложенное или рекурсивное блокирование. Тем не менее, функционально на третьем шаге

`ReaderWriterLockSlim` освобождает блокировку чтения и получает новую блокировку записи атомарным образом.

Между блокировками с возможностью повышения уровня и блокировками чтения имеется еще одно важное отличие. Несмотря на то что блокировка с возможностью повышения уровня способна сосуществовать с любым количеством блокировок чтения, в каждый момент времени может быть получена только одна блокировка с возможностью повышения уровня. Это предотвращает взаимоблокировки преобразований за счет сериализации соперничающих преобразований — почти как в случае блокировок обновлений в SQL Server:

SQL Server	<code>ReaderWriterLockSlim</code>
Совместно используемая блокировка	Блокировка чтения
Монопольная блокировка	Блокировка записи
Блокировка обновления	Блокировка с возможностью повышения уровня

Мы можем продемонстрировать работу блокировки с возможностью повышения уровня, изменив метод `Write` из предыдущего примера так, чтобы он добавлял в список число, только если оно в нем отсутствует:

```
while (true)
{
    int newNumber = GetRandNum (100);
    _rw.EnterUpgradeableReadLock ();
    if (!_items.Contains (newNumber))
    {
        _rw.EnterWriteLock ();
        _items.Add (newNumber);
        _rw.ExitWriteLock ();
        Console.WriteLine ("Thread " + threadID + " added " + newNumber);
    }
    _rw.ExitUpgradeableReadLock ();
    Thread.Sleep (100);
}
```



Класс `ReaderWriterLock` также может выполнять преобразования блокировок, но ненадежно, потому что он не поддерживает концепцию блокировок с возможностью повышения уровня. Именно поэтому проектировщикам класса `ReaderWriterLockSlim` пришлось начинать полностью с нового класса.

Рекурсия блокировок

Обычно вложенное или рекурсивное блокирование с участием класса `ReaderWriterLockSlim` запрещено. Таким образом, следующий код генерирует исключение:

```
var rw = new ReaderWriterLockSlim();
rw.EnterReadLock();
rw.EnterReadLock();
rw.ExitReadLock();
rw.ExitReadLock();
```

Однако он выполнится без ошибок, если объект `ReaderWriterLockSlim` конструируется так:

```
var rw = new ReaderWriterLockSlim (LockRecursionPolicy.SupportsRecursion);
```

Это гарантирует, что рекурсивное блокирование может произойти, только если оно запланировано. Рекурсивное блокирование может создать нежелательную сложность, т.к. появляется возможность получить более одного вида блокировок:

```
rw.EnterWriteLock();
rw.EnterReadLock();
Console.WriteLine (rw.IsReadLockHeld);    // True
Console.WriteLine (rw.IsWriteLockHeld);   // True
rw.ExitReadLock();
rw.ExitWriteLock();
```

Базовое правило гласит, что после получения блокировки последующие рекурсивные блокировки могут быть меньше, но не больше следующей шкалы:

Блокировка чтения → Блокировка с возможностью повышения уровня → Блокировка записи

Тем не менее, запрос на повышение блокировки с возможностью повышения уровня до блокировки записи законен всегда.

Сигнализирование с помощью дескрипторов ожидания событий

Простейшая разновидность сигнализирующих конструкций называется *дескрипторами ожидания событий* (они никак не связаны с событиями C#). Дескрипторы ожидания событий поступают в трех формах: `AutoResetEvent`, `ManualResetEvent` (`ManualResetEventSlim`) и `CountdownEvent`. Первые две формы основаны на общем классе `EventWaitHandle`, от которого происходит вся их функциональность.

AutoResetEvent

Класс `AutoResetEvent` похож на турникет: вставка билета позволяет пройти в точности одному человеку. Наличие слова “Auto” в имени класса отражает тот факт, что открытый турникет автоматически закрывается, или “сбрасывается”, после того, как кто-то через него прошел. Поток ожидает, или блокируется, на турникете вызовом метода `WaitOne` (ожидает до тех пор, пока этот “один” турникет не откроется), а билет вставляется вызовом метода `Set`. Если метод `WaitOne` вызван несколькими потоками, тогда перед турникетом выстраивается очередь². Билет может поступать из любого потока; другими словами, любой (неблокированный) поток с доступом к объекту `AutoResetEvent` может вызвать на нем метод `Set` для освобождения одного заблокированного потока.

² Как и в случае блокировок, равноправие в такой очереди временами может нарушаться из-за нюансов поведения операционной системы.

Создать объект AutoResetEvent можно двумя способами. Первый из них — применение конструктора:

```
var auto = new AutoResetEvent (false);
```

(Передача конструктору значения true эквивалентна немедленному вызову метода Set на результирующем объекте.) Второй способ создания объекта AutoResetEvent выглядит следующим образом:

```
var auto = new EventWaitHandle (false, EventResetMode.AutoReset);
```

В приведенном далее примере запускается поток, работа которого заключается в том, чтобы просто ожидать, пока он не будет сигнализирован другим потоком (рис. 21.1):

```
class BasicWaitHandle
{
    static EventWaitHandle _waitHandle = new AutoResetEvent (false);
    static void Main()
    {
        new Thread (Waiter).Start();
        Thread.Sleep (1000);                                // Пауза в течение секунды...
        _waitHandle.Set();                                 // Пробудить Waiter.
    }
    static void Waiter()
    {
        Console.WriteLine ("Waiting...");                  // Ожидание...
        _waitHandle.WaitOne();                            // Ожидание уведомления
        Console.WriteLine ("Notified");                   // Уведомлен
    }
}
```

Вот вывод:

Waiting... (пауза) Notified.

Если метод Set вызван, когда нет ни одного ожидающего потока, то дескриптор остается открытым до тех пор, пока он не дождется вызова метода WaitOne каким-либо потоком. Такое поведение помогает избежать состязаний между потоком, направляющимся к турникуту, и потоком, вставляющим билет.

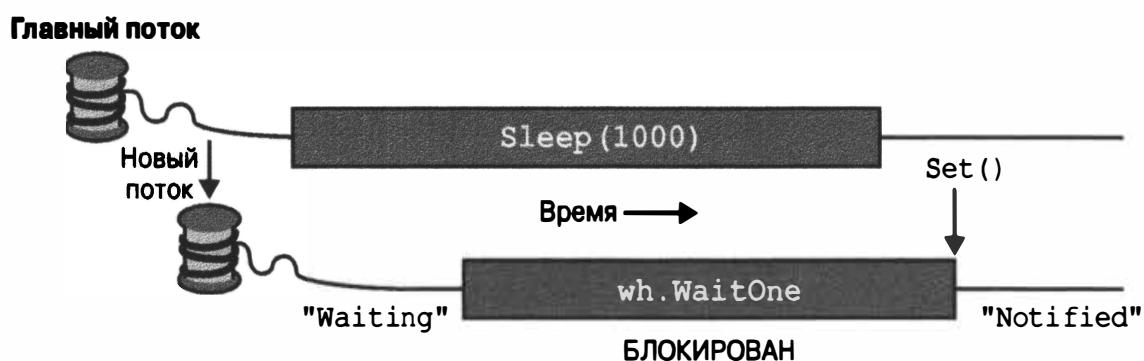


Рис. 21.1. Сигнализирование с помощью EventWaitHandle

Тем не менее, неоднократный вызов `Set` на турнике, перед которым никто не ожидает, не позволяет пройти целой компании, когда она соберется: пройти будет разрешено только следующему человеку, а дополнительные билеты растратятся впустую.

Освобождение дескрипторов ожидания

По завершении работы с дескриптором ожидания можно вызвать его метод `Close`, чтобы освободить ресурс ОС. В качестве альтернативы можно просто удалить все ссылки на дескриптор ожидания и позволить сборщику мусора сделать всю работу в какой-то момент позже (дескрипторы ожидания реализуют шаблон освобождения, в соответствии с которым финализатор вызывает метод `Close`). Это один из немногих сценариев, в которых вполне приемлемо полагаться на такой запасной вариант, потому что с дескрипторами ожидания связаны легковесные накладные расходы ОС.

Дескрипторы ожидания освобождаются автоматически, когда процесс завершается.

Вызов метода `Reset` на объекте `AutoResetEvent` закрывает турникет (если он был открыт) без ожидания или блокирования.

Метод `WaitOne` принимает дополнительный параметр тайм-аута, возвращая `false`, если ожидание закончилось по тайм-ауту, а не из-за получения сигнала.



Вызов метода `WaitOne` с тайм-аутом, равным 0, осуществляет проверку, является ли дескриптор ожидания “открытым”, не блокируя вызывающий поток. Однако помните, что такое действие сбросит объект `AutoResetEvent`, если он открыт.

Двунаправленное сигнализирование

Предположим, что главный поток должен сигнализировать рабочий поток три раза в какой-то строке. Если главный поток просто вызовет метод `Set` на дескрипторе ожидания несколько раз в быстрой последовательности, тогда второй или третий сигнал может потеряться, т.к. рабочему потоку необходимо время на обработку каждого сигнала.

Решение для главного потока предусматривает ожидание перед выдачей сигнала до тех пор, пока рабочий поток не будет готов, что можно сделать посредством еще одного объекта `AutoResetEvent`:

```
class TwoWaySignaling
{
    static EventWaitHandle _ready = new AutoResetEvent (false);
    static EventWaitHandle _go = new AutoResetEvent (false);
    static readonly object _locker = new object();
    static string _message;
    static void Main()
    {
        new Thread (Work).Start();
    }
```

```

    _ready.WaitOne(); // Сначала ожидать готовности рабочего потока
    lock (_locker) _message = "ooo";
    _go.Set(); // Сообщить рабочему потоку о начале продвижения
    _ready.WaitOne();
    lock (_locker) _message = "aah"; // Предоставить рабочему потоку
                                    // другое сообщение
    _go.Set();
    _ready.WaitOne();
    lock (_locker) _message = null; // Сигнализировать рабочий поток
                                    // о завершении
    _go.Set();
}

static void Work()
{
    while (true)
    {
        _ready.Set(); // Указать на готовность
        _go.WaitOne(); // Ожидать поступления сигнала...
        lock (_locker)
        {
            if (_message == null) return; // Аккуратно завершить
            Console.WriteLine (_message);
        }
    }
}
}
}

```

Вот вывод:

ooo
aah

На рис. 21.2 процесс представлен визуально.

Здесь сообщение null используется для указания на то, что рабочий поток должен завершиться. Для потоков, которые выполняются бесконечно, очень важно иметь стратегию завершения!

Главный
поток

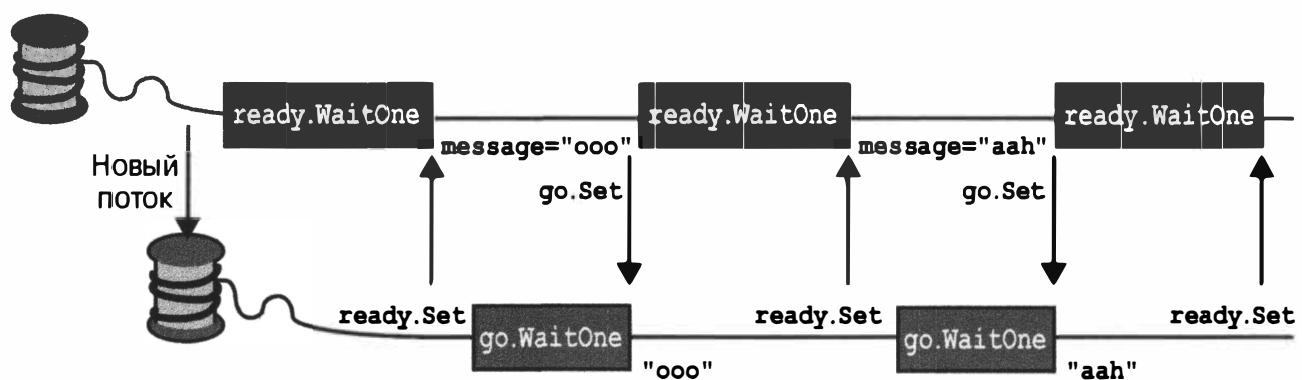


Рис. 21.2. Двунаправленное сигнализирование

ManualResetEvent

Как было описано в главе 14, объект ManualResetEvent функционирует подобно простым воротам. Вызов метода Set открывает ворота, позволяя *любому* количеству потоков вызывать WaitOne, чтобы получить разрешение пройти. Вызов метода Reset закрывает ворота. Потоки, которые вызывают WaitOne на закрытых воротах, блокируются; когда ворота откроются в следующий раз, все эти потоки будут одновременно освобождены. Помимо упомянутых отличий объект ManualResetEvent функционирует подобно объекту AutoResetEvent.

Как и AutoResetEvent, объект ManualResetEvent можно конструировать двумя способами:

```
var manual1 = new ManualResetEvent (false);
var manual2 = new EventWaitHandle (false, EventResetMode.ManualReset);
```



Доступна еще одна версия класса ManualResetEvent по имени ManualResetEventSlim. Она оптимизирована под краткие периоды ожидания — с возможностью выбора зацикливания для установленного количества итераций. Класс ManualResetEventSlim также имеет более эффективную управляемую реализацию и позволяет методу Wait быть отмененным через CancellationToken. Тем не менее, данный класс не может применяться для межпроцессного сигнализирования. Класс ManualResetEventSlim не является подклассом WaitHandle; однако он открывает доступ к свойству WaitHandle, которое возвращает основанный на WaitHandle объект (с профилем производительности традиционного дескриптора ожидания).

Сигнализирующие конструкции и производительность

Ожидание или сигнализирование AutoResetEvent либо ManualResetEvent занимают около одной микросекунды (при отсутствии блокирования).

Классы ManualResetEventSlim и CountdownEvent могут быть до 50 раз быстрее в сценариях с кратким ожиданием, поскольку они не зависят от ОС и благородно используют конструкции зацикливания. Тем не менее, в большинстве сценариев накладные расходы, связанные с самими сигнализирующими классами, не создают узких мест, поэтому они редко принимаются во внимание.

Класс ManualResetEvent удобен в предоставлении одному потоку возможности разблокировать множество других потоков. Обратный сценарий покрывается классом CountdownEvent.

CountdownEvent

Класс CountdownEvent позволяет организовать ожидание на нескольких потоках; он обладает эффективной и целиком управляемой реализацией. Для применения данного класса создайте его экземпляр с нужным количеством потоков, или “счетчиков”, на которых необходимо ожидать:

```
var countdown = new CountdownEvent (3);      // Инициализировать со
                                                // "счетчиком", равным 3
```

Вызов метода Signal декрементирует счетчик; вызов метода Wait приводит к блокированию до тех пор, пока счетчик не станет равным нулю:

```
new Thread (SaySomething).Start ("I am thread 1");
new Thread (SaySomething).Start ("I am thread 2");
new Thread (SaySomething).Start ("I am thread 3");
countdown.Wait();    // Блокируется до тех пор, пока Signal
                     // не будет вызван 3 раза
Console.WriteLine ("All threads have finished speaking!");
                     // Все потоки завершили взаимодействие
void SaySomething (object thing)
{
    Thread.Sleep (1000);
    Console.WriteLine (thing);
    countdown.Signal ();
}
```



Задачи, для решения которых эффективно использовать класс CountdownEvent, иногда удается решить более просто с применением конструкций *структурированного параллелизма*, которые будут рассматриваться в главе 22 (PLINQ и класс Parallel).

Повторно инкрементировать счетчик CountdownEvent можно вызовом метода AddCount. Однако если он уже достиг нуля, то такой вызов приведет к генерации исключения: “отменить сигнал” CountdownEvent вызовом метода AddCount нельзя. Чтобы устранить возможность возникновения исключения, можно вызвать метод TryAddCount, который возвращает false, если счетчик достиг нуля.

Для отмены сигнала CountdownEvent необходимо вызвать метод Reset: он и отменит сигнал, и сбросит счетчик в исходное значение.

Подобно ManualResetEventSlim класс CountdownEvent открывает свойство WaitHandle для сценариев, в которых какой-то другой класс или метод ожидает объект, основанный на WaitHandle.

Создание межпроцессного объекта EventWaitHandle

Конструктор EventWaitHandle позволяет “именовать” создаваемый объект EventWaitHandle, что дает ему возможность действовать в нескольких процессах. Имя — это просто строка, которая может иметь любое значение, не конфликтующее с именем какого-то другого объекта. Если указанное имя уже используется на данном компьютере, то вы получите ссылку на связанный с ним

объект EventWaitHandle; в противном случае ОС создаст новый объект. Ниже приведен пример:

```
EventWaitHandle wh = new EventWaitHandle (false, EventResetMode.AutoReset,
                                         @"Global\MyCompany.MyApp.SomeName");
```

Если данный код запускают два приложения, то они получат возможность сигнализировать друг друга: дескриптор ожидания будет работать для всех потоков в обоих процессах.

Именованные объекты EventWaitHandle доступны только в Windows.

Дескрипторы ожидания и продолжение

Вместо того чтобы ждать на дескрипторе ожидания (и тем самым блокировать поток), к нему можно присоединить “продолжение”, вызвав метод ThreadPool.RegisterWaitForSingleObject, который принимает делегат, выполняющийся, когда дескриптор ожидания сигнализирован:

```
var starter = new ManualResetEvent (false);
RegisteredWaitHandle reg = ThreadPool.RegisterWaitForSingleObject
    (starter, Go, "Some Data", -1, true);
Thread.Sleep (5000);
Console.WriteLine ("Signaling worker...");
starter.Set();
Console.ReadLine();
reg.Unregister (starter); // Произвести очистку, когда все сделано
void Go (object data, bool timedOut)
{
    Console.WriteLine ("Started - " + data);
    // Выполнить задачу...
}
```

Вот вывод:

```
(пятисекундная задержка)
Signaling worker...
Started - Some Data
```

Когда дескриптор ожидания сигнализируется (либо истекает время тайм-аута), делегат запускается в потоке из пула. Затем понадобится вызвать метод Unregister для освобождения неуправляемого дескриптора обратного вызова.

В дополнение к дескриптору ожидания и делегату метод RegisterWaitForSingleObject принимает объект “черного ящика”, который передается методу делегата (подобно ParameterizedThreadStart), а также длительность тайм-аута в миллисекундах (-1 означает отсутствие тайм-аута) и булевский флаг, указывающий, является запрос одноразовым или повторяющимся.



Надежно вызывать RegisterWaitForSingleObject можно только один раз на дескриптор ожидания. Повторный вызов этого метода на том же самом дескрипторе ожидания приводит к перемежающемуся отказу, из-за чего несигнализированный дескриптор ожидания инициирует обратный вызов, как если бы он был сигнализирован.

По причине такого ограничения дескрипторы ожидания (не Slim) плохо подходят для асинхронного программирования.

WaitAny, WaitAll и SignalAndWait

В дополнение к методам Set, WaitOne и Reset в классе WaitHandle определены статические методы, предназначенные для решения более сложных задач синхронизации. Методы WaitAny, WaitAll и SignalAndWait выполняют операции сигнализирования и ожидания на множестве дескрипторов. Дескрипторы ожидания могут быть разных типов (в том числе Mutex и Semaphore, поскольку они также являются производными от абстрактного класса WaitHandle). Классы ManualResetEventSlim и CountdownEvent также могут принимать участие в указанных методах через свои свойства WaitHandle.



Методы WaitAll и SignalAndWait имеют странную связь с унаследованной архитектурой COM: они требуют, чтобы вызывающий поток находился в многопоточном апартаменте — модель, меньше всего подходящая для взаимодействия. Например, в таком режиме главный поток приложения WPF или Windows Forms не может взаимодействовать с буфером обмена. Вскоре мы обсудим доступные альтернативы.

Метод WaitHandle.WaitAny ожидает любой дескриптор ожидания из массива таких дескрипторов, а метод WaitHandle.WaitAll ожидает все указанные дескрипторы атомарным образом. Это означает, что в случае ожидания двух объектов AutoResetEvent:

- метод WaitAny никогда не закончится “зашелкиванием” обоих событий;
- метод WaitAll никогда не закончится “зашелкиванием” только одного события.

Метод SignalAndWait вызывает Set на WaitHandle и затем WaitOne на другом WaitHandle. После сигнализирования первого дескриптора произойдет переход в начало очереди в ожидании второго дескриптора, что помогает ему двигаться вперед (хотя операция не является по-настоящему атомарной). Можете думать об этом методе, как о “подменяющем” один сигнал другим, и применять его на паре объектов EventWaitHandle для настройки двух потоков на randevu, или “встречу”, в одной и той же точке во времени. Такой трюк будет предпринимать либо AutoResetEvent, либо ManualResetEvent. Первый поток выполняет следующий вызов:

```
WaitHandle.SignalAndWait (wh1, wh2);
```

Второй поток делает противоположное:

```
WaitHandle.SignalAndWait (wh2, wh1);
```

Альтернативы методам WaitAll и SignalAndWait

Методы WaitAll и SignalAndWait не будут запускаться в однопоточном апартаменте. К счастью, существуют альтернативы. В случае SignalAndWait редко когда требуется его семантика перехода в начало очереди: скажем, в примере с randevu было бы допустимо просто вызвать Set на первом дескрипторе ожидания и затем WaitOne на втором, если дескрипторы ожидания использо-

вались исключительно для этого randevu. В следующем разделе мы рассмотрим еще один вариант реализации randevu потоков.

В случае методов `WaitAny` и `WaitAll`, если атомарность не нужна, то код, написанный в предыдущем разделе, можно применить для преобразования дескрипторов ожидания в задачи, после чего использовать методы `Task.WhenAny` и `Task.WhenAll` (см. главу 14).

Когда атомарность необходима, можно принять низкоуровневый подход к сигнализированию и самостоятельно написать логику с применением методов `Wait` и `Pulse` класса `Monitor`. Методы `Wait` и `Pulse` детально описаны в статье по ссылке <http://albahari.com/threading/>.

Класс `Barrier`

Класс `Barrier` реализует *барьер выполнения потоков*, позволяя множеству потоков организовать randevu в какой-то момент времени (не путайте его с методом `Thread.MemoryBarrier`). Класс `Barrier` отличается высокой скоростью и эффективностью, а построен он на основе `Wait`, `Pulse` и блокировок на базе счетчиков. Для использования класса `Barrier` потребуется выполнить следующие действия.

1. Создать его экземпляр, указав количество потоков, которые должны принять участие в randevu (позже их число можно изменить, вызывая методы `AddParticipants` и `RemoveParticipants`).
2. Заставить каждый поток вызвать метод `SignalAndWait`, когда он желает участвовать в randevu.

Создание экземпляра `Barrier` со значением 3 приводит к блокированию вызова `SignalAndWait` до тех пор, пока данный метод не будет вызван три раза. Затем все начинается заново: вызов `SignalAndWait` снова блокируется, пока таких вызовов не станет три. Это сохраняет каждый поток синхронным с любым другим потоком.

В приведенном далее примере каждый из трех потоков выводит числа от 0 до 4, не отставая от других потоков:

```
var barrier = new Barrier (3);

new Thread (Speak) .Start ();
new Thread (Speak) .Start ();
new Thread (Speak) .Start ();
void Speak()
{
    for (int i = 0; i < 5; i++)
    {
        Console.Write (i + " ");
        barrier.SignalAndWait();
    }
}
```

Вот вывод:

```
0 0 0 1 1 1 2 2 2 3 3 3 4 4 4
```

По-настоящему полезная характеристика Barrier связана с возможностью указывать во время создания экземпляра также действие, выполняемое после каждой фазы. Такое действие представлено в виде делегата, который запускается после того, как метод SignalAndWait будет вызван *n* раз, но перед тем, как потоки деблокируются (как показано в затененной области на рис. 21.3). Если в рассматриваемом примере создать барьер следующим образом:

```
static Barrier _barrier = new Barrier(3, barrier => Console.WriteLine());
```

то вывод будет выглядеть так:

```
0 0 0
1 1 1
2 2 2
3 3 3
4 4 4
```

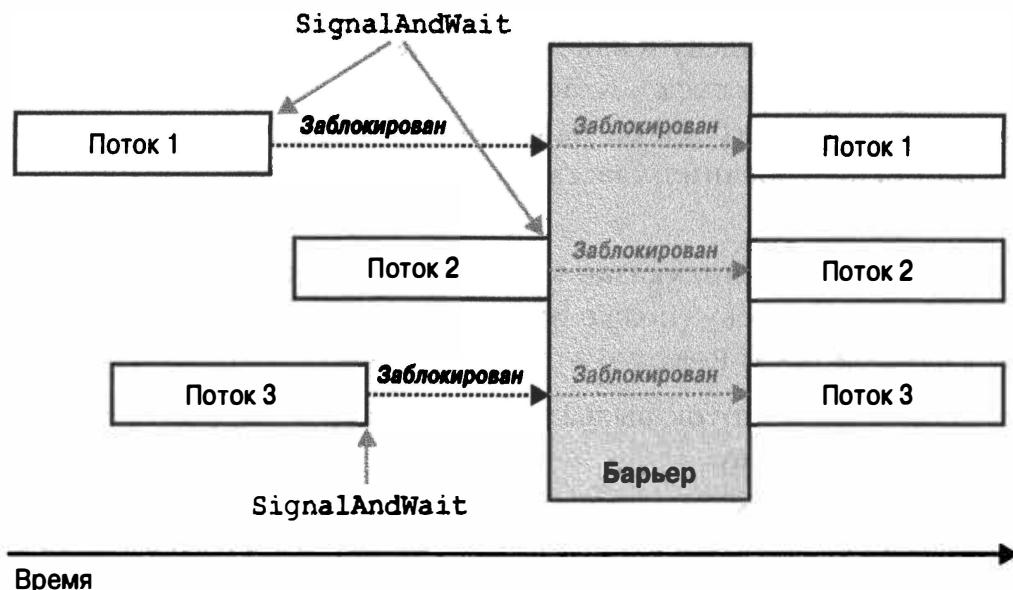


Рис. 21.3. Барьер

Действие, выполняемое после каждой фазы, может быть удобно для объединения данных из каждого рабочего потока. Беспокоиться о вытеснении не придется, потому что во время выполнения данного действия все рабочие потоки заблокированы.

Ленивая инициализация

Частой проблемой в области многопоточности является определение способа ленивой инициализации совместно используемого поля в манере, безопасной к потокам. Такая потребность возникает при наличии поля, которое относится к типу, затратному в плане конструирования:

```
class Foo
{
    public readonly Expensive Expensive = new Expensive();
    ...
}

class Expensive { /* Предположим, что это является затратным
    в конструировании */ }
```

Проблема с показанным кодом заключается в том, что создание экземпляра Foo оказывает влияние на производительность из-за создания экземпляра класса Expensive, причем независимо от того, будет позже осуществляться доступ к полю Expensive или нет. Очевидное решение предусматривает конструирование экземпляра *по требованию*:

```
class Foo
{
    Expensive _expensive;
    public Expensive Expensive // Ленивое создание экземпляра Expensive
    {
        get
        {
            if (_expensive == null) _expensive = new Expensive();
            return _expensive;
        }
    }
    ...
}
```

Здесь возникает вопрос: является ли такой код безопасным в отношении потоков? Оставив в стороне тот факт, что доступ к _expensive производится за пределами блокировки без барьера памяти, давайте подумаем, что произойдет, если два потока обратятся к данному свойству одновременно. Они оба могут дать true в условии оператора if, и каждый поток в конечном итоге получит *отличающийся* экземпляр Expensive. Поскольку это может привести к возникновению тонких ошибок, в общем можно было бы сказать, что код не является безопасным к потокам.

Упомянутая проблема решается применением блокировки к коду проверки и инициализации объекта:

```
Expensive _expensive;
readonly object _expenseLock = new object();

public Expensive Expensive
{
    get
    {
        lock (_expenseLock)
        {
            if (_expensive == null) _expensive = new Expensive();
            return _expensive;
        }
    }
}
```

Lazy<T>

Класс Lazy<T> помогает обеспечивать ленивую инициализацию. В случае создания его экземпляра с аргументом true он реализует только что описанный шаблон инициализации, безопасной в отношении потоков.



Класс Lazy<T> на самом деле реализует микрооптимизированную версию этого шаблона, которая называется *блокированием с двойным контролем*. Блокирование с двойным контролем выполняет дополнительное временное (volatile) чтение, чтобы избежать затрат на получение блокировки, если объект уже инициализирован.

Для использования Lazy<T> создайте его экземпляр с делегатом фабрики значений, который сообщает, каким образом инициализировать новое значение, и аргументом true. Затем получайте доступ к его значению через свойство Value:

```
Lazy<Expensive> _expensive = new Lazy<Expensive>
    (() => new Expensive(), true);
public Expensive Expensive { get { return _expensive.Value; } }
```

Если конструктору класса Lazy<T> передать false, тогда он реализует шаблон ленивой инициализации, небезопасной к потокам, который был описан в начале настоящего раздела — это имеет смысл, когда класс Lazy<T> необходимо применять в однопоточном контексте.

LazyInitializer

LazyInitializer — статический класс, который работает в точности как Lazy<T> за исключением перечисленных ниже моментов.

- Его функциональность открыта через статический метод, который оперирует прямо на поле вашего типа, что позволяет избежать дополнительного уровня косвенности, улучшая производительность в ситуациях, когда нужна высшая степень оптимизации.
- Он предлагает другой режим инициализации, при котором множество потоков могут состязаться за инициализацию.

Чтобы использовать класс LazyInitializer, перед доступом к полю необходимо вызвать его метод EnsureInitialized, передав ему ссылку на поле и фабричный делегат:

```
Expensive _expensive;
public Expensive Expensive
{
    get // Реализовать блокирование с двойным контролем
    {
        LazyInitializer.EnsureInitialized (ref _expensive,
            () => new Expensive());
        return _expensive;
    }
}
```

Можно также передать еще один аргумент, чтобы запросить *состязание* за инициализацию конкурирующих потоков. Это звучит подобно исходному небезопасному к потокам примеру, исключая то, что первый пришедший к финишу поток всегда выигрывает — и потому в конечном итоге остается только один экземпляр. Преимущество такого приема связано с тем, что

он даже быстрее (на многоядерных процессорах), чем блокирование с двойным контролем. Причина в том, что он может быть реализован полностью без блокировок с применением расширенных технологий, которые описаны в разделах “Nonblocking Synchronization” (“Неблокирующая синхронизация”) и “Lazy Initialization” (“Ленивая инициализация”) в статье по ссылке <http://albahari.com/threading/>. Это предельная (и редко востребованная) степень оптимизации, за которую придется заплатить определенную цену, как описано ниже.

- Такой подход будет медленнее, когда потоков, состязающихся за инициализацию, оказывается больше, чем ядер процессора.
- Потенциально он приводит к непроизводительным расходам ресурсов центрального процессора на выполнение избыточной инициализации.
- Логика инициализации обязана быть безопасной к потокам (в рассмотренном выше примере она может стать небезопасной к потокам, если конструктор `Expensive` будет производить запись в статические поля).
- Если инициализатор создает объект, требующий освобождения, то ставший “ненужным” такой объект не сможет быть освобожден без написания дополнительной логики.

Локальное хранилище потока

Большая часть главы сосредоточена на конструкциях синхронизации и проблемах, возникающих из-за наличия у потоков возможности параллельного доступа к одним и тем же данным. Однако иногда данные должны храниться изолированно, гарантируя тем самым, что каждый поток имеет их отдельную копию. Именно этого позволяют добиться локальные переменные, но они пригодны только для переходных данных.

Решением является *локальное хранилище потока*. Здесь может возникнуть затруднение с пониманием требования: данные, которые вы хотели бы сохранить изолированными в потоке, как правило, являются переходными по своей природе. Основное использование локального хранилища касается хранения “внешних” данных, с помощью которых осуществляется поддержка инфраструктуры пути выполнения, такой как обмен сообщениями, транзакция и маркеры безопасности. Передача подобного рода данных в параметрах методов может оказаться неудобным и чуждым приемом для всех методов кроме написанных лично вами. С другой стороны, хранение такой информации в обычных статических полях означает ее совместное использование всеми потоками.

Локальное хранилище потока может также быть полезным при оптимизации параллельного кода. Оно позволяет каждому потоку иметь монопольный доступ к собственной версии объекта, небезопасного к потокам, без необходимости в блокировке — и без потребности в воссоздании этого объекта между вызовами методов.

Существуют четыре способа реализации локального хранилища потока, которые обсуждаются в последующих разделах.

[ThreadStatic]

Простейший подход к реализации локального хранилища потока предусматривает пометку статического поля с помощью атрибута [ThreadStatic]:

```
[ThreadStatic] static int _x;
```

После этого каждый поток будет видеть отдельную копию `_x`.

К сожалению, атрибут [ThreadStatic] не работает с полями экземпляра (он просто ничего не делает), а также не сочетается нормально с инициализаторами полей — в функционирующем потоке они выполняются только один раз, когда запускается статический конструктор. Если необходимо работать с полями экземпляра или начать с нестандартного значения, то более подходящим вариантом является `ThreadLocal<T>`.

ThreadLocal<T>

Класс `ThreadLocal<T>` предоставляет локальное хранилище потока для статических полей и для полей экземпляра, а также позволяет указывать стандартные значения.

Вот как создать объект `ThreadLocal<int>` со стандартным значением 3 для каждого потока:

```
static ThreadLocal<int> _x = new ThreadLocal<int> () => 3;
```

Далее для получения или установки значения, локального для потока, применяется свойство `Value` объекта `_x`. Дополнительным преимуществом использования `ThreadLocal` является ленивая оценка значений: фабричная функция оценивается только при первом ее вызове (для каждого потока).

ThreadLocal<T> и поля экземпляра

Класс `ThreadLocal<T>` также удобен при работе с полями экземпляра и захваченными локальными переменными. Например, рассмотрим задачу генерации случайных чисел в многопоточной среде. Класс `Random` не является безопасным в отношении потоков, поэтому мы должны либо применять блокировку вокруг кода, использующего `Random` (ограничивая степень параллелизма), либо генерировать отдельный объект `Random` для каждого потока. Класс `ThreadLocal<T>` делает второй подход простым:

```
var localRandom = new ThreadLocal<Random> () => new Random () ;
Console.WriteLine (localRandom.Value.Next());
```

Указанная фабричная функция, создающая объект `Random`, несколько упрощена, т.к. конструктор без параметров класса `Random` при выборе начального значения для генерации случайных чисел полагается на системные часы. Начальные значения могут оказаться одинаковыми для двух объектов `Random`, созданных внутри приблизительно 10 мс промежутка времени. Ниже продемонстрирован один из способов решения проблемы:

```
var localRandom = new ThreadLocal<Random>
( () => new Random (Guid.NewGuid().GetHashCode()) );
```

Мы будем использовать такой прием в главе 22 (см. пример параллельной программы проверки орфографии в разделе “PLINQ”).

GetData и SetData

Третий подход предполагает применение двух методов класса Thread: GetData и SetData. Они сохраняют данные в “ячейках”, специфичных для потока. Метод Thread.GetData выполняет чтение из изолированного хранилища данных потока, а метод Thread.SetData осуществляет запись в него. Оба метода требуют объекта LocalDataStoreSlot для идентификации ячейки. Одна и та же ячейка может использоваться во всех потоках, но они по-прежнему будут получать отдельные значения. Ниже приведен пример:

```
class Test
{
    //Один и тот же объект LocalDataStoreSlot может использоваться во всех потоках
    LocalDataStoreSlot _secSlot = Thread.GetNamedDataSlot ("securityLevel");

    // Это свойство имеет отдельное значение в каждом потоке.
    int SecurityLevel
    {
        get
        {
            object data = Thread.GetData (_secSlot);
            return data == null ? 0 : (int) data; // null == не инициализировано
        }
        set { Thread.SetData (_secSlot, value); }
    }
    ...
}
```

В показанном примере мы вызываем метод Thread.GetNamedDataSlot, который создает именованную ячейку — это позволяет разделять данную ячейку в рамках всего приложения. В качестве альтернативы можно самостоятельно управлять областью видимости ячейки посредством неименованной ячейки, получаемой с помощью вызова метода Thread.AllocateDataSlot:

```
class Test
{
    LocalDataStoreSlot _secSlot = Thread.AllocateDataSlot();
    ...
}
```

Метод Thread.FreeNamedDataSlot освободит именованную ячейку данных во всех потоках, но только если все ссылки на объект LocalDataStoreSlot покинули области видимости и были обработаны сборщиком мусора. Это гарантирует, что потоки не потеряют свои ячейки данных, т.к. они хранят ссылку на соответствующий объект LocalDataStoreSlot, пока ячейка нужна.

AsyncLocal<T>

Рассмотренные до сих пор подходы к реализации локального хранилища потока несовместимы с асинхронными функциями, потому что после await выполнение может возобновиться в другом потоке. Проблему решает класс AsyncLocal<T> за счет предохранения своего значения через await:

```

static AsyncLocal<string> _asyncLocalTest = new AsyncLocal<string>();
async void Main()
{
    _asyncLocalTest.Value = "test";
    await Task.Delay (1000);
    // Следующий оператор работает, даже если мы возвратились из другого потока:
    Console.WriteLine (_asyncLocalTest.Value); // test
}

```

Класс `AsyncLocal<T>` по-прежнему способен сохранять операции, запущенные в разных потоках, обособленно вне зависимости от того, инициированы они вызовом `Thread.Start` или `Task.Run`. Следующий код выводит `one` `one` и `two` `two`:

```

static AsyncLocal<string> _asyncLocalTest = new AsyncLocal<string>();
void Main()
{
    // Вызвать Test два раза в двух параллельных потоках:
    new Thread (() => Test ("one")).Start();
    new Thread (() => Test ("two")).Start();
}
async void Test (string value)
{
    _asyncLocalTest.Value = value;
    await Task.Delay (1000);
    Console.WriteLine (value + " " + _asyncLocalTest.Value);
}

```

С классом `AsyncLocal<T>` связан интересный и уникальный нюанс: если объект `AsyncLocal<T>` уже имеет значение, когда поток запускается, то новый поток “наследует” это значение:

```

static AsyncLocal<string> _asyncLocalTest = new AsyncLocal<string>();
void Main()
{
    _asyncLocalTest.Value = "test";
    new Thread (AnotherMethod).Start();
}
void AnotherMethod() => Console.WriteLine (_asyncLocalTest.Value); // test

```

Тем не менее, новый поток получает копию значения, так что любые вносимые им изменения не будут влиять на исходное значение:

```

static AsyncLocal<string> _asyncLocalTest = new AsyncLocal<string>();
void Main()
{
    _asyncLocalTest.Value = "test";
    var t = new Thread (AnotherMethod);
    t.Start(); t.Join();
    Console.WriteLine (_asyncLocalTest.Value); // test (не ha-ha!)
}
void AnotherMethod() => _asyncLocalTest.Value = "ha-ha!";

```

Имейте в виду, что новый поток получает *поверхностную* копию значения. Таким образом, если бы вы заменили `Async<string>` классом `Async<StringBuilder>` или `Async<List<string>>`, то новый поток мог бы

очищать `StringBuilder` или добавлять/удалять значения в `List<string>` и это не повлияло бы на оригинал.

Таймеры

Если некоторый метод необходимо выполнять многократно через регулярные интервалы, то проще всего прибегнуть к помощи *таймера*. Таймеры удобны и эффективны в плане использования ими памяти и других ресурсов, если сравнивать их с такими приемами, как показанный ниже:

```
new Thread (delegate() {
    while (enabled)
    {
        DoSomeAction();
        Thread.Sleep (TimeSpan.FromHours (24));
    }
}).Start();
```

Здесь не только надолго связывается ресурс потока, но без написания дополнительного кода метод `DoSomeAction` будет вызываться в более позднее время каждый день. Проблемы подобного рода решаются с помощью таймеров.

В .NET предлагаются пять таймеров. Два из них являются универсальными многопоточными таймерами:

- `System.Threading.Timer`
- `System.Timers.Timer`

Еще два представляют собой специализированные однопоточные таймеры:

- `System.Windows.Forms.Timer` (таймер Windows Forms)
- `System.Windows.Threading.DispatcherTimer` (таймер WPF)

Многопоточные таймеры характеризуются большей мощностью, точностью и гибкостью; однопоточные таймеры безопаснее и удобнее для запуска простых задач, которые обновляют элементы управления Windows Forms либо элементы WPF. Наконец, начиная с версии .NET 6, доступен вариант `PeriodicTimer`, который будет рассматриваться первым.

PeriodicTimer

На самом деле `PeriodicTimer` не является таймером; это класс, помогающий с организацией асинхронных циклов. Важно учитывать, что после появления `async` и `await` традиционные таймеры обычно не востребованы. Взамен хорошо подходит следующий шаблон:

```
StartPeriodicOperation();  
async void StartPeriodicOperation()  
{  
    while (true)  
    {  
        await Task.Delay (1000);  
        Console.WriteLine ("Tick"); // Выполнить какое-то действие  
    }  
}
```



Если вызвать метод `StartPeriodicOperation` из потока пользовательского интерфейса, то он будет вести себя как однопоточный таймер, поскольку `await` всегда осуществляет возврат в тот же самый контекст синхронизации.

Его можно заставить работать как многопоточный таймер, просто добавив `.ConfigureAwait(false)` к `await`.

С помощью класса `PeriodicTimer` этот шаблон можно упростить:

```
var timer = new PeriodicTimer (TimeSpan.FromSeconds (1));
StartPeriodicOperation();
// Необязательно освобождать таймер, когда необходимо остановить цикл
async void StartPeriodicOperation()
{
    while (await timer.WaitForNextTickAsync ())
        Console.WriteLine ("Tick");           // Выполнить какое-то действие
}
```

Класс `PeriodicTimer` также позволяет остановить таймер, освободив экземпляр таймера. В результате метод `WaitForNextTickAsync` возвращает `false`, позволяя циклу завершиться.

Многопоточные таймеры

Класс `System.Threading.Timer` представляет простейший многопоточный таймер: он имеет только конструктор и два метода (предмет восхищения для минималистов, к которым себя относит и автор книги). В следующем примере таймер вызывает метод `Tick`, который выводит строку `tick...` спустя пять секунд и затем ежесекундно, пока пользователь не нажмет клавишу `<Enter>`:

```
using System;
using System.Threading;
// Первый интервал составляет 5000 мс; последующие интервалы - 1000 мс
Timer tmr = new Timer (Tick, "tick...", 5000, 1000);
Console.ReadLine();
tmr.Dispose(); // Это останавливает таймер и производит очистку.
void Tick (object data)
{
    // Это запускается в потоке из пула
    Console.WriteLine (data);           // Выводит tick...
}
```



Обсуждение освобождения многопоточных таймеров можно найти в разделе “Таймеры” главы 12.

Позже интервал таймера можно изменить, вызвав его метод `Change`. Если нужно, чтобы таймер запустился только раз, тогда в последнем аргументе конструктора следует указать `Timeout.Infinite`.

В .NET предоставляется еще один класс таймера с тем же именем, но в пространстве имен `System.Timers`. Это просто оболочка для `System.Threading.Timer`, которая предлагает дополнительные удобства, однако имеет идентичный внутренний механизм. Ниже приведена сводка по добавленным возможностям:

- реализация интерфейса `IComponent`, которая позволяет классу находиться в панели компонентов визуального редактора Visual Studio;
- свойство `Interval` вместо метода `Change`;
- событие `Elapsed` вместо делегата обратного вызова;
- свойство `Enabled` для запуска и останова таймера (стандартным значением является `false`);
- методы `Start` и `Stop` на тот случай, если вам не нравится работать со свойством `Enabled`;
- флаг `AutoReset` для указания повторяющегося события (стандартным значением является `true`);
- свойство `SynchronizingObject` с методами `Invoke` и `BeginInvoke` для безопасного вызова методов на элементах WPF и элементах управления Windows Forms.

Рассмотрим пример:

```
using System;
using System.Timers;           // Пространство имен Timers, а не Threading
var tmr = new Timer();          // Не требует никаких аргументов
tmr.Interval = 500;
tmr.Elapsed += tmr_Elapsed;    // Использует событие вместо делегата
tmr.Start();                   // Запустить таймер
Console.ReadLine();
tmr.Stop();                    // Остановить таймер
Console.ReadLine();
tmr.Start();                   // Запустить таймер повторно
Console.ReadLine();
tmr.Dispose();                 // Остановить таймер навсегда
void tmr_Elapsed (object sender, EventArgs e)
    => Console.WriteLine ("Tick");
```

Многопоточные таймеры применяют пул потоков, чтобы позволить нескольким потокам обслуживать множество таймеров. Это означает, что метод обратного вызова или событие `Elapsed` может инициироваться каждый раз в новом потоке, когда к нему производится обращение. Кроме того, событие `Elapsed` всегда инициируется (приблизительно) вовремя — независимо от того, завершило ли выполнение предыдущее событие `Elapsed`. Следовательно, обратные вызовы или обработчики событий должны быть безопасными в отношении потоков.

Точность многопоточных таймеров зависит от ОС и обычно находится в диапазоне 10–20 мс. Если нужна более высокая точность, тогда можете прибегнуть к собственному взаимодействию и обратиться к мультимедиа-таймеру Windows. Его точность достигает одной миллисекунды, а сам он определен в сборке `winmm.dll`. Сначала вызовите функцию `timeBeginPeriod`, чтобы проинформировать ОС о том, что необходима высокая точность измерения времени, а затем обратитесь к функции `timeSetEvent` для запуска мультимедиа-таймера. По завершении работы вызовите функцию `timeKillEvent`, чтобы остановить таймер, и функцию `timeEndPeriod` для сообщения ОС о том, что высокая точность измерения времени больше не нужна. Вызов внешних мето-

дов с помощью P/Invoke демонстрируется в главе 24. Полноценные примеры работы с мультимедиа-таймером можно найти в Интернете, выполнив поиск по ключевым словам `dllimport winmm.dll timesetevent`.

Однопоточные таймеры

.NET предлагает таймеры, которые предназначены для устранения проблем с безопасностью к потокам в приложениях WPF и Windows Forms:

- `System.Windows.Threading.DispatcherTimer` (WPF)
- `System.Windows.Forms.Timer` (Windows Forms)



Однопоточные таймеры не проектировались для работы за пределами соответствующих сред. Например, если попытаться использовать таймер Windows Forms в приложении Windows Service, то даже не будет инициировано событие таймера!

Оба однопоточных таймера похожи на `System.Timers.Timer` в плане открытых членов — `Interval`, `Start` и `Stop` (а также `Tick`, который эквивалентен `Elapsed`) — и применяются в аналогичной манере. Однако они отличаются своей внутренней работой. Вместо запуска событий таймера в потоках из пула они отправляют события циклу сообщений WPF или Windows Forms. В результате событие `Tick` всегда инициируется в том же самом потоке, который первоначально создал таймер — в нормальном приложении это поток, используемый для управления всеми элементами пользовательского интерфейса. Такой подход обеспечивает несколько преимуществ:

- вы можете вообще забыть о безопасности к потокам;
- новый вызов `Tick` никогда не будет инициирован до тех пор, пока предыдущий вызов `Tick` не завершит обработку;
- обновлять элементы управления пользовательского интерфейса можно напрямую из кода обработки события `Tick`, не вызывая `Control.BeginInvoke` или `Dispatcher.BeginInvoke`.

Таким образом, программа, эксплуатирующая такие таймеры, в действительности не является многопоточной: в итоге получается та же разновидность псевдопараллелизма, которая была описана в главе 14 при рассмотрении асинхронных функций, выполняющихся в потоке пользовательского интерфейса. Один поток обслуживает все таймеры — равно как и обрабатывает события пользовательского интерфейса. Это значит, что обработчик события `Tick` должен выполняться быстро, иначе пользовательский интерфейс перестанет быть отзывчивым.

Следовательно, таймеры WPF и Windows Forms подходят для выполнения небольших работ, обычно связанных с обновлением какого-то аспекта пользовательского интерфейса (например, часов или счетчика с обратным отсчетом).

В терминах точности однопоточные таймеры похожи на многопоточные таймеры (десятки миллисекунд), хотя они обычно менее точны, поскольку могут задерживаться на время, пока обрабатываются другие запросы пользовательского интерфейса (или другие события таймеров).



Параллельное программирование

В настоящей главе будут раскрыты многопоточные API-интерфейсы и конструкции, нацеленные на использование преимуществ многоядерных процессоров:

- параллельный LINQ (Parallel LINQ), или *PLINQ*;
- класс *Parallel*;
- конструкции *параллизма задач*;
- *паралльные коллекции*.

Все конструкции вместе известны под (свободным) названием PFX (Parallel Framework — параллельная инфраструктура). Класс *Parallel* и конструкции параллизма задач называют *библиотекой паралльных задач* (Task Parallel Library — TPL).

Чтение главы требует знания основ, изложенных в главе 14, в частности блокирования, безопасности к потокам и класса *Task*.



.NET предлагает несколько дополнительных специализированных API-интерфейсов для параллельного и асинхронного программирования.

- *System.Threading.Channels.Channel* — высокопроизводительная асинхронная очередь производителей/потребителей, появившаяся в .NET Core 3.
- *Microsoft Dataflow* (из пространства имен *System.Threading.Tasks.Dataflow*) представляет собой сложно устроенный API-интерфейс для создания сетей буферизированных блоков, которые выполняют действия или трансформации данных параллельно, напоминая программирование с использованием акторов/агентов.
- *Reactive Extensions (Rx)* реализует LINQ поверх *IObservable* (альтернативная абстракция *IAsyncEnumerable*) и прекрасно справляется с объединением асинхронных потоков. *Reactive Extensions* поставляется в NuGet-пакете *System.Reactive*.

Для чего нужна инфраструктура PFX?

На протяжении последних 15 лет производители центральных процессоров (ЦП) перешли с одноядерной архитектуры на многоядерную. В результате создается дополнительная проблема для нас как программистов, поскольку однопоточный код не будет автоматически выполняться быстрее только по причине наличия дополнительных ядер.

Использовать в своих интересах множество ядер довольно легко в большинстве серверных приложений, где каждый поток может независимо обрабатывать отдельный клиентский запрос, но труднее в настольных приложениях, т.к. обычно это требует применения к коду с интенсивными вычислениями следующих действий.

1. *Разбиение* кода на небольшие части.
2. Выполнение частей кода параллельно через многопоточность.
3. *Объединение* результатов по мере их получения в безопасной к потокам и высокопроизводительной манере.

Хотя все указанные действия можно реализовать с помощью классических многопоточных конструкций, выполнять их довольно утомительно — особенно шаги разбиения и объединения. Еще одна проблема связана с тем, что обычная стратегия блокирования для обеспечения безопасности в отношении потоков приводит к большому числу состязаний, когда множество потоков одновременно работают с одними и теми же данными.

Библиотеки PFX были спроектированы специально для оказания помощи в сценариях подобного рода.



Программирование с целью получения выгоды от множества ядер или процессоров называют *параллельным программированием*. Оно представляет собой подмножество более широкой концепции многопоточности.

Концепции PFX

Существуют две стратегии разбиения работы между потоками: *параллелизм данных* и *параллелизм задач*.

Когда набор задач должен быть выполнен над множеством значений данных, мы можем распараллелить работу, заставив каждый поток выполнять (тот же самый) набор задач на подмножестве значений. Это называется *параллелизмом данных*, потому что мы распределяем *данные* между потоками. Напротив, при *параллелизме задач* мы распределяем *задачи*; другими словами, заставляем каждый поток выполнять свою задачу.

В общем случае параллелизм данных реализуется легче и масштабируется лучше для оборудования с высокой степенью параллелизма, т.к. он сокращает или устраняет совместно используемые данные (и тем самым сводит к минимуму проблемы, связанные с состязаниями и безопасностью к потокам). Кроме того, параллелизм данных опирается на тот факт, что значений данных часто имеется больше, чем дискретных задач, увеличивая в итоге потенциал параллелизма.

Параллелизм данных также способствует *структурированному параллелизму*, который означает, что параллельные единицы работы начинаются и завершаются в одном и том же месте внутри программы. В отличие от него параллелизм задач имеет тенденцию быть неструктурированным, т.е. параллельные единицы работы могут начинаться и завершаться в разных местах, разбросанных по программе. Структурированный параллелизм проще, менее подвержен ошибкам и позволяет поручить выполнение сложной работы по разбиению и координации потоков (и даже объединение результатов) библиотекам.

Компоненты PFX

Как показано на рис. 22.1, инфраструктура PFX содержит два уровня функциональности. Верхний уровень состоит из двух API-интерфейсов *структурированного параллелизма данных*: PLINQ и класс Parallel. Нижний уровень включает классы параллелизма задач, а также набор дополнительных конструкций, помогающих выполнять действия параллельного программирования.

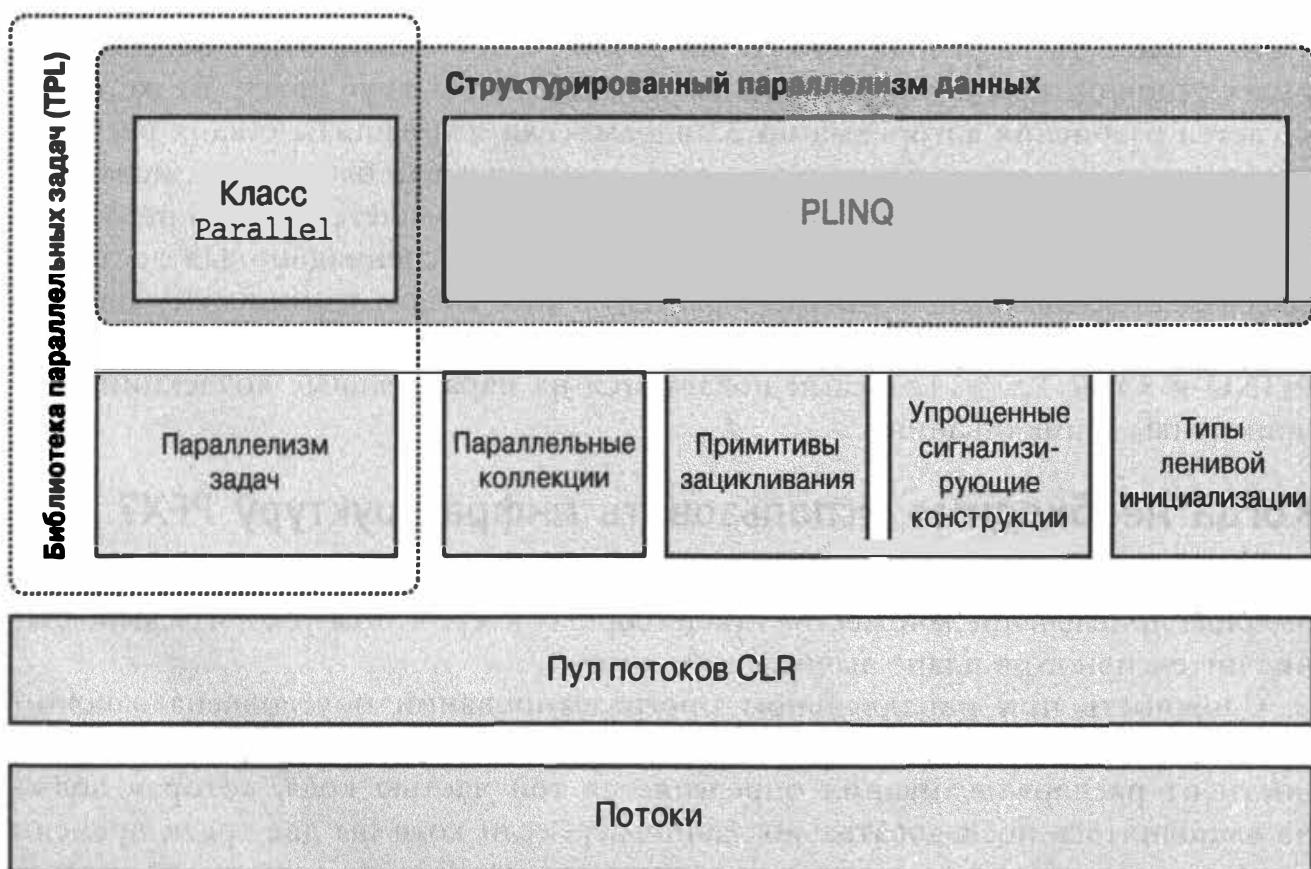


Рис. 22.1. Компоненты PFX

Язык PLINQ предлагает самую развитую функциональность: он автоматизирует все шаги по распараллеливанию — включая разбиение работы на задачи, выполнение этих задач в потоках и объединение результатов в единственную выходную последовательность. Он называется *декларативным*, поскольку вы просто декларируете, что хотите распараллелить свою работу (структурируя ее как запрос LINQ), и позволяете исполняющей среде позаботиться о деталях реализации. Напротив, другие подходы являются *императивными* в том,

что вы должны явно писать код для разбиения и объединения. В случае класса `Parallel` вам придется объединять результаты самостоятельно; имея дело с конструкциями параллелизма задач, придется реализовывать самостоятельно также и разбиение работы.

	Разбивает работу	Объединяет результаты
PLINQ	Да	Да
Класс <code>Parallel</code>	Да	Нет
Параллелизм задач PFX	Нет	Нет

Параллельные коллекции и примитивы зацикливания помогают справиться с действиями параллельного программирования нижнего уровня. Они важны из-за того, что инфраструктура PFX спроектирована для работы не только с современным оборудованием, но и с будущими поколениями процессоров с гораздо большим числом ядер. Если вы хотите перенести штабель бревен и для этого у вас есть 32 рабочих, то самой сложной проблемой будет обеспечение таких условий, при которых рабочие не мешали бы друг другу. То же самое касается разбиения алгоритма по 32 ядрам: если для защиты общих ресурсов применяются обычные блокировки, то результирующая блокировка может означать, что на самом деле одновременно занятыми является только некоторая доля ядер. Параллельные коллекции настраиваются специально для доступа с высокой степенью параллелизма, преследуя цель свести к минимуму или вообще устранить блокирование. Для эффективного управления работой язык PLINQ и класс `Parallel` сами полагаются на параллельные коллекции и на примитивы зацикливания.

Когда необходимо использовать инфраструктуру PFX?

Основным сценарием использования PFX является *параллельное программирование*: привлечение множества процессорных ядер, чтобы ускорить выполнение интенсивного в плане вычислений кода.

Сложность при параллельном программировании обусловлена законом Амдала, который утверждает, что максимальное улучшение производительности от распараллеливания определяется той частью кода, которая должна выполняться последовательно. Например, если хотя бы две трети времени выполнения алгоритма поддаются распараллеливанию, то никогда не удастся превысить трехкратный выигрыш в производительности — даже при неограниченном числе ядер.

Таким образом, прежде чем продолжать, полезно проверить, что узкое место находится в распараллеливаемом коде. Также имеет смысл обдумать, должен ли ваш код действительно быть интенсивным в плане вычислений — часто простейшим и наиболее эффективным подходом будет оптимизация. Тем не менее, следует соблюдать компромисс, потому что некоторые технологии оптимизации могут затруднить распараллеливание кода.

Конструкции параллельного программирования полезны не только для работы с многоядерными процессорами, но также и в других сценариях.

- Параллельные коллекции иногда подходят, когда нужна безопасная к потокам очередь, стек или словарь.
- Класс `BlockingCollection` предоставляет простые средства для реализации структур производителей/потребителей и является хорошим способом ограничения параллелизма.
- Задачи являются основой асинхронного программирования, как было показано в главе 14.

Самый простой выигрыш получается с так называемыми *естественно параллельными* случаями — когда работа может быть легко разбита на задачи, которые сами по себе выполняются эффективно (здесь очень хорошо подходит структурированный параллелизм). Примеры включают многие задачи обработки изображений, метод трассировки лучей и прямолинейные подходы в математике или криптографии. Примером неестественной параллельной задачи может считаться реализация оптимизированной версии алгоритма быстрой сортировки — хороший результат требует некоторых размышлений и возможно неструктурированного параллелизма.

PLINQ

Инфраструктура PLINQ автоматически распараллеливает локальные запросы LINQ. Преимущество PLINQ заключается в простоте использования, т.к. ответственность за выполнение работ по разбиению и объединению результатов перекладывается на исполняющую среду .NET.

Для применения PLINQ просто вызовите метод `AsParallel` на входной последовательности и затем продолжайте запрос LINQ обычным образом. Приведенный ниже запрос вычисляет простые числа между 3 и 100 000, обеспечивая полную загрузку всех ядер процессора на целевой машине:

```
//Вычислить простые числа с использованием простого (неоптимизированного) алгоритма
IQueryable<int> numbers = Enumerable.Range (3, 100000-3);

var parallelQuery =
    from n in numbers.AsParallel()
    where Enumerable.Range (2, (int) Math.Sqrt (n)).All (i => n % i > 0)
    select n;

int[] primes = parallelQuery.ToArray();
```

`AsParallel` представляет собой расширяющий метод в классе `System.Linq.ParallelEnumerable`. Он помещает входные данные в оболочку последовательности, основанной на `ParallelQuery<TSource>`, что вызывает привязку последующих операций запросов LINQ к альтернативному набору расширяю-

ших методов, которые определены в классе `ParallelEnumerable`. Они представляют параллельные реализации для всех стандартных операций запросов. По существу они разбивают входную последовательность на порции, которые выполняются в разных потоках, и объединяют результаты снова в единственную выходную последовательность для дальнейшего потребления, как иллюстрируется на рис. 22.2.

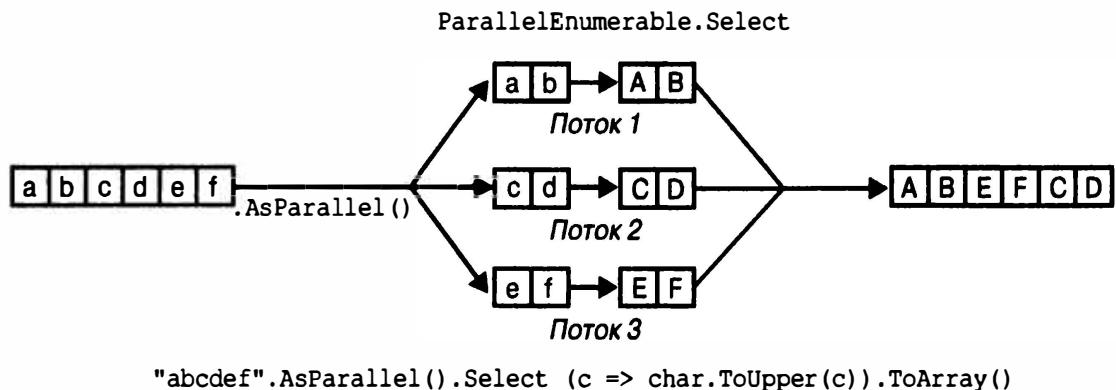


Рис. 22.2. Модель выполнения PLINQ

Вызов метода `AsSequential` извлекает последовательность из оболочки `ParallelQuery`, так что дальнейшие операции запросов привязываются к стандартному набору операций и выполняются последовательно. Такое действие нужно предпринимать перед вызовом методов, которые имеют побочные эффекты или не являются безопасными в отношении потоков.

Для операций запросов, принимающих две входные последовательности (`Join`, `GroupJoin`, `Concat`, `Union`, `Intersect`, `Except` и `Zip`), метод `AsParallel` должен быть применен к обеим входным последовательностям (иначе генерируется исключение). Однако по мере продвижения запроса применять к нему `AsParallel` нет необходимости, т.к. операции запросов PLINQ выдают еще одну последовательность `ParallelQuery`. На самом деле дополнительный вызов `AsParallel` привносит неэффективность, связанную с тем, что он инициирует слияние и повторное разбиение запроса:

```

mySequence.AsParallel()           // Помещает последовательность
                                  // в оболочку ParallelQuery<int>
    .Where (n => n > 100)         // Выводит другую последовательность
                                  // ParallelQuery<int>
    .AsParallel()                 // Необязательно – и неэффективно!
    .Select (n => n * n)
    
```

Не все операции запросов можно эффективно распараллеливать. Для операций, не поддающихся распараллеливанию (см. раздел “Ограничения PLINQ” далее в главе), PLINQ взамен реализует последовательное выполнение. Инфраструктура PLINQ может также оперировать последовательно, если ожидает, что накладные расходы от распараллеливания в действительности замедлят определенный запрос.

Инфраструктура PLINQ предназначена только для локальных коллекций: скажем, она не работает с Entity Framework, потому что в таких ситуациях LINQ

транслируется в код SQL, который затем выполняется на сервере баз данных. Тем не менее, PLINQ можно использовать для выполнения дополнительных локальных запросов в результирующих наборах, полученных из запросов к базам данных.



Если запрос PLINQ генерирует исключение, то оно повторно генерируется как объект `AggregateException`, свойство `InnerExceptions` которого содержит реальное исключение (либо исключения). Дополнительные сведения можно найти в разделе “Работа с `AggregateException`” далее в главе.

Почему метод `AsParallel` не выбран в качестве варианта по умолчанию?

С учетом того, что метод `AsParallel` прозрачно распараллеливает запросы LINQ, возникает вопрос: почему разработчики в Microsoft не приняли решение распараллеливать стандартные операции запросов, просто сделав PLINQ вариантом по умолчанию?

Есть несколько причин выбора подхода с *включением*. Первая причина связана с тем, что для получения пользы от PLINQ в наличии должен быть обоснованный объем работы с интенсивными вычислениями, которую можно было бы поручить рабочим потокам. Большинство потоков LINQ to Objects выполняются очень быстро, и распараллеливание для них не только окажется излишним, но накладные расходы на разбиение, объединение и координацию дополнительных потоков фактически могут даже замедлить их выполнение. Ниже перечислены другие причины.

- Вывод запроса PLINQ (по умолчанию) может отличаться от вывода запроса LINQ в том, что касается порядка следования элементов (как объясняется в разделе “PLINQ и упорядочивание” далее в главе).
- PLINQ помещает исключения в оболочку `AggregateException` (чтобы учесть возможность генерации множества исключений).
- PLINQ будет давать ненадежные результаты, если запрос вызывает не-безопасные к потокам методы.

Наконец, PLINQ предлагает немало способов настройки. Обременение стандартного API-интерфейса LINQ to Objects нюансами подобного рода добавило бы путаницу.

Продвижение параллельного выполнения

Подобно обычным запросам LINQ запросы PLINQ оцениваются ленивым образом. Другими словами, выполнение будет инициировано, только когда начнется потребление результатов — как правило, посредством цикла `foreach` (хотя оно также может происходить через операцию преобразования, такую как `ToArrayList`, или операцию, которая возвращает одиночный элемент либо значение).

Тем не менее, при перечислении результатов выполнение продолжается несколько иначе, чем в случае обычного последовательного запроса. Последовательный запрос поддерживается полностью потребителем с применением модели с пассивным источником: каждый элемент извлекается из входной последовательности только тогда, когда он затребован потребителем.

Параллельный запрос обычно использует независимые потоки для извлечения элементов из входной последовательности, причем с небольшим *упреждением*, до того момента, когда они понадобятся потребителю (почти как телесуфлер у дикторов новостей или буфер в проигрывателях компакт-дисков). Затем он обрабатывает элементы параллельно через цепочку запросов, удерживая результаты в небольшом буфере, чтобы они были готовы при затребовании потребителем. Если потребитель приостанавливает или прекращает перечисление до его завершения, обработчик запроса тоже приостанавливается или прекращает работу, чтобы не тратить впустую время ЦП или память.



Поведение буферизации PLINQ можно настраивать, вызывая метод `WithMergeOptions` после `AsParallel`. Стандартное значение `AutoBuffered` перечисления `ParallelMergeOptions` обычно дает наилучшие окончательные результаты. Значение `NotBuffered` отключает буфер и полезно в ситуации, когда результаты необходимо увидеть как можно скорее; значение `FullyBuffered` кеширует целый результирующий набор перед представлением его потребителю (подобным образом изначально работают операции `OrderBy` и `Reverse`, а также операции над элементами, операции агрегирования и операции преобразования).

PLINQ и упорядочивание

Побочный эффект от распараллеливания операций запросов заключается в том, что когда результаты объединены, они не обязательно располагаются в том же самом порядке, в котором они были получены (см. рис. 22.2). Другими словами, обычная гарантия предохранения порядка LINQ для последовательностей больше не поддерживается.

Если нужно предохранить порядок, тогда после вызова `AsParallel` понадобится вызвать метод `AsOrdered`:

```
myCollection.AsParallel().AsOrdered() ...
```

Вызов метода `AsOrdered` оказывает влияние на производительность, поскольку инфраструктура PLINQ должна отслеживать исходные позиции всех элементов.

Позже последствия от вызова `AsOrdered` в запросе можно отменить, вызвав метод `AsUnordered`: это вводит “точку случайного тасования”, которая после ее прохождения позволяет запросу выполняться более эффективно. Таким образом, если необходимо предохранить упорядочение входной последовательности только для первых двух операций запросов, то можно поступить так:

```
inputSequence.AsParallel().AsOrdered()
    .QueryOperator1()
    .QueryOperator2()
    .AsUnordered() // Начиная с этой точки, упорядочивание роли не играет
    .QueryOperator3()
    ...
```

Метод `AsOrdered` не является стандартным вариантом, потому что для большинства запросов первоначальное упорядочивание во входной последовательности не имеет значения. Другими словами, если бы метод `AsOrdered` использовался по умолчанию, то к большинству параллельных запросов пришлось бы применять метод `AsUnordered`, чтобы добиться лучших показателей производительности, и поступать так было бы обременительно.

Ограничения PLINQ

Существует несколько практических ограничений относительно того, что инфраструктура PLINQ способна распараллеливать. Следующие операции запросов по умолчанию предотвращают распараллеливание, если только исходные элементы не находятся в своих первоначальных индексных позициях:

- индексированные версии `Select`, `SelectMany` и `ElementAt`.

Большинство операций запросов изменяют индексные позиции элементов (включая операции, удаляющие элементы, такие как `Where`). Это означает, что если нужно использовать предшествующие операции, то они обычно должны находиться в начале запроса.

Перечисленные ниже операции запросов допускают распараллеливание, но применяют затратную стратегию разбиения, которая иногда может оказываться медленнее последовательной обработки:

- `Join`, `GroupBy`, `GroupJoin`, `Distinct`, `Union`, `Intersect` и `Except`.

Перегруженные версии операции `Aggregate`, принимающие начальное значение (в аргументе `seed`), в своем стандартном виде не поддерживают возможность распараллеливания — в PLINQ для такой цели предлагаются специальные перегруженные версии (см. раздел “Оптимизация PLINQ” далее в главе).

Все остальные операции поддаются распараллеливанию, хотя их использование не гарантирует, что запрос будет распараллелен. Инфраструктура PLINQ может выполнять запрос последовательно, если ожидает, что накладные расходы от распараллеливания приведут к замедлению имеющегося конкретного запроса. Такое поведение можно переопределить и принудительно применять параллелизм, вызвав показанный ниже метод после `AsParallel`:

```
.WithExecutionMode (ParallelExecutionMode.ForceParallelism)
```

Пример: параллельная программа проверки орфографии

Предположим, что требуется написать программу проверки орфографии, которая выполняется быстро для очень больших документов за счет использования всех свободных процессорных ядер. Выразив алгоритм в виде запроса LINQ, мы можем его легко распараллелить.

Первый шаг предусматривает загрузку словаря английских слов в объект `HashSet`, чтобы обеспечить эффективный поиск:

```
if (!File.Exists ("WordLookup.txt"))           // Содержит около 150 000 слов
    File.WriteAllText ("WordLookup.txt",
        await new HttpClient ().GetStringAsync (
            "http://www.albahari.com/ispell/allwords.txt"));
var wordLookup = new HashSet<string> (
    File.ReadAllLines ("WordLookup.txt"),
    StringComparer.InvariantCultureIgnoreCase);
```

Затем мы будем применять полученное средство поиска слов для создания тестового “документа”, содержащего массив из миллиона случайных слов. После построения массива мы внесем пару орфографических ошибок:

```
var random = new Random();
string[] wordList = wordLookup.ToArray();
string[] wordsToTest = Enumerable.Range (0, 1000000)
    .Select (i => wordList [random.Next (0, wordList.Length)])
    .ToArray();
wordsToTest [12345] = "woozsh";           // Внесение пары
wordsToTest [23456] = "wubsie";          // орфографических ошибок.
```

Теперь мы можем выполнить параллельную проверку орфографии, сверяя `wordsToTest` с `wordLookup`. PLINQ позволяет делать это очень просто:

```
var query = wordsToTest
    .AsParallel ()
    .Select ((word, index) => (word, index))
    .Where (iword => !wordLookup.Contains (iword.word))
    .OrderBy (iword => iword.index);
foreach (var mistake in query)
    Console.WriteLine (mistake.word + " - index = " + mistake.index);
```

Вот вывод:

```
woozsh - index = 12345
wubsie - index = 23456
```



Обратите внимание, что в запросе используются кортежи (`word, index`), а не анонимные типы. Поскольку кортежи реализованы как типы значений, а не ссылочные типы, это снижает пиковое потребление памяти и повышает производительность за счет сокращения выделений памяти в куче и последующей сборки мусора. (Сравнительный анализ показывает, что на практике выигрыш будет умеренным из-за эффективности диспетчера памяти и того факта, что рассматриваемые выделения памяти не сохраняются за рамками поколения 0.)

Использование `ThreadLocal<T>`

Давайте расширим наш пример, распараллелив само создание случайного тестового списка слов. Мы структурировали его как запрос LINQ, так что все должно быть легко. Вот последовательная версия:

```
string[] wordsToTest = Enumerable.Range (0, 1000000)
    .Select (i => wordList [random.Next (0, wordList.Length)])
    .ToArray();
```

К сожалению, вызов метода `random.Next` небезопасен в отношении потоков, поэтому работа не сводится к простому добавлению в запрос вызова `AsParallel`. Потенциальным решением может быть написание функции, помещающей вызов `random.Next` внутрь блокировки, но это ограничило бы параллелизм. Более удачный вариант предусматривает применение класса `ThreadLocal<Random>` (см. раздел “Локальное хранилище потока” в главе 21) с целью создания отдельного объекта `Random` для каждого потока. Тогда распараллелить запрос можно следующим образом:

```
var localRandom = new ThreadLocal<Random>
    ( () => new Random (Guid.NewGuid ().GetHashCode ()) );
string[] wordsToTest = Enumerable.Range (0, 1000000).AsParallel()
    .Select (i => wordList [localRandom.Value.Next (0, wordList.Length)])
    .ToArray();
```

В нашей фабричной функции для создания объекта `Random` мы передаем хеш-код `Guid`, гарантируя тем самым, что даже если два объекта `Random` создаются в рамках короткого промежутка времени, то они все равно будут выдавать отличающиеся последовательности случайных чисел.

Когда необходимо использовать PLINQ?

Довольно заманчиво поискать в существующих приложениях запросы LINQ и поэкспериментировать с их распараллеливанием. Однако обычно это не-продуктивно, т.к. большинство задач, для которых LINQ является очевидным наилучшим решением, выполняются очень быстро, а потому не выигрывают от распараллеливания. Более удачный подход предполагает поиск узких мест, интенсивно использующих ЦП, и выяснение, могут ли они быть выражены в виде запроса LINQ. (Приятный побочный эффект от такой редорганизации состоит в том, что LINQ обычно делает код более кратким и читабельным.)

Инфраструктура PLINQ хорошо подходит для естественно параллельных задач. Однако она может быть плохим выбором для обработки изображений, потому что объединение миллионов пикселей в выходную последовательность создаст узкое место. Взамен пиксели лучше записывать прямо в массив или блок неуправляемой памяти и применять класс `Parallel` либо параллелизм задач для управления многопоточностью. (Тем не менее, объединение результатов можно аннулировать с использованием `ForAll` — мы обсудим данную тему в разделе “Оптимизация PLINQ” далее в главе. Поступать так имеет смысл, если алгоритм обработки изображений естественным образом приспосабливается к LINQ.)

Функциональная чистота

Поскольку PLINQ запускает ваш запрос в параллельных потоках, вы должны избегать выполнения небезопасных к потокам операций. В частности, запись в переменные порождает *побочные эффекты* и потому не является безопасной в отношении потоков:

```
// Следующий запрос умножает каждый элемент на его позицию.  
// Получив на входе Enumerable.Range(0, 999), он должен  
// вывести последовательность квадратов.  
int i = 0;  
var query = from n in Enumerable.Range(0, 999).AsParallel() select n * i++;
```

Мы могли бы сделать инкрементирование переменной *i* безопасным к потокам за счет применения блокировок, но все еще останется проблема того, что *i* не обязательно будет соответствовать позиции входного элемента. И добавление *AsOrdered* в запрос не решит последнюю проблему, т.к. метод *AsOrdered* гарантирует лишь то, что элементы выводятся в порядке, согласованном с порядком, который они имели бы при последовательной обработке — он не осуществляет действительную их обработку последовательным образом.

Взамен данный запрос должен быть переписан с использованием индексированной версии *Select*:

```
var query = Enumerable.Range(0, 999).AsParallel().Select ((n, i) => n * i);
```

Для достижения лучшей производительности любые методы, вызываемые из операций запросов, должны быть безопасными к потокам, не производя записи в поля или свойства (не давать побочные эффекты, т.е. быть *функционально чистыми*). Если они являются безопасными в отношении потоков благодаря блокированию, тогда потенциал параллелизма запроса будет ограничен последствиями соперничества.

Установка степени параллелизма

По умолчанию PLINQ выбирает оптимальную степень параллелизма для задействованного процессора. Ее можно переопределить, вызвав метод *WithDegreeOfParallelism* после *AsParallel*:

```
...AsParallel().WithDegreeOfParallelism(4)...
```

Примером, когда степень параллелизма может быть увеличена до значения, превышающего количество ядер, является работа с интенсивным вводом-выводом (скажем, загрузка множества веб-страниц за раз). Тем не менее, комбинаторы задач и асинхронные функции предлагают аналогично несложное, но более эффективное решение (см. раздел “Комбинаторы задач” в главе 14). В отличие от объектов *Task* инфраструктура PLINQ не способна выполнять работу с интенсивным вводом-выводом без блокирования потоков (и что еще хуже — потоков *из пула*).

Изменение степени параллелизма

Метод `WithDegreeOfParallelism` можно вызывать только один раз внутри запроса PLINQ. Если его необходимо вызвать снова, то потребуется принудительно инициировать слияние и повторное разбиение запроса, еще раз вызвав метод `AsParallel` внутри запроса:

```
"The Quick Brown Fox"
    .AsParallel().WithDegreeOfParallelism (2)
    .Where (c => !char.IsWhiteSpace (c))
    .AsParallel().WithDegreeOfParallelism (3) // Инициировать слияние
                                                // и разбиение
    .Select (c => char.ToUpper (c))
```

Отмена

Отменить запрос PLINQ, результаты которого потребляются в цикле `foreach`, легко: нужно просто прекратить цикл `foreach` и запрос будет автоматически отменен по причине неявного освобождения перечислителя.

Отменить запрос, который заканчивается операцией преобразования, операцией над элементами или операцией агрегирования, можно из другого потока через признак отмены (см. раздел “Отмена” в главе 14). Чтобы вставить такой признак, необходимо после вызова `AsParallel` вызвать метод `WithCancellation`, передав ему свойство `Token` объекта `CancellationTokenSource`. Затем другой поток может вызвать метод `Cancel` на источнике признака (или мы вызовем его самостоятельно с задержкой), что приведет к генерации исключения `OperationCanceledException` в потребителе запроса:

```
IEnumerable<int> tenMillion = Enumerable.Range (3, 10_000_000);
var cancelSource = new CancellationTokenSource ();
cancelSource.CancelAfter (100);           // Отменить запрос по прошествии
                                         // 100 мс

var primeNumberQuery =
    from n in tenMillion.AsParallel().WithCancellation (cancelSource.Token)
    where Enumerable.Range (2, (int) Math.Sqrt (n)).All (i => n % i > 0)
    select n;

try
{
    // Начать выполнение запроса:
    int[] primes = primeNumberQuery.ToArray();
    // Мы никогда не попадем сюда, потому что другой поток инициирует отмену.
}
catch (OperationCanceledException)
{
    Console.WriteLine ("Query canceled");   // Запрос отменен
}
```

При инициировании отмены PLINQ ожидает завершения каждого рабочего потока со своим текущим элементом перед тем, как закончить запрос. Это означает, что любые внешние методы, которые вызывает запрос, будут выполняться до полного завершения.

Оптимизация PLINQ

Оптимизация на выходной стороне

Одно из преимуществ инфраструктуры PLINQ связано с тем, что она удобно объединяет результаты распараллеленной работы в единую выходную последовательность. Однако иногда все, что в итоге делается с такой последовательностью — выполнение некоторой функции над каждым элементом:

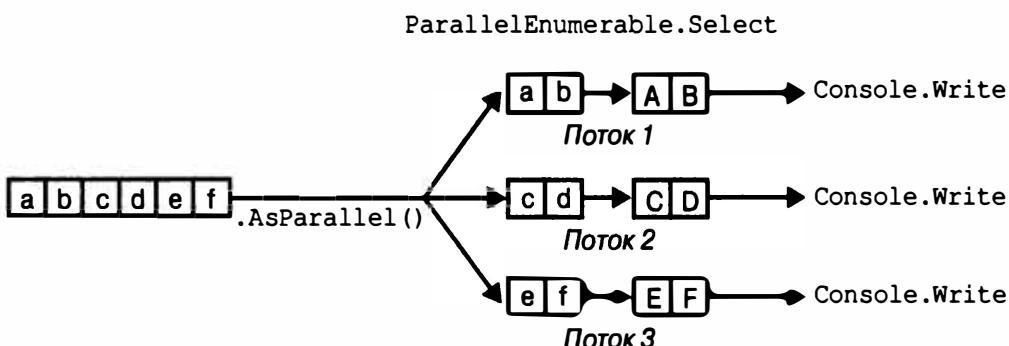
```
foreach (int n in parallelQuery)
    DoSomething (n);
```

В таком случае, если порядок обработки элементов не волнует, тогда эффективность можно улучшить с помощью метода `ForAll` из PLINQ.

Метод `ForAll` запускает делегат для каждого выходного элемента `ParallelQuery`. Он проникает прямо внутрь PLINQ, обходя шаги объединения и перечисления результатов. Ниже приведен простейший пример:

```
"abcdef".AsParallel().Select (c => char.ToUpper(c)).ForAll (Console.WriteLine);
```

Процесс продемонстрирован на рис. 22.3.



```
"abcdef".AsParallel().Select (c => char.ToUpper(c)).ForAll (Console.WriteLine)
```

Рис. 22.3. Метод `ForAll` из PLINQ



Объединение и перечисление результатов — не массовая затратная операция, поэтому оптимизация с помощью `ForAll` дает наибольшую выгоду при наличии большого количества быстро обрабатываемых входных элементов.

Оптимизация на входной стороне

Для назначения входных элементов потокам в PLINQ поддерживаются три стратегии разбиения.

Стратегия	Распределение элементов	Относительная производительность
Разбиение на основе порций	Динамическое	Средняя
Разбиение на основе диапазонов	Статическое	От низкой до очень высокой
Разбиение на основе хеш-кодов	Статическое	Низкая

Для операций запросов, которые требуют сравнения элементов (GroupBy, Join, GroupJoin, Intersect, Except, Union и Distinct), выбор отсутствует: PLINQ всегда использует *разбиение на основе хеш-кодов*. Разбиение на основе хеш-кодов относительно неэффективно в том, что оно требует предварительного вычисления хеш-кода каждого элемента (а потому элементы с одинаковыми хеш-кодами могут обрабатываться в одном и том же потоке). Если вы считаете это слишком медленным, то единственным доступным вариантом будет вызов метода AsSequential с целью отключения распараллеливания.

Для всех остальных операций запросов имеется выбор между разбиением на основе диапазонов и разбиением на основе порций. По умолчанию:

- если входная последовательность *индексируема* (т.е. является массивом или реализует интерфейс `IList<T>`), тогда PLINQ выбирает *разбиение на основе диапазонов*;
- в противном случае PLINQ выбирает *разбиение на основе порций*.

По своей сути разбиение на основе диапазонов выполняется быстрее с длинными последовательностями, для которых каждый элемент требует сходного объема времени ЦП на обработку. В противном случае разбиение на основе порций обычно быстрее.

Чтобы принудительно применить *разбиение на основе диапазонов*, выполните такие действия:

- если запрос начинается с вызова метода `Enumerable.Range`, то замените его вызовом `ParallelEnumerable.Range`;
- иначе просто вызовите метод `ToList` или `ToArray` на входной последовательности (это вполне очевидно повлияет на производительность, что также должно приниматься во внимание).



Метод `ParallelEnumerable.Range` — не просто сокращение для вызова `Enumerable.Range(...).AsParallel()`. Он изменяет производительность запроса, активизируя разбиение на основе диапазонов.

Чтобы принудительно применить разбиение на основе порций, необходимо поместить входную последовательность в вызов `Partitioner.Create` (из пространства имен `System.Collections.Concurrent`) следующим образом:

```
int[] numbers = { 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 };
var parallelQuery =
    Partitioner.Create (numbers, true) .AsParallel()
    .Where (...)
```

Второй аргумент `Partitioner.Create` указывает на то, что для запроса требуется *балансировка нагрузки*, которая представляет собой еще один способ сообщения о выборе разбиения на основе порций.

Разбиение на основе порций работает путем предоставления каждому рабочему потоку возможности периодически захватывать из входной последовательности небольшие “порции” элементов с целью их обработки (рис. 22.4).

Инфраструктура PLINQ начинает с выделения очень маленьких порций (один или два элемента за раз) и затем по мере продвижения запроса увеличивает размер порции: это гарантирует, что небольшие последовательности будут эффективно распараллеливаться, а крупные последовательности не приведут к чрезмерным циклам полного обмена. Если рабочий поток получает “простые” элементы (которые обрабатываются быстро), то в конечном итоге он сможет получить больше порций. Такая система сохраняет каждый поток одинаково занятым (а процессорные ядра “сбалансированными”); единственный недостаток состоит в том, что извлечение элементов из совместно используемой входной последовательности требует синхронизации (обычно монопольной блокировки) — и в результате могут появиться некоторые накладные расходы и состязания.

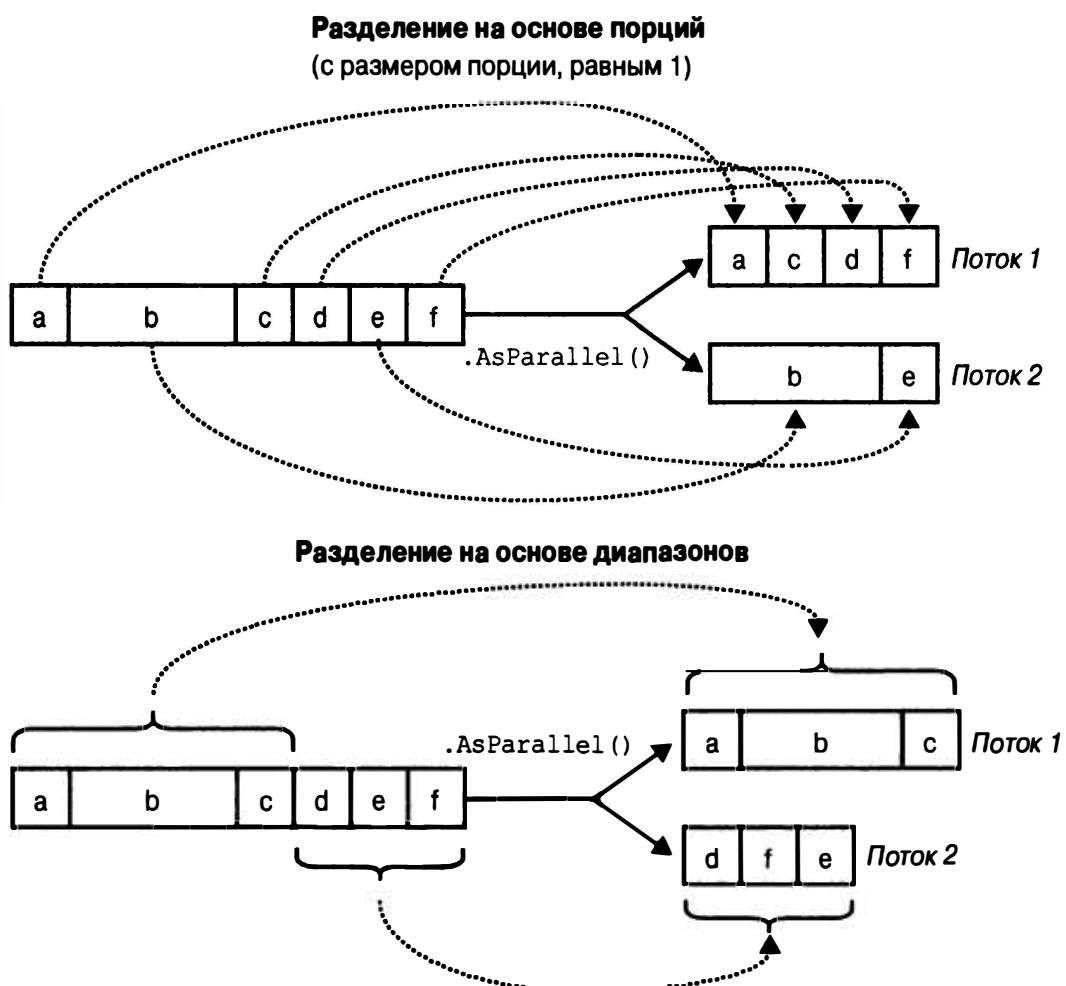


Рис. 22.4. Сравнение разбиения на основе порций и разбиения на основе диапазонов

Разбиение на основе диапазонов пропускает обычное перечисление на входной стороне и предварительно распределяет одинаковое количество элементов для каждого рабочего потока, избегая состязаний на входной последовательности. Но если случится так, что некоторые потоки получат простые элементы и завершатся раньше, то они окажутся в состоянии простоя, пока остальные потоки продолжат свою работу. Ранее приведенный пример с простыми числа-

ми может плохо выполняться при разбиении на основе диапазонов. Примером, когда такое разбиение оказывается удачным, является вычисление суммы квадратных корней первых 10 млн целых чисел:

```
ParallelEnumerable.Range(1, 10000000).Sum(i => Math.Sqrt(i))
```

Метод `ParallelEnumerable.Range` возвращает `ParallelQuery<T>`, поэтому вызывать `AsParallel` впоследствии не придется.



Разбиение на основе диапазонов не обязательно распределяет диапазоны элементов в смежных блоках — взамен может быть выбрана “полосовая” стратегия. Например, при наличии двух рабочих потоков один из них может обрабатывать элементы в нечетных позициях, а другой — элементы в четных позициях. Операция `TakeWhile` почти наверняка инициирует полосовую стратегию, чтобы избежать излишней обработки элементов позже в последовательности.

Оптимизация специального агрегирования

Инфраструктура PLINQ эффективно распараллеливает операции `Sum`, `Average`, `Min` и `Max` без дополнительного вмешательства. Тем не менее, операция `Aggregate` представляет особую трудность для PLINQ. Как было описано в главе 9, операция `Aggregate` выполняет специальное агрегирование. Например, следующий код суммирует последовательность чисел, имитируя операцию `Sum`:

```
int[] numbers = { 1, 2, 3 };
int sum = numbers.Aggregate(0, (total, n) => total + n); // 6
```

В главе 9 также было показано, что для агрегаций *без начальных значений* предоставляемый делегат должен быть ассоциативным и коммутативным. Если указанное правило нарушается, тогда инфраструктура PLINQ даст некорректные результаты, поскольку она извлекает *множество начальных значений* из входной последовательности, чтобы выполнять агрегирование нескольких частей последовательности одновременно.

Агрегации с явными начальными значениями могут выглядеть как безопасный вариант для PLINQ, но, к сожалению, обычно они выполняются последовательно, т.к. полагаются на единственное начальное значение. Чтобы смягчить данную проблему, PLINQ предлагает еще одну перегруженную версию метода `Aggregate`, которая позволяет указывать множество начальных значений — или скорее *фабричную функцию начальных значений*. В каждом потоке эта функция выполняется для генерации отдельного начального значения, которое фактически становится *локальным для потока* накопителем, куда локально агрегируются элементы.

Потребуется также предоставить функцию для указания способа объединения локального и главного накопителей. Наконец, перегруженная версия метода `Aggregate` (отчасти беспринципно) ожидает делегат для проведения любой финальной трансформации результата (в принципе его легко обеспечить, просто выполняя нужную функцию на результате после его получения). Таким образом, ниже перечислены четыре делегата в порядке их передачи.

- `seedFactory`. Возвращает новый локальный накопитель.
- `updateAccumulatorFunc`. Агрегирует элемент в локальный накопитель.
- `combineAccumulatorFunc`. Объединяет локальный накопитель с главным накопителем.
- `resultSelector`. Применяет любую финальную трансформацию к конечному результату.



В простых сценариях можно указывать *начальное значение*, а не фабрику начальных значений. Такая тактика потерпит неудачу, когда начальное значение относится к ссылочному типу, который требуется изменять, потому что один и тот же экземпляр будет затем совместно использоваться всеми потоками.

В качестве очень простого примера ниже приведен запрос, который суммирует значения в массиве `numbers`:

```
numbers.AsParallel().Aggregate (
    () => 0,                                // seedFactory
    (localTotal, n) => localTotal + n,        // updateAccumulatorFunc
    (mainTot, localTot) => mainTot + localTot, // combineAccumulatorFunc
    finalResult => finalResult)                // resultSelector
```

Пример несколько надуман, т.к. тот же самый результат не менее эффективно можно было бы получить с применением более простых подходов (скажем, с помощью агрегации без начального значения или, что еще лучше, посредством операции `Sum`). Чтобы предложить более реалистичный пример, предположим, что требуется вычислить частоту появления каждой буквы английского алфавита в заданной строке. Простое последовательное решение может выглядеть следующим образом:

```
string text = "Let's suppose this is a really long string";
var letterFrequencies = new int[26];
foreach (char c in text)
{
    int index = char.ToUpper (c) - 'A';
    if (index >= 0 && index < 26) letterFrequencies [index]++;
}
```



Примером, когда входной текст может оказаться очень длинным, являются генные цепочки. В таком случае “алфавит” состоит из букв *a, c, g и t*.

Для распараллеливания такого запроса мы могли бы заменить оператор `foreach` вызовом метода `Parallel.ForEach` (как будет показано в следующем разделе), но тогда пришлось бы иметь дело с проблемами параллелизма на совместно используемом массиве. Блокирование доступа к данному массиву решило бы проблемы, но ликвидировало бы возможность распараллеливания.

Операция Aggregate обеспечивает более аккуратное решение. В этом случае накопителем выступает массив, похожий на массив letterFrequencies из предыдущего примера. Ниже представлена последовательная версия, использующая Aggregate:

```
int[] result =
text.Aggregate (
    new int[26], // Создать "накопитель"
    (letterFrequencies, c) => // Агрегировать букву в этот "накопитель"
    {
        int index = char.ToUpper (c) - 'A';
        if (index >= 0 && index < 26) letterFrequencies [index]++;
        return letterFrequencies;
    });

```

А вот параллельная версия, в которой применяется специальная перегруженная версия Aggregate из PLINQ:

```
int[] result =
text.AsParallel().Aggregate (
    () => new int[26], // Создать новый локальный накопитель
    (localFrequencies, c) => // Агрегировать в этот локальный накопитель
    {
        int index = char.ToUpper (c) - 'A';
        if (index >= 0 && index < 26) localFrequencies [index]++;
        return localFrequencies;
    },
    // Агрегировать локальный и главный накопители
    (mainFreq, localFreq) =>
        mainFreq.Zip (localFreq, (f1, f2) => f1 + f2).ToArray(),
    finalResult => finalResult // Выполнить любую финальную трансформацию
);
// конечного результата

```

Обратите внимание, что функция локального накопителя *изменяет* массив localFrequencies. Возможность выполнения такой оптимизации важна — и она законна, поскольку массив localFrequencies является локальным для каждого потока.

Класс Parallel

Инфраструктура PFX предоставляет базовую форму структурированного параллелизма через три статических метода в классе Parallel.

- Parallel.Invoke. Запускает массив делегатов параллельно.
- Parallel.For. Выполняет параллельный эквивалент цикла for языка C#.
- Parallel.ForEach. Выполняет параллельный эквивалент цикла foreach языка C#.

Все три метода блокируются вплоть до завершения всей работы. Как и с PLINQ, в случае необработанного исключения оставшиеся рабочие потоки останавливаются после их текущей итерации, а исключение (либо их набор) передается обратно вызывающему потоку внутри оболочки AggregateException (как объясняется в разделе “Работа с AggregateException” далее в главе).

Parallel.Invoke

Метод `Parallel.Invoke` запускает массив делегатов `Action` параллельно, после чего ожидает их завершения. Его простейшая версия определена следующим образом:

```
public static void Invoke (params Action[] actions);
```

Как и в PLINQ, методы `Parallel.*` оптимизированы для выполнения работы с интенсивными вычислениями, но не интенсивным вводом-выводом. Тем не менее, загрузка двух веб-страниц за раз позволяет легко продемонстрировать использование метода `Parallel.Invoke`:

```
Parallel.Invoke (
    () => new WebClient().DownloadFile ("http://www.linqpad.net", "lp.html"),
    () => new WebClient().DownloadFile ("http://microsoft.com", "ms.html"));
```

На первый взгляд код выглядит удобным сокращением для создания и ожидания двух привязанных к потокам объектов `Task`. Однако существует важное отличие: метод `Parallel.Invoke` по-прежнему будет работать эффективно, даже если ему передать массив из миллиона делегатов. Причина в том, что он *разбивает* большое количество элементов на пакеты, которые назначает небольшому числу существующих объектов `Task`, а не создает отдельный объект `Task` для каждого делегата.

Как и со всеми методами класса `Parallel`, объединение результатов возлагается полностью на вас. Это значит, что вы должны помнить о безопасности в отношении потоков. Например, приведенный ниже код не является безопасным к потокам:

```
var data = new List<string>();
Parallel.Invoke (
    () => data.Add (new WebClient().DownloadString ("http://www.foo.com")),
    () => data.Add (new WebClient().DownloadString ("http://www.far.com")));
```

Помещение кода добавления в список внутрь блокировки решило бы проблему, но блокировка создаст узкое место в случае гораздо более крупных массивов быстро выполняющихся делегатов. Лучшее решение предусматривает использование безопасных к потокам коллекций, которые рассматриваются далее в главе — идеальным вариантом в данном случае была бы коллекция `ConcurrentBag`.

Метод `Parallel.Invoke` также имеет перегруженную версию, принимающую объект `ParallelOptions`:

```
public static void Invoke (ParallelOptions options,
                           params Action[] actions);
```

С помощью объекта `ParallelOptions` можно вставить признак отмены, ограничить максимальную степень параллелизма и указать специальный планировщик задач. Признак отмены играет важную роль, когда выполняется (ориентировочно) большее количество задач, чем имеется процессорных ядер: при отмене все незапущенные делегаты будут отброшены. Однако любые уже выполняющиеся делегаты продолжат свою работу вплоть до ее завершения. В разделе “Отмена” ранее в главе приводился пример применения признаков отмены.

Parallel.For и Parallel.ForEach

Методы Parallel.For и Parallel.ForEach реализуют эквиваленты циклов for и foreach из C#, но с выполнением каждой итерации параллельно, а не последовательно. Ниже показаны их (простейшие) сигнатуры:

```
public static ParallelLoopResult For (
    int fromInclusive, int toExclusive, Action<int> body)
public static ParallelLoopResult ForEach<TSource> (
    IEnumerable<TSource> source, Action<TSource> body)
```

Следующий последовательный цикл for:

```
for (int i = 0; i < 100; i++)
    Foo (i);
```

распараллеливается примерно так:

```
Parallel.For (0, 100, i => Foo (i));
```

или еще проще:

```
Parallel.For (0, 100, Foo);
```

А представленный далее последовательный цикл foreach:

```
foreach (char c in "Hello, world")
    Foo (c);
```

распараллеливается следующим образом:

```
Parallel.ForEach ("Hello, world", Foo);
```

Рассмотрим практический пример. Если мы импортируем пространство имен System.Security.Cryptography, то сможем генерировать шесть строк с парами открытого и секретного ключей параллельно:

```
var keyPairs = new string[6];
Parallel.For (0, keyPairs.Length,
    i => keyPairs[i] = RSA.Create().ToString (true));
```

Как и в случае Parallel.Invoke, методам Parallel.For и Parallel.ForEach можно передавать большое количество элементов работы и они будут эффективно распределены по нескольким задачам.



Последний запрос можно также построить с помощью PLINQ:

```
string[] keyPairs =
    ParallelEnumerable.Range (0, 6)
        .Select (i => RSA.Create().ToString (true))
        .ToArray();
```

Сравнение внешних и внутренних циклов

Методы Parallel.For и Parallel.ForEach обычно лучше всего работают на внешних, а не на внутренних циклах. Причина в том, что посредством внешних циклов вы предлагаете распараллеливать более крупные порции работы, снижая накладные расходы по управлению. Распараллеливание сразу внутрен-

них и внешних циклов обычно излишне. В следующем примере для получения ощутимой выгоды от распараллеливания внутреннего цикла обычно требуется более 100 ядер:

```
Parallel.For (0, 100, i =>
{
    Parallel.For (0, 50, j => Foo (i, j));      // Внутренний цикл лучше
});                                              // выполнять последовательно
```

Индексированная версия `Parallel.ForEach`

Временами полезно знать индекс итерации цикла. В случае последовательного цикла `foreach` это легко:

```
int i = 0;
foreach (char c in "Hello, world")
    Console.WriteLine (c.ToString() + i++);
```

Однако инкрементирование совместно используемой переменной не является безопасным к потокам в параллельном контексте. Взамен должна применяться следующая версия `ForEach`:

```
public static ParallelLoopResult ForEach<TSource> (
    IEnumerable<TSource> source, Action<TSource, ParallelLoopState, long> body)
```

Мы проигнорируем класс `ParallelLoopState` (он будет рассматриваться в следующем разделе). Пока что нас интересует третий параметр типа `long`, который отражает индекс цикла:

```
Parallel.ForEach ("Hello, world", (c, state, i) =>
{
    Console.WriteLine (c.ToString() + i);
});
```

Чтобы задействовать такой прием в практическом примере, давайте вернемся к программе проверки орфографии, которую мы писали с помощью PLINQ. Следующий код загружает словарь и массив, содержащий миллион слов, для целей тестирования:

```
if (!File.Exists ("WordLookup.txt"))           // Содержит около 150 000 слов
    File.WriteAllText ("WordLookup.txt",
        await new HttpClient ().GetStringAsync (
            "http://www.albahari.com/ispell/allwords.txt"));

var wordLookup = new HashSet<string> (
    File.ReadAllLines ("WordLookup.txt"),
    StringComparer.InvariantCultureIgnoreCase);

var random = new Random ();
string[] wordList = wordLookup.ToArray ();

string[] wordsToTest = Enumerable.Range (0, 1000000)
    .Select (i => wordList [random.Next (0, wordList.Length)])
    .ToArray ();

wordsToTest [12345] = "woozsh";                // Внесение пары
wordsToTest [23456] = "wubsie";                // орфографических ошибок
```

Мы можем выполнить проверку орфографии в массиве wordsToTest с использованием индексированной версии Parallel.ForEach:

```
var misspellings = new ConcurrentBag<Tuple<int, string>>();  
Parallel.ForEach (wordsToTest, (word, state, i) =>  
{  
    if (!wordLookup.Contains (word))  
        misspellings.Add (Tuple.Create ((int) i, word));  
});
```

Обратите внимание, что мы должны объединять результаты в безопасную к потокам коллекцию: по сравнению с применением PLINQ необходимость в таком действии считается недостатком. Преимущество перед PLINQ связано с тем, что мы избегаем использования индексированной операции запроса Select, которая менее эффективна, чем индексированная версия метода ForEach.

ParallelLoopState: раннее прекращение циклов

Поскольку тело цикла в параллельном методе For или ForEach представляет собой делегат, выйти из цикла до его полного завершения с помощью оператора break не получится. Взамен придется вызвать метод Break или Stop на объекте ParallelLoopState:

```
public class ParallelLoopState  
{  
    public void Break();  
    public void Stop();  
  
    public bool IsExceptional { get; }  
    public bool IsStopped { get; }  
    public long? LowestBreakIteration { get; }  
    public bool ShouldExitCurrentIteration { get; }  
}
```

Получить объект ParallelLoopState довольно просто: все версии методов For и ForEach перегружены для приема тела цикла типа Action<TSource, ParallelLoopState>. Таким образом, для распараллеливания следующего цикла:

```
foreach (char c in "Hello, world")  
    if (c == ',')  
        break;  
    else  
        Console.Write (c);
```

нужно поступить так:

```
Parallel.ForEach ("Hello, world", (c, loopState) =>  
{  
    if (c == ',')  
        loopState.Break();  
    else  
        Console.Write (c);  
});
```

Вот вывод:

```
Hlloe
```

В выводе несложно заметить, что тела циклов могут завершаться в произвольном порядке. Помимо такого отличия вызов Break выдает, *по меньшей мере*, те же самые элементы, что и при последовательном выполнении цикла: приведенный пример будет всегда выводить **минимум** буквы H, e, l, l и o в каком-нибудь порядке. Напротив, вызов Stop вместо Break приводит к принудительному завершению всех потоков сразу после их текущей итерации. В данном примере вызов Stop может дать подмножество букв H, e, l, l и o, если другой поток отстал. Вызов Stop полезен, когда обнаружено то, что требовалось найти, или выяснилось, что что-то пошло не так, и потому результаты просматриваться не будут.



Методы Parallel.For и Parallel.ForEach возвращают объект ParallelLoopResult, который открывает доступ к свойствам с именами IsCompleted и LowestBreakIteration. Они сообщают, полностью ли завершился цикл, и если это не так, то указывают, на какой итерации он был прекращен.

Если свойство LowestBreakIteration возвращает null, тогда в цикле вызывался метод Stop (а не Break).

В случае длинного тела цикла может потребоваться прервать другие потоки где-то на полпути выполнения тела метода при раннем вызове Break или Stop, что реализуется за счет опроса свойства ShouldExitCurrentIteration в различных местах кода. Указанное свойство принимает значение true немедленно после вызова Stop или очень скоро после вызова Break.



Свойство ShouldExitCurrentIteration также становится равным true после запроса отмены либо в случае генерации исключения в цикле.

Свойство IsExceptional позволяет узнать, произошло ли исключение в другом потоке. Любое необработанное исключение приведет к останову цикла после текущей итерации каждого потока: чтобы избежать его, вы должны явно обрабатывать исключения в своем коде.

Оптимизация посредством локальных значений

Методы Parallel.For и Parallel.ForEach предлагают набор перегруженных версий, которые работают с аргументом обобщенного типа по имени TLocal. Такие перегруженные версии призваны помочь оптимизировать объединение данных из циклов с интенсивными итерациями. Простейшая из них выглядит следующим образом:

```
public static ParallelLoopResult For <TLocal> (  
    int fromInclusive,  
    int toExclusive,
```

```
Func <TLocal> localInit,  
Func <int, ParallelLoopState, TLocal, TLocal> body,  
Action <TLocal> localFinally);
```

На практике данные методы редко востребованы, т.к. их целевые сценарии в основном покрываются PLINQ (что, в принципе, хорошо, поскольку иногда их перегруженные версии выглядят слегка устрашающими).

По существу вот в чем заключается проблема: предположим, что необходимо просуммировать квадратные корни чисел от 1 до 10 000 000. Вычисление 10 млн квадратных корней легко распараллеливается, но суммирование их значений — дело хлопотное, т.к. обновление итоговой суммы должно быть помещено внутрь блокировки:

```
object locker = new object();  
double total = 0;  
Parallel.For (1, 10000000,  
    i => { lock (locker) total += Math.Sqrt (i); });
```

Выигрыш от распараллеливания более чем нивелируется ценой получения 10 млн блокировок, а также блокированием результата.

Однако в реальности нам *не нужны* 10 млн блокировок. Представьте себе команду волонтеров по сборке большого объема мусора. Если все работники совместно пользуются единственным мусорным ведром, то хождения к нему и состязания сделают процесс крайне неэффективным. Очевидное решение предусматривает снабжение каждого работника собственным или “локальным” мусорным ведром, которое время от времени опустошается в главный контейнер.

Именно таким способом работают версии `TLocal` методов `For` и `ForEach`. Волонтеры — это внутренние рабочие потоки, а *локальное значение* представляет локальное мусорное ведро. Чтобы класс `Parallel` справился с этой работой, необходимо предоставить два дополнительных делегата.

Делегат, который указывает, каким образом инициализировать новое локальное значение.

Делегат, который указывает, каким образом объединять локальную агрегацию с главным значением.

Кроме того, вместо возвращения `void` делегат тела цикла должен возвращать новую агрегацию для локального значения. Ниже приведен переделанный пример:

```
object locker = new object();  
double grandTotal = 0;  
Parallel.For (1, 10000000,  
    () => 0.0,                                // Инициализировать локальное значение  
    (i, state, localTotal) =>                // Делегат тела цикла. Обратите внимание,  
        localTotal + Math.Sqrt (i),           // что он возвращает новый локальный итог  
    localTotal =>                            // Добавить локальное значение  
        { lock (locker) grandTotal += localTotal; } // к главному значению  
);
```

Здесь по-прежнему требуется блокировка, но только вокруг агрегирования локального значения с общей суммой, что делает процесс гораздо эффективнее.



Как утверждалось ранее, PLINQ часто хорошо подходит для таких сценариев. Распараллелить наш пример с помощью PLINQ можно было бы так:

```
ParallelEnumerable.Range (1, 10000000)
    .Sum (i => Math.Sqrt (i))
```

(Обратите внимание, что мы применяем `ParallelEnumerable` для обеспечения *разбиения на основе диапазонов*: в данном случае оно улучшает производительность, потому что все числа требуют равного времени на обработку.)

В более сложных сценариях вместо `Sum` может использоваться LINQ-операция `Aggregate`. Если вы предоставите фабрику локальных начальных значений, то ситуация будет в чем-то аналогична представлению функции локальных значений для `Parallel.ForEach`.

Параллелизм задач

Параллелизм задач — это подход самого низкого уровня к распараллеливанию с применением инфраструктуры PFX. Классы для работы на таком уровне определены в пространстве имен `System.Threading.Tasks` и включают перечисленные ниже.

Класс	Назначение
<code>Task</code>	Для управления единицей работы
<code>Task<TResult></code>	Для управления единицей работы с возвращаемым значением
<code>TaskFactory</code>	Для создания задач
<code>TaskFactory<TResult></code>	Для создания задач и продолжений с тем же самым возвращаемым типом
<code>TaskScheduler</code>	Для управления планированием задач
<code>TaskCompletionSource</code>	Для ручного управления рабочим потоком действий задачи

Основы задач были раскрыты в главе 14; в настоящем разделе мы рассмотрим расширенные возможности задач, которые ориентированы на параллельное программирование. В частности, будут обсуждаться следующие темы:

- тонкая настройка планирования задачи;
- установка отношения “родительская/дочерняя”, когда одна задача запускается из другой;
- расширенное использование продолжений;
- класс `TaskFactory`.



Библиотека параллельных задач (TPL) позволяет создавать сотни (или даже тысячи) задач с минимальными накладными расходами. Но если необходимо создавать миллионы задач, то для поддержания эффективности задачи понадобится организовывать в более крупные единицы работы. Класс `Parallel` и `PLINQ` делают это автоматически.



В Visual Studio предусмотрено окно для мониторинга задач (`Debug`⇒`Window`⇒`Parallel Tasks` (Отладка⇒Окно⇒Параллельные задачи)). Окно `Parallel Tasks` (Параллельные задачи) эквивалентно окну `Threads` (Потоки), но предназначено для задач. Окно `Parallel Stacks` (Параллельные стеки) также поддерживает специальный режим для задач.

Создание и запуск задач

Как было описано в главе 14, метод `Task.Run` создает и запускает объект `Task` или `Task<TResult>`. На самом деле `Task.Run` является сокращением для вызова метода `Task.Factory.StartNew`, который предлагает более высокую гибкость через дополнительные перегруженные версии.

Указание объекта состояния

Метод `Task.Factory.StartNew` позволяет указывать объект *состояния*, который передается целевому методу. Сигнатура целевого метода должна в данном случае содержать одиночный параметр типа `object`:

```
var task = Task.Factory.StartNew (Greet, "Hello");
task.Wait(); // Ожидать, пока задача завершится.

void Greet (object state) { Console.Write (state); }      // Hello
```

Такой прием дает возможность избежать затрат на замыкание, требуемое для выполнения лямбда-выражения, которое вызывает метод `Greet`. Это является микрооптимизацией и редко необходимо на практике, так что мы можем оставить объект состояния для более полезного сценария — назначение задаче значащего имени. Затем для запрашивания имени можно применять свойство `AsyncState`:

```
var task = Task.Factory.StartNew (state => Greet ("Hello"), "Greeting");
Console.WriteLine (task.AsyncState);                         // Greeting
task.Wait();

void Greet (string message) { Console.Write (message); }
```



Среда Visual Studio отображает значение свойства `AsyncState` каждой задачи в окне `Parallel Tasks`, так что значащее имя задачи может основательно упростить отладку.

TaskCreationOptions

Настроить выполнение задачи можно за счет указания перечисления TaskCreationOptions при вызове StartNew (или создании объекта Task). TaskCreationOptions — перечисление флагов со следующими (комбинируемыми) значениями:

```
LongRunning, PreferFairness, AttachedToParent
```

Значение LongRunning предлагает планировщику выделить для задачи поток; как было показано в главе 14, это полезно для задач с интенсивным вводом-выводом, а также для длительно выполняющихся задач, которые иначе могут заставить кратко выполняющиеся задачи ожидать чрезмерно долгое время перед тем, как они будут запланированы.

Значение PreferFairness сообщает планировщику о необходимости попытаться обеспечить планирование задач в том порядке, в каком они были запущены. Обычно планировщик может поступать иначе, потому что он внутренне оптимизирует планирование задач с использованием локальных очередей захвата работ — оптимизация, позволяющая создавать *дочерние* задачи без накладных расходов на состязания, которые в противном случае возникли бы при доступе к единственной очереди работ. Дочерняя задача создается путем указания значения AttachedToParent.

Дочерние задачи

Когда одна задача запускает другую, можно дополнительно установить отношение “родительская/дочерняя”:

```
Task parent = Task.Factory.StartNew () =>
{
    Console.WriteLine ("I am a parent");
    Task.Factory.StartNew () => // Отсоединенная задача
    {
        Console.WriteLine ("I am detached");
    });
    Task.Factory.StartNew () => // Дочерняя задача
    {
        Console.WriteLine ("I am a child");
    }, TaskCreationOptions.AttachedToParent);
});
```

Дочерняя задача специфична тем, что при ожидании завершения *родительской* задачи ожидаются также и любые ее дочерние задачи. До этой точки поднимаются любые дочерние исключения:

```
TaskCreationOptions atp = TaskCreationOptions.AttachedToParent;
var parent = Task.Factory.StartNew () =>
{
    Task.Factory.StartNew () => // Дочерняя
    {
        Task.Factory.StartNew () => { throw null; }, atp); // Внучатая
    }, atp);
}); // Следующий вызов генерирует исключение NullReferenceException
// (помещенное в оболочку AggregateExceptions):
parent.Wait();
```

Как вскоре будет показано, прием может оказаться особенно полезным, когда дочерняя задача является продолжением.

Ожидание на множестве задач

В главе 14 упоминалось, что организовать ожидание на одиночной задаче можно либо вызовом ее метода `Wait`, либо обращением к ее свойству `Result` (в случае `Task<TResult>`). Можно также реализовать ожидание сразу на множестве задач — с помощью статических методов `Task.WaitAll` (ожидание завершения всех указанных задач) и `Task.WaitAny` (ожидание завершения какой-то одной задачи).

Метод `WaitAll` похож на ожидание каждой задачи по очереди, но более эффективен тем, что требует (максимум) одного переключения контекста. Кроме того, если в одной или большем количестве задач генерируется необработанное исключение, то `WaitAll` по-прежнему ожидает каждую задачу. Затем он повторно генерирует исключение `AggregateException`, в котором накоплены исключения из всех отказавших задач (ситуация, когда класс `AggregateException` по-настоящему полезен). Ниже показан эквивалентный код:

```
// Предполагается, что t1, t2 и t3 - задачи:  
var exceptions = new List<Exception>();  
try { t1.Wait(); } catch (AggregateException ex) { exceptions.Add (ex); }  
try { t2.Wait(); } catch (AggregateException ex) { exceptions.Add (ex); }  
try { t3.Wait(); } catch (AggregateException ex) { exceptions.Add (ex); }  
if (exceptions.Count > 0) throw new AggregateException (exceptions);
```

Вызов метода `WaitAny` эквивалентен ожиданию события `ManualResetEventSlim`, которое сигнализируется каждой задачей, как только она завершена.

Помимо времени тайм-аута методам `Wait` можно также передавать признак отмены: это позволяет отменить ожидание, но не саму задачу.

Отмена задач

При запуске задачи можно дополнительно передавать признак отмены. Если позже через данный признак произойдет отмена, то задача войдет в состояние `Canceled` (отменена):

```
var cts = new CancellationSource();  
CancellationToken token = cts.Token;  
cts.CancelAfter (500);  
  
Task task = Task.Factory.StartNew (() =>  
{  
    Thread.Sleep (1000);  
    token.ThrowIfCancellationRequested(); // Проверить запрос отмены  
}, token);  
try { task.Wait(); }  
catch (AggregateException ex)  
{  
    Console.WriteLine (ex.InnerException is TaskCanceledException); // True  
    Console.WriteLine (task.IsCanceled); // True  
    Console.WriteLine (task.Status); // Canceled  
}
```

`TaskCanceledException` — подкласс класса `OperationCanceledException`. Если нужно явно сгенерировать исключение `OperationCanceledException` (вместо вызова `token.ThrowIfCancellationRequested`), тогда потребуется передать признак отмены конструктору `OperationCanceledException`. Если это не сделано, то задача не войдет в состояние `TaskStatus.Canceled` и не будет инициировать продолжение `OnlyOnCanceled`.

Если задача отменяется еще до своего запуска, тогда она не будет запланирована — в таком случае исключение `OperationCanceledException` сгенерируется немедленно.

Поскольку признаки отмены распознаются другими API-интерфейсами, их можно передавать другим конструкциям и отмена будет распространяться гладким образом:

```
var cancelSource = new CancellationTokenSource();
CancellationToken token = cancelSource.Token;
Task task = Task.Factory.StartNew (() =>
{
    // Передать признак отмены в запрос PLINQ:
    var query = someSequence.AsParallel().WithCancellation (token)...
    ...выполнить перечисление результатов запроса...
});
```

Вызов `Cancel` на `cancelSource` в рассмотренном примере приведет к отмене запроса PLINQ с генерацией исключения `OperationCanceledException` в теле задачи, которое затем отменит задачу.



Признаки отмены, которые можно передавать в методы, подобные `Wait` и `CancelAndWait`, позволяют отменить операцию ожидания, а не саму задачу.

Продолжение

Метод `ContinueWith` выполняет делегат немедленно после завершения задачи:

```
// предшественник
Task task1 = Task.Factory.StartNew (() => Console.Write ("antecedent.."));
// продолжение
Task task2 = task1.ContinueWith (ant => Console.Write ("..continuation"));
```

Как только задача `task1` (*предшественник*) завершается, отказывает или отменяется, запускается задача `task2` (*продолжение*). (Если задача `task1` была завершена до того, как выполнилась вторая строка кода, то задача `task2` будет запланирована для незамедлительного выполнения.) Аргумент `ant`, переданный лямбда-выражению продолжения, представляет собой ссылку на предшествующую задачу. Сам метод `ContinueWith` возвращает задачу, облегчая добавление дополнительных продолжений.

По умолчанию предшествующая задача и задача продолжения могут выполняться в разных потоках. Указав `TaskContinuationOptions.ExecuteSynchronously` при вызове `ContinueWith`, можно заставить их выполнятся в одном и том же потоке: это позволяет улучшить производительность при мелкомодульных продолжениях за счет уменьшения косвенности.

Продолжение и Task<TResult>

Подобно обычным задачам продолжения могут иметь тип Task<TResult> и возвращать данные. В следующем примере мы вычисляем Math.Sqrt(8*2) с применением последовательности соединенных в цепочку задач и выводим результат:

```
Task.Factory.StartNew<int> (() => 8)
    .ContinueWith (ant => ant.Result * 2)
    .ContinueWith (ant => Math.Sqrt (ant.Result))
    .ContinueWith (ant => Console.WriteLine (ant.Result)); // 4
```

Из-за стремления к простоте этот пример получился несколько неестественным; в реальных проектах такие лямбда-выражения могли бы вызывать функции с интенсивными вычислениями.

Продолжение и исключения

Продолжение может узнать, отказал ли предшественник, запросив свойство Exception предшествующей задачи или просто вызвав метод Result/Wait и перехватив результирующее исключение AggregateException. Если предшественник отказал, и то же самое сделало продолжение, тогда исключение считается *необнаруженым*; в таком случае при последующей обработке задачи сборщиком мусора будет сгенерировано статическое исключение TaskScheduler.UnobservedTaskException.

Безопасный шаблон предполагает повторную генерацию исключений предшественника. До тех пор пока ожидается продолжение, исключение будет распространяться и повторно генерироваться для ожидающей задачи:

```
Task continuation = Task.Factory.StartNew () => { throw null; }
    .ContinueWith (ant =>
{
    ant.Wait();
    // Продолжить обработку...
});

continuation.Wait(); // Исключение теперь передается обратно вызывающей задаче
```

Еще один способ работы с исключениями предусматривает указание разных продолжений для исходов с исключениями и без исключений, что делается с помощью перечисления TaskContinuationOptions:

```
Task task1 = Task.Factory.StartNew () => { throw null; };
Task error = task1.ContinueWith (ant => Console.Write (ant.Exception),
                                TaskContinuationOptions.OnlyOnFaulted);

Task ok = task1.ContinueWith (ant => Console.Write ("Success!"),
                             TaskContinuationOptions.NotOnFaulted);
```

Как вскоре будет показано, такой шаблон особенно удобен в сочетании с дочерними задачами.

Следующий расширяющий метод “поглощает” необработанные исключения задачи:

```

public static void IgnoreExceptions (this Task task)
{
    task.ContinueWith (t => { var ignore = t.Exception; },
        TaskContinuationOptions.OnlyOnFaulted);
}

```

(Метод может быть улучшен добавлением кода для регистрации исключения.) Вот как его можно использовать:

```
Task.Factory.StartNew (() => { throw null; }).IgnoreExceptions();
```

Продолжение и дочерние задачи

Мощная особенность продолжений связана с тем, что они запускаются, только когда завершены все дочерние задачи (рис. 22.5). В этой точке любые исключения, сгенерированные дочерними задачами, маршализуются в продолжение.

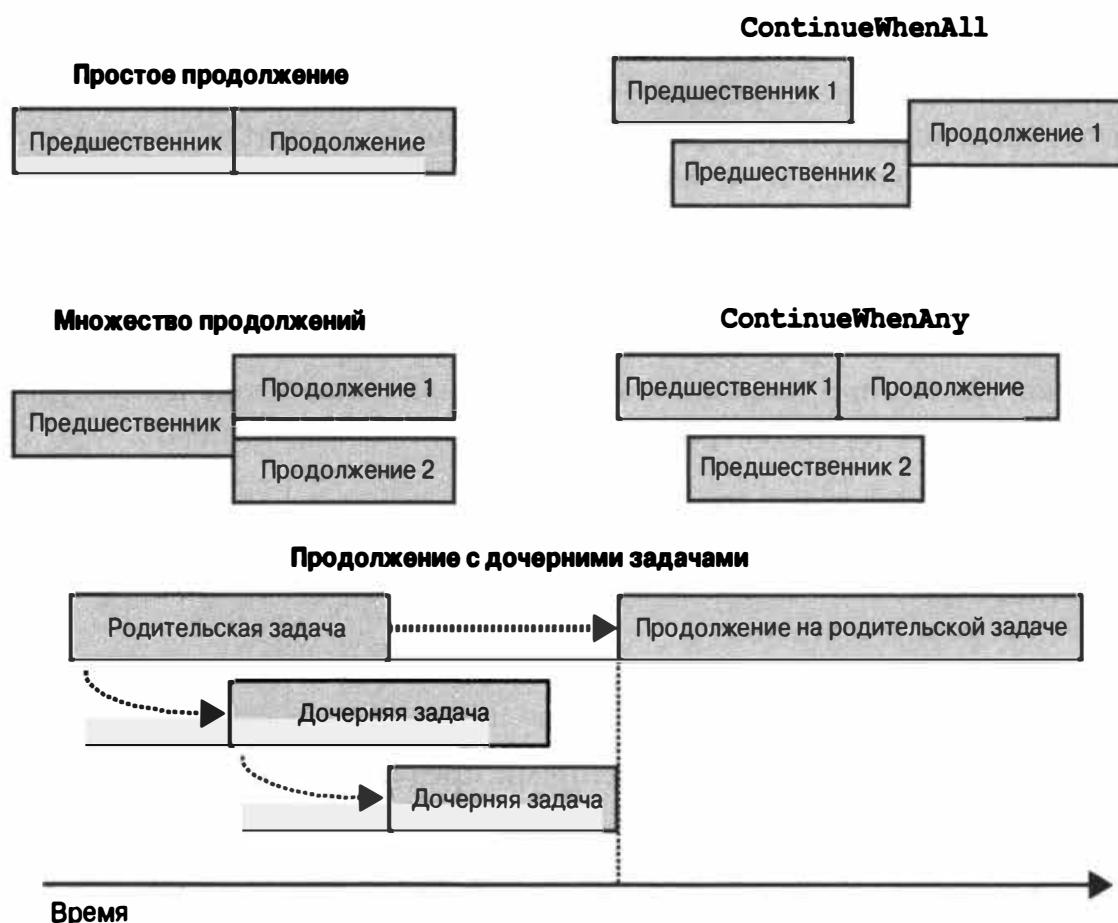


Рис. 22.5. Продолжения

В следующем примере мы начинаем три дочерние задачи, каждая из которых генерирует исключение `NullReferenceException`. Затем мы перехватываем все исключения сразу через продолжение на родительской задаче:

```

TaskCreationOptions atp = TaskCreationOptions.AttachedToParent;
Task.Factory.StartNew () =>
{
    Task.Factory.StartNew (() => { throw null; }, atp);
    Task.Factory.StartNew (() => { throw null; }, atp);
}

```

```
    Task.Factory.StartNew(() => { throw null; }, atp);
})
.ContinueWith(p => Console.WriteLine(p.Exception),
    TaskContinuationOptions.OnlyOnFaulted);
```

Условные продолжения

По умолчанию продолжение планируется *безусловным образом* — независимо от того, завершена предшествующая задача, сгенерировано исключение или задача была отменена. Такое поведение можно изменить с помощью набора (комбинируемых) флагов, определенных в перечислении `TaskContinuationOptions`. Вот три основных флага, которые управляют условным продолжением:

```
NotOnRanToCompletion = 0x10000,
NotOnFaulted = 0x20000,
NotOnCanceled = 0x40000,
```

Флаги являются *субтрактивными* в том смысле, что чем больше их применяется, тем менее вероятно выполнение продолжения. Для удобства также предоставляются следующие заранее скомбинированные значения:

```
OnlyOnRanToCompletion = NotOnFaulted | NotOnCanceled,
OnlyOnFaulted = NotOnRanToCompletion | NotOnCanceled,
OnlyOnCanceled = NotOnRanToCompletion | NotOnFaulted
```

(Объединение всех флагов `Not*`, т.е. `NotOnRanToCompletion`, `NotOnFaulted` и `NotOnCanceled`, бессмысленно, т.к. в результате продолжение будет всегда отменяться.)

Наличие “`RanToCompletion`” в имени означает успешное завершение предшествующей задачи — без отмены или необработанных исключений.

Наличие “`Faulted`” в имени означает, что в предшествующей задаче было сгенерировано необработанное исключение.

Наличие “`Canceled`” в имени означает одну из следующих двух ситуаций.

- Предшествующая задача была отменена через ее признак отмены. Другими словами, в предшествующей задаче было сгенерировано исключение `OperationCanceledException`, свойство `CancellationToken` которого соответствует тому, что передавалось предшествующей задаче во время запуска.
- Предшествующая задача была неявно отменена, поскольку она не удовлетворила предикат условного продолжения.

Важно понимать, что когда продолжение не выполнилось из-за упомянутых флагов, оно не забыто и не отброшено — это продолжение *отменено*. Другими словами, любые продолжения на самом отмененном продолжении *затем запустятся*, если только вы не указали в условии флаг `NotOnCanceled`. Например, взгляните на приведенный далее код:

```
Task t1 = Task.Factory.StartNew(...);
Task fault = t1.ContinueWith(ant => Console.WriteLine("fault"),
    TaskContinuationOptions.OnlyOnFaulted);
Task t3 = fault.ContinueWith(ant => Console.WriteLine("t3"));
```

Несложно заметить, что задача `t3` всегда будет запланирована — даже если `t1` не генерирует исключение (рис. 22.6). Причина в том, что если задача `t1` завершена успешно, тогда задача `fault` будет отменена, и с учетом отсутствия ограничений продолжения задача `t3` будет запущена безусловным образом.



Рис. 22.6. Условные продолжения

Если нужно, чтобы задача `t3` выполнялась, только если действительно была запущена задача `fault`, то потребуется поступить так:

```
Task t3 = fault.ContinueWith (ant => Console.WriteLine ("t3"),  
                               TaskContinuationOptions.NotOnCanceled);
```

(В качестве альтернативы мы могли бы указать `OnlyOnRanToCompletion`; разница в том, что тогда задача `t3` не запустилась бы в случае генерации исключения внутри задачи `fault`.)

Продолжение на основе множества предшествующих задач

С помощью методов `ContinueWhenAll` и `ContinueWhenAny` класса `TaskFactory` выполнение продолжения можно планировать на основе завершения множества предшествующих задач. Однако эти методы стали избыточными после появления комбинаторов задач, которые обсуждались в главе 14 (`WhenAll` и `WhenAny`). В частности, при наличии следующих задач:

```
var task1 = Task.Run (() => Console.Write ("X"));  
var task2 = Task.Run (() => Console.Write ("Y"));
```

вот как можно запланировать выполнение продолжения, когда обе они завершатся:

```
var continuation = Task.Factory.ContinueWhenAll (  
    new[] { task1, task2 }, tasks => Console.WriteLine ("Done"));
```

Тот же результат легко получить с помощью комбинатора задач `WhenAll`:

```
var continuation = Task.WhenAll (task1, task2)  
    .ContinueWith (ant => Console.WriteLine ("Done"));
```

Множество продолжений на единственной предшествующей задаче

Вызов `ContinueWith` более одного раза на той же самой задаче создает множество продолжений на единственном предшественнике. Когда предшественник завершается, все продолжения запускаются вместе (если только не было указано значение `TaskContinuationOptions.ExecuteSynchronously`, из-за чего продолжения будут выполнятся последовательно).

Следующий код ожидает одну секунду, а затем выводит на консоль либо XY, либо YX:

```
var t = Task.Factory.StartNew(() => Thread.Sleep(1000));
t.ContinueWith(ant => Console.WriteLine("X"));
t.ContinueWith(ant => Console.WriteLine("Y"));
```

Планировщики задач

Планировщик задач распределяет задачи по потокам и представлен абстрактным классом `TaskScheduler`. В .NET предлагаются две конкретные реализации: *стандартный планировщик*, который работает в тандеме с пулем потоков CLR, и *планировщик контекста синхронизации*. Последний предназначен (главным образом) для содействия в работе с потоковой моделью WPF и Windows Forms, которая требует, чтобы доступ к элементам управления пользователяского интерфейса осуществлялся только из создавшего их потока (см. раздел “Многопоточность в обогащенных клиентских приложениях” в главе 14). Захватив такой планировщик, мы можем сообщить задаче или продолжению о выполнении в этом контексте:

```
// Предположим, что мы находимся в потоке пользовательского
// интерфейса внутри приложения Windows Forms или WPF:
_uiScheduler = TaskScheduler.FromCurrentSynchronizationContext();
```

Предполагая, что `Foo` — метод с интенсивными вычислениями, возвращающий строку, а `lblResult` — метка WPF или Windows Forms, вот как можно было бы безопасно обновить метку после завершения операции:

```
Task.Run(() => Foo())
    .ContinueWith(ant => lblResult.Content = ant.Result, _uiScheduler);
```

Разумеется, для действий подобного рода чаще будут использоваться асинхронные функции C#.

Возможно также написание собственного планировщика задач (путем создания подкласса `TaskScheduler`), хотя это делается только в очень специализированных сценариях. Для специального планирования чаще всего будет применяться класс `TaskCompletionSource`.

TaskFactory

Когда вызывается `Task.Factory`, происходит обращение к статическому свойству класса `Task`, которое возвращает стандартный объект фабрики задач, т.е. `TaskFactory`. Назначение фабрики задач заключается в создании задач — в частности трех их видов:

- “обыкновенных” задач (через метод `StartNew`);
- продолжений с множеством предшественников (через методы `ContinueWhenAll` и `ContinueWhenAny`);
- задач, которые являются оболочками для методов, следующих устаревшему шаблону APM (через метод `FromAsync`; см. раздел “Устаревшие шаблоны” в главе 14).

Еще один способ создания задач предусматривает создание экземпляра Task и вызов метода Start. Тем не менее, подобным образом можно создавать только “обыкновенные” задачи, но не продолжения.

Создание собственных фабрик задач

Класс TaskFactory — не *абстрактная* фабрика: на самом деле вы можете создавать объекты данного класса, что удобно, когда нужно многократно создавать задачи с использованием тех же самых (нестандартных) значений для TaskCreationOptions, TaskContinuationOptions или TaskScheduler. Например, если требуется многократно создавать длительно выполняющиеся родительские задачи, тогда специальную фабрику можно построить следующим образом:

```
var factory = new TaskFactory (
    TaskCreationOptions.LongRunning | TaskCreationOptions.AttachedToParent,
    TaskContinuationOptions.None);
```

Затем создание задач сводится просто к вызову метода StartNew на фабрике:

```
Task task1 = factory.StartNew (Method1);
Task task2 = factory.StartNew (Method2);
...
```

Специальные опции продолжения применяются в случае вызова методов ContinueWhenAll и ContinueWhenAny.

Работа с AggregateException

Как вы уже видели, инфраструктура PLINQ, класс Parallel и объекты Task автоматически маршиализируют исключения потребителю. Чтобы понять, почему это важно, рассмотрим показанный ниже запрос LINQ, который на первой итерации генерирует исключение DivideByZeroException:

```
try
{
    var query = from i in Enumerable.Range (0, 1000000)
                select 100 / i;
    ...
}
catch (DivideByZeroException)
{
    ...
}
```

Если запросить у инфраструктуры PLINQ распараллеливание такого запроса, и она проигнорирует обработку исключений, то вполне возможно, что исключение DivideByZeroException сгенерируется в *отдельном потоке*, пропустив ваш блок catch и вызвав аварийное завершение приложения.

Поэтому исключения автоматически перехватываются и повторно генерируются для вызывающего потока. Но, к сожалению, дело не сводится просто к перехвату DivideByZeroException. Поскольку параллельные библиотеки задействуют множество потоков, вполне возможна одновременная генера-

ции двух и более исключений. Чтобы обеспечить получение сведений обо всех исключениях, по указанной причине исключения помещаются в контейнер `AggregateException`, свойство `InnerExceptions` которого содержит каждое из перехваченных исключений:

```
try
{
    var query = from i in ParallelEnumerable.Range(0, 1000000)
                select 100 / i;
    // Выполнить перечисление результатов запроса
    ...
}
catch (AggregateException aex)
{
    foreach (Exception ex in aex.InnerExceptions)
        Console.WriteLine(ex.Message);
}
```



Как инфраструктура PLINQ, так и класс `Parallel` при обнаружении первого исключения заканчивают выполнение запроса или цикла, не обрабатывая любые последующие элементы либо итерации тела цикла. Однако до завершения текущей итерации цикла могут быть сгенерированы дополнительные исключения. Первое возникшее исключение в `AggregateException` доступно через свойство `InnerException`.

Flatten и Handle

Класс `AggregateException` предоставляет пару методов для упрощения обработки исключений: `Flatten` и `Handle`.

Flatten

Объекты `AggregateException` довольно часто будут содержать другие объекты `AggregateException`. Пример, когда подобное может произойти — ситуация, при которой дочерняя задача генерирует исключение. Чтобы упростить обработку, можно устранить любой уровень вложения, вызвав метод `Flatten`. Этот метод возвращает новый объект `AggregateException` с обычным плоским списком внутренних исключений:

```
catch (AggregateException aex)
{
    foreach (Exception ex in aex.Flatten().InnerExceptions)
        myLogWriter.LogException(ex);
}
```

Handle

Иногда полезно перехватывать исключения только специфических типов, а исключения других типов генерировать повторно. Метод `Handle` класса

`AggregateException` предлагает удобное сокращение. Он принимает предикат исключений, который будет запускаться на каждом внутреннем исключении:

```
public void Handle (Func<Exception, bool> predicate)
```

Если предикат возвращает `true`, то считается, что исключение “обработано”. После того, как делегат запустится на всех исключениях, произойдет следующее:

- если все исключения были “обработаны” (делегат вернул `true`), то исключение не генерируется повторно;
- если были исключения, для которых делегат вернул `false` (“необработанные”), то строится новый объект `AggregateException`, содержащий такие исключения, и затем он генерируется повторно.

Например, приведенный далее код в конечном итоге повторно генерирует другой объект `AggregateException`, который содержит одиночное исключение `NullReferenceException`:

```
var parent = Task.Factory.StartNew () =>
{
    // Мы сгенерируем 3 исключения сразу, используя 3 дочерние задачи:
    int[] numbers = { 0 };

    var childFactory = new TaskFactory
        (TaskCreationOptions.AttachedToParent, TaskContinuationOptions.None);

    childFactory.StartNew (() => 5 / numbers[0]); // Деление на ноль
    childFactory.StartNew (() => numbers [1]);      // Выход индекса за
                                                    // допустимые пределы
    childFactory.StartNew (() => { throw null; }); // Ссылка null
};

try { parent.Wait(); }
catch (AggregateException aex)
{
    aex.Flatten().Handle (ex =>      // Обратите внимание, что
                                // по-прежнему нужно вызывать Flatten
    {
        if (ex is DivideByZeroException)
        {
            Console.WriteLine ("Divide by zero"); // Деление на ноль
            return true;                         // Это исключение "обработано"
        }
        if (ex is IndexOutOfRangeException)
        {
            Console.WriteLine ("Index out of range"); // Выход индекса за
                                                    // допустимые пределы
            return true;                         // Это исключение "обработано"
        }
        return false; // Все остальные исключения будут сгенерированы повторно
    });
}
```

Параллельные коллекции

.NET предлагает коллекции, безопасные в отношении потоков, которые определены в пространстве имен System.Collections.Concurrent:

Параллельная коллекция	Непараллельный эквивалент
ConcurrentStack<T>	Stack<T>
ConcurrentQueue<T>	Queue<T>
ConcurrentBag<T>	(отсутствует)
ConcurrentDictionary< TKey, TValue >	Dictionary< TKey, TValue >

Параллельные коллекции оптимизированы для сценариев с высокой степенью параллелизма; тем не менее, они также могут быть полезны в ситуациях, когда требуется коллекция, безопасная к потокам (в качестве альтернативы применению блокировки к обычной коллекции). Однако есть несколько предосторожений.

- По производительности традиционные коллекции превосходят параллельные коллекции во всех сценариях кроме тех, которые характеризуются высокой степенью параллелизма.
- Безопасная к потокам коллекция вовсе не гарантирует, что код, в котором она используется, будет безопасным в отношении потоков (см. раздел “Блокирование и безопасность к потокам” в главе 21).
- Если вы производите перечисление параллельной коллекции, в то время как другой поток ее модифицирует, то никаких исключений не возникает — взамен вы получите смесь старого и нового содержимого.
- Параллельной версии List<T> не существует.
- Параллельные классы стеков, очередей и пакетов внутренне реализованы с помощью связных списков. Это делает их менее эффективными в плане потребления памяти, чем непараллельные классы Stack и Queue, но лучшими для параллельного доступа, т.к. связные списки способствуют построению реализаций с низкой блокировкой или вообще без таковой. (Причина в том, что вставка узла в связный список требует обновления лишь пары ссылок, тогда как вставка элемента в структуру, подобную List<T>, может привести к перемещению тысяч существующих элементов.)

Другими словами, параллельные коллекции не являются простыми сокращениями для применения обычных коллекций с блокировками. В качестве демонстрации, если запустить следующий код в *одиночном* потоке:

```
var d = new ConcurrentDictionary<int, int>();  
for (int i = 0; i < 1000000; i++) d[i] = 123;
```

то он выполнится в три раза медленнее, чем такой код:

```
var d = new Dictionary<int, int>();  
for (int i = 0; i < 1000000; i++) lock (d) d[i] = 123;
```

(Тем не менее, чтение из ConcurrentDictionary будет быстрым, потому что операции чтения свободны от блокировок.)

Параллельные коллекции также отличаются от традиционных коллекций тем, что они открывают доступ к специальным методам, которые предназначены для выполнения атомарных операций типа “проверить и действовать”, подобных TryPop. Большинство таких методов унифицировано посредством интерфейса IProducerConsumerCollection<T>.

IProducerConsumerCollection<T>

Коллекция производителей/потребителей является одной из тех, для которых предусмотрены два главных сценария использования:

- добавление элемента (действие “производителя”);
- извлечение элемента с его удалением (действие “потребителя”).

Классическими примерами являются стеки и очереди. Коллекции производителей/потребителей играют важную роль в параллельном программировании, т.к. они способствуют построению эффективных реализаций, свободных от блокировок.

Интерфейс IProducerConsumerCollection<T> представляет безопасную к потокам коллекцию производителей/потребителей и реализован следующими классами:

```
ConcurrentStack<T>
ConcurrentQueue<T>
ConcurrentBag<T>
```

Интерфейс IProducerConsumerCollection<T> расширяет ICollection, добавляя перечисленные ниже методы:

```
void CopyTo (T[] array, int index);
T[] ToArray();
bool TryAdd (T item);
bool TryTake (out T item);
```

Методы TryAdd и TryTake проверяют, может ли быть выполнена операция добавления/удаления, и если может, тогда производят добавление/удаление. Проверка и действие выполняются атомарно, устранивая необходимость в блокировке, к которой пришлось бы прибегнуть в случае традиционной коллекции:

```
int result;
lock (myStack) if (myStack.Count > 0) result = myStack.Pop();
```

Метод TryTake возвращает false, если коллекция пуста. Метод TryAdd всегда выполняется успешно и возвращает true в предоставленных трех реализациях. Однако если вы разрабатываете собственную параллельную коллекцию, в которой дубликаты запрещены, то обеспечите возврат методом TryAdd значения false, когда заданный элемент уже существует (примером может служить реализация параллельного набора).

Конкретный элемент, который TryTake удаляет, определяется подклассом:

- в случае стека TryTake удаляет элемент, добавленный позже всех других;
- в случае очереди TryTake удаляет элемент, добавленный раньше всех других;
- в случае пакета TryTake удаляет любой элемент, который может быть удален наиболее эффективно.

Три конкретных класса главным образом реализуют методы TryTake и TryAdd явно, делая доступной ту же самую функциональность через открытые методы с более специфичными именами, такими как TryDequeue и TryPop.

ConcurrentBag<T>

Класс ConcurrentBag<T> хранит *неупорядоченную* коллекцию объектов (с разрешенными дубликатами). Класс ConcurrentBag<T> подходит в ситуациях, когда не имеет значения, какой элемент будет получен при вызове Take или TryTake.

Преимущество ConcurrentBag<T> перед параллельной очередью или стеком связано с тем, что метод Add пакета не допускает почти никаких состязаний, когда вызывается многими потоками одновременно. В отличие от него вызов Add параллельно на очереди или стеке приводит к некоторым состязаниям (хотя и намного меньшим, чем при блокировании *непараллельной* коллекции). Вызов Take на параллельном пакете тоже очень эффективен — до тех пор, пока каждый поток не извлекает большее количество элементов, чем он добавил с помощью Add.

Внутри параллельного пакета каждый поток получает свой закрытый связанный список. Элементы добавляются в закрытый список, который принадлежит потоку,зывающему Add, что устраняет состязания. Когда производится перечисление пакета, перечислитель проходит по закрытым спискам всех потоков, выдавая каждый из их элементов по очереди.

Когда вызывается метод Take, пакет сначала просматривает закрытый список текущего потока. Если в нем имеется хотя бы один элемент¹, то задача может быть завершена легко и без состязаний. Но если этот список пуст, то пакет должен “позаимствовать” элемент из закрытого списка другого потока, что потенциально может привести к состязаниям.

Таким образом, чтобы соблюсти точность, вызов Take дает элемент, который был добавлен позже других в данном потоке; если же в этом потоке элементов нет, тогда Take дает последний добавленный элемент в другом потоке, выбранном произвольно.

Параллельные пакеты идеальны, когда параллельная операция на коллекции в основном состоит из добавления элементов посредством Add — или когда количество вызовов Add и Take сбалансировано в рамках потока. Пример первой ситуации приводился ранее во время применения метода Parallel.ForEach при реализации параллельной программы проверки орфографии:

¹ Из-за деталей реализации на самом деле должны существовать хотя бы два элемента, чтобы полностью избежать состязаний.

```
var misspellings = new ConcurrentBag<Tuple<int, string>>();
Parallel.ForEach (wordsToTest, (word, state, i) =>
{
    if (!wordLookup.Contains (word))
        misspellings.Add (Tuple.Create ((int) i, word));
});
```

Параллельный пакет может оказаться неудачным выбором для очереди производителей/потребителей, поскольку элементы добавляются и удаляются *разными* потоками.

BlockingCollection<T>

В случае вызова метода TryTake на любой коллекции производителей/потребителей, рассмотренной в предыдущем разделе, т.е. ConcurrentStack<T>, ConcurrentQueue<T> и ConcurrentBag<T>, он возвращает false, если коллекция пуста. Иногда в таком сценарии полезнее организовать *ожидание*, пока элемент не станет доступным.

Вместо перегрузки методов TryTake для обеспечения такой функциональности (что привело бы к перенасыщению членами после предоставления возможности работы с признаками отмены и тайм-аутами) проектировщики PFX инкапсулировали ее в класс-оболочку по имени BlockingCollection<T>. Блокирующая коллекция может содержать внутри любую коллекцию, которая реализует интерфейс IProducerConsumerCollection<T>, и позволяет получать с помощью метода Take элемент из внутренней коллекции, обеспечивая блокирование, когда доступных элементов нет.

Блокирующая коллекция также позволяет ограничивать общий размер коллекции, блокируя *производителя*, если этот размер превышен. Коллекция, ограниченная в подобной манере, называется *ограниченной блокирующей коллекцией*.

Для использования класса BlockingCollection<T> необходимо выполнить описанные ниже шаги.

1. Создать экземпляр класса, дополнительно указывая помещаемую внутрь реализацию IProducerConsumerCollection<T> и максимальный размер (границу) коллекции.
2. Вызывать метод Add или TryAdd для добавления элементов во внутреннюю коллекцию.
3. Вызывать метод Take или TryTake для удаления (потребления) элементов из внутренней коллекции.

Если конструктор вызван без передачи ему коллекции, то автоматически будет создан экземпляр ConcurrentQueue<T>. Методы производителя и потребителя позволяют указывать признаки отмены и тайм-ауты. Методы Add и TryAdd могут блокироваться, если размер коллекции ограничен; методы Take и TryTake блокируются на время, пока коллекция пуста.

Еще один способ потребления элементов предполагает вызов метода GetConsumingEnumerable. Он возвращает (потенциально) бесконечную по-

следовательность, которая выдает элементы по мере того, как они становятся доступными. Чтобы принудительно завершить такую последовательность, необходимо вызвать `CompleteAdding`: этот метод также предотвращает дальнейшее помещение в очередь элементов.

Кроме того, класс `BlockingCollection` предоставляет статические методы под названиями `AddToAny` и `TakeFromAny`, которые позволяют добавлять и получать элемент, указывая несколько блокирующих коллекций. Действие затем будет выполнено первой коллекцией, которая способна обслужить данный запрос.

Реализация очереди производителей/потребителей

Очередь производителей/потребителей — структура, полезная как при параллельном программировании, так и в общих сценариях параллелизма. Ниже описаны основные аспекты ее работы.

- Очередь настраивается для описания элементов работы или данных, над которыми выполняется работа.
- Когда задача должна выполниться, она ставится в очередь, а вызывающий код занимается другой работой.
- Один или большее число рабочих потоков функционируют в фоновом режиме, извлекая и запуская элементы из очереди.

Очередь производителей/потребителей обеспечивает точный контроль над тем, сколько рабочих потоков выполняется за раз, что полезно для ограничения эксплуатации не только ЦП, но также и других ресурсов. Скажем, если задачи выполняют интенсивные операции дискового ввода-вывода, то можно ограничить параллелизм, не истощая операционную систему и другие приложения. На протяжении времени жизни очереди можно также динамически добавлять и удалять рабочие потоки. Пул потоков CLR сам представляет собой разновидность очереди производителей/потребителей, которая оптимизирована для кратко выполняющихся заданий с интенсивными вычислениями.

Очередь производителей/потребителей обычно хранит элементы данных, на которых выполняется (одна и та же) задача. Например, элементами данных могут быть имена файлов, а задача может осуществлять шифрование содержимого таких файлов. С другой стороны, применяя делегаты в качестве элементов, можно построить более универсальную очередь производителей/потребителей, где каждый элемент способен делать все что угодно.

В статье “Parallel Programming” (“Параллельное программирование”) по ссылке <http://albahari.com/threading/> мы показываем, как реализовать очередь производителей/потребителей с нуля, используя событие `AutoResetEvent` (а также впоследствии методы `Wait` и `Pulse` класса `Monitor`). Тем не менее, написание очереди производителей/потребителей с нуля стало необязательным, т.к. большая часть функциональности предлагается классом `BlockingCollection<T>`. Вот как его задействовать:

```

public class PCQueue : IDisposable
{
    BlockingCollection<Action> _taskQ = new BlockingCollection<Action>();
    public PCQueue (int workerCount)
    {
        // Создать и запустить отдельный объект Task для каждого потребителя:
        for (int i = 0; i < workerCount; i++)
            Task.Factory.StartNew (Consume);
    }
    public void Enqueue (Action action) { _taskQ.Add (action); }
    void Consume()
    {
        // Эта последовательность, которую мы перечисляем, будет блокироваться,
        // когда нет доступных элементов, и заканчиваться, когда вызван
        // метод CompleteAdding
        foreach (Action action in _taskQ.GetConsumingEnumerable())
            action(); // Выполнить задачу.
    }
    public void Dispose() { _taskQ.CompleteAdding(); }
}

```

Поскольку конструктору `BlockingCollection` ничего не передается, он автоматически создает параллельную очередь. Если бы ему был передан объект `ConcurrentStack`, тогда мы получили бы в итоге стек производителей/потребителей.

Использование задач

Только что написанная очередь производителей/потребителей не является гибкой, т.к. мы не можем отслеживать элементы работы после их помещения в очередь. Очень полезными были бы следующие возможности:

- знать, когда элемент работы завершается (и ожидать его посредством `await`);
- отменять элемент работы;
- элегантно обрабатывать любые исключения, которые сгенерированы тем или иным элементом работы.

Идеальное решение предусматривало бы возможность возвращения методом `Enqueue` какого-то объекта, снабжающего нас описанной выше функциональностью. К счастью, уже существует класс, делающий в точности то, что нам нужно — это `Task`, объект которого можно либо сгенерировать с помощью `TaskCompletionSource`, либо создать напрямую (получив незапущенную или *холодную* задачу):

```

public class PCQueue : IDisposable
{
    BlockingCollection<Task> _taskQ = new BlockingCollection<Task>();
    public PCQueue (int workerCount)
    {

```

```

// Создать и запустить отдельный объект Task для каждого потребителя:
for (int i = 0; i < workerCount; i++)
    Task.Factory.StartNew (Consume);
}

public Task Enqueue (Action action, CancellationToken cancelToken
                     = default (CancellationToken))
{
    var task = new Task (action, cancelToken);
    _taskQ.Add (task);
    return task;
}

public Task<TResult> Enqueue<TResult> (Func<TResult> func,
                                         CancellationToken cancelToken = default (CancellationToken))
{
    var task = new Task<TResult> (func, cancelToken);
    _taskQ.Add (task);
    return task;
}

void Consume()
{
    foreach (var task in _taskQ.GetConsumingEnumerable())
        try
        {
            if (!task.IsCanceled) task.RunSynchronously();
        }
        catch (InvalidOperationException) { } // Условие состояний
    }

    public void Dispose() { _taskQ.CompleteAdding(); }
}

```

В методе `Enqueue` мы помещаем в очередь и возвращаем вызывающему коду задачу, которая создана, но не запущена.

В методе `Consume` мы запускаем эту задачу синхронно в потоке потребителя. Мы перехватываем исключение `InvalidOperationException`, чтобы обработать маловероятную ситуацию, когда задача будет отменена в промежутке между проверкой, не отменена ли она, и ее запуском.

Ниже показано, как можно применять класс `PCQueue`:

```

var pcQ = new PCQueue (2); // Максимальная степень параллелизма равна 2
string result = await pcQ.Enqueue (() => "That was easy!");
...

```

Следовательно, мы имеем все преимущества задач — распространение исключений, возвращаемые значения и возможность отмены — и в то же время обладаем полным контролем над их планированием.



Span<T> и Memory<T>

Структуры `Span<T>` и `Memory<T>` действуют как низкоуровневые фасады для массива, строки или любого смежного блока управляемой либо неуправляемой памяти. Их главная цель — содействовать определенным видам микрооптимизации. В частности, они помогают писать код с *низким выделением памяти*, в котором выделение управляемой памяти сводится к минимуму (сокращая нагрузку на сборщик мусора), и нет необходимости в дублировании кода для разных типов входных данных. Они также делают возможным *нарезание* — работу с порциями массива, строки или блока памяти без создания копии.

Структуры `Span<T>` и `Memory<T>` особенно полезны в “горячих” точках, критичных к производительности, таких как конвейер обработки ASP.NET Core или средство разбора JSON, которое обслуживает объектную базу данных.



В случае если вы встретили такие типы в каком-то API-интерфейсе и не нуждаетесь в предлагаемом ими потенциальном выигрыше в плане производительности, тогда можете легко обойтись без них, как описано ниже.

- При вызове метода, который ожидает тип `Span<T>`, `ReadOnlySpan<T>`, `Memory<T>` или `ReadOnlyMemory<T>`, передавайте взамен массив, т.е. `T[]`. (Это работает благодаря неявным операциям преобразования.)
- Чтобы преобразовать промежуток/память в массив, вызывайте метод `ToArray`. А если `T` является `char`, то метод `ToString` преобразует промежуток/память в строку.

Начиная с версии C# 12, можно также использовать инициализаторы коллекций, чтобы создавать промежутки.

В частности, структура `Span<T>` решает две задачи.

- Она предоставляет общий интерфейс, подобный массиву, для управляемых массивов, строк и поддерживаемой указателем памяти. В результате у вас появляется свобода в плане работы с выделенной в стеке и неуправляемой памятью, избегая сборки мусора, и отсутствует необходимость дублировать код или возиться с указателями.
- Она делает возможным “нарезание”, т.е. открытие доступа к многократно используемым подразделам промежутка без создания копий.



Структура `Span<T>` состоит всего лишь из двух полей — указателя и длины. По этой причине она может представлять только смежные блоки памяти. (Если вам нужно работать с несмежными блоками памяти, то имеется класс `ReadOnlySequence<T>`, служащий в качестве связного списка.)

Поскольку структура `Span<T>` способна служить оболочкой для памяти, выделенной в стеке, существуют ограничения, касающиеся того, как можно хранить либо передавать экземпляры (обусловленные отчасти тем, что `Span<T>` является *сырьевой структурой*). Структура `Memory<T>` действует как промежуток без таких ограничений, но не может быть оболочкой для памяти, выделенной в стеке. Структура `Memory<T>` по-прежнему обеспечивает преимущество нарезания.

Каждая структура поставляется с эквивалентом, допускающим только чтение (`ReadOnlySpan<T>` и `ReadOnlyMemory<T>`). Помимо предотвращения неумышленного изменения аналоги, поддерживающие только чтение, дополнительно улучшают производительность, снабжая компилятор и исполняющую среду добавочной свободой в плане оптимизации.

В самой платформе .NET (и в ASP.NET Core) указанные типы применяются для повышения эффективности ввода-вывода, взаимодействия с сетью, обработки строк и разбора данных JSON.



Способность структур `Span<T>` и `Memory<T>` выполнять нарезание массивов делает старый класс `ArraySegment<T>` избыточным. Для содействия в отказе от него предусмотрены неявные операции преобразования из `ArraySegment<T>` во все структуры промежутков/памяти, а также из `Memory<T>` и `ReadOnlyMemory<T>` в `ArraySegment<T>`.

Промежутки и нарезание

В отличие от массива, промежуток можно легко *нарезать* для представления различных подразделов одних и тех же данных, как показано на рис. 23.1.

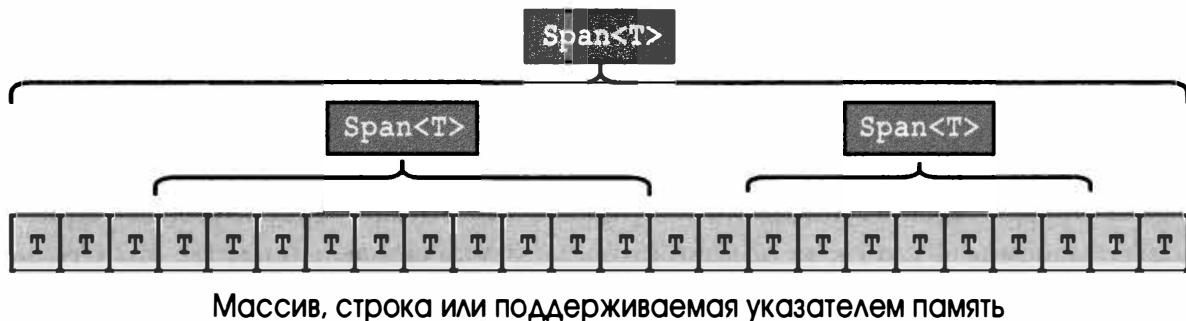


Рис. 23.1. Нарезание

Рассмотрим пример. Предположим, что вы пишете метод для суммирования элементов массива целых чисел. Реализация с микрооптимизацией позволила бы избавиться от LINQ, отдав предпочтение циклу `foreach`:

```
int Sum (int [] numbers)
{
    int total = 0;
    foreach (int i in numbers) total += i;
    return total;
}
```

Теперь представим, что вы хотите суммировать только элементы из *части* массива. У вас есть два варианта:

- сначала скопировать в другой массив ту часть массива, элементы которой необходимо просуммировать;
- добавить к методу дополнительные параметры (смещение и количество).

Первый вариант неэффективен, а второй привносит путаницу и сложность (ситуация становится еще хуже в случае методов, которые должны принимать более одного массива).

Промежутки изящно решают такую задачу. Все, что понадобится сделать — поменять тип параметра `int []` на `ReadOnlySpan<int>` (остальной код остается тем же самым):

```
int Sum (ReadOnlySpan<int> numbers)
{
    int total = 0;
    foreach (int i in numbers) total += i;
    return total;
}
```



Здесь использовался тип `ReadOnlySpan<T>`, а не `Span<T>`, т.к. модифицировать массив не нужно. Существует неявное преобразование из `Span<T>` в `ReadOnlySpan<T>`, поэтому `Span<T>` можно передавать методу, который ожидает `ReadOnlySpan<T>`.

Вот как можно протестировать метод `Sum`:

```
var numbers = new int [1000];
for (int i = 0; i < numbers.Length; i++) numbers [i] = i;
int total = Sum (numbers);
```

Метод `Sum` разрешено вызывать с массивом, потому что имеется неявное преобразование из `T []` в `Span<T>` и `ReadOnlySpan<T>`. Еще один прием предусматривает применение расширяющего метода `AsSpan`:

```
var span = numbers.AsSpan();
```

Индексатор для `ReadOnlySpan<T>` использует средство `ref readonly` языка C# для прямого доступа к лежащим в основе данным: это позволяет методу работать почти так же хорошо, как в первоначальном примере, где применялся массив. Но преимущество заключается в том, что теперь массив можно “нарезать” и суммировать только часть элементов:

```
// Суммировать 500 элементов посередине (начиная с позиции 250):  
int total = Sum (numbers.AsSpan (250, 500));
```

При наличии экземпляра `Span<T>` или `ReadOnlySpan<T>` его можно нарезать, вызывая метод `Slice`:

```
Span<int> span = numbers;  
int total = Sum (span.Slice (250, 500));
```

Можно также использовать *индексы и диапазоны C#* (начиная с версии C# 8):

```
Span<int> span = numbers;  
Console.WriteLine (span [^1])); // Последний элемент  
Console.WriteLine (Sum (span [..10])); // Первые 10 элементов  
Console.WriteLine (Sum (span [100..])); // Элементы с 100-го и до конца  
Console.WriteLine (Sum (span [^5..])); // Последние 5 элементов
```

Хотя структура `Span<T>` не реализует интерфейс `IEnumerable<T>` (она не может реализовывать интерфейсы в силу того, что является ссылочной структурой), `Span<T>` реализует шаблон, который позволяет работать оператору `foreach` языка C# (см. раздел “Перечисление” в главе 4).

CopyTo И TryCopyTo

Метод `CopyTo` копирует элементы из одного промежутка (или `Memory<T>`) в другой. В следующем примере происходит копирование всех элементов из промежутка `x` в промежуток `y`:

```
Span<int> x = [1, 2, 3, 4]; // Выражение коллекции  
Span<int> y = new int[4];  
x.CopyTo (y);
```



Обратите внимание, что промежуток `x` был инициализирован с помощью *выражения коллекции*. Выражения коллекций (появившиеся в C# 12) — это не только удобное сокращение; в случае с промежутками они предоставляют компилятору свободу выбора лежащего в основе типа. Когда количество элементов невелико, компилятор может выделить память в стеке (вместо создания массива) и тем самым избежать накладных расходов, связанных с выделением памяти в куче.

Нарезание делает этот метод гораздо более полезным. Ниже выполняется копирование первой половины промежутка `x` во вторую половину промежутка `y`:

```
Span<int> x = [1, 2, 3, 4];  
Span<int> y = [10, 20, 30, 40];  
x[..2].CopyTo (y[2..]); // y теперь содержит [10, 20, 1, 2]
```

Если в месте назначения недостаточно пространства для завершения копирования, тогда `CopyTo` сгенерирует исключения, а `TryCopyTo` возвратит `false` (не копируя какие-либо элементы).

Структуры `Span<T>` и `ReadOnlySpan<T>` также открывают доступ к методам для очистки (`Clear`) и заполнения (`Fill`) промежутка, а также к методу `IndexOf` для поиска элемента в промежутке.

Поиск в промежутках

В классе `MemoryExtensions` определены многочисленные расширяющие методы, которые помогают искать значения внутри промежутков, подобные `Contains`, `IndexOf`, `LastIndexOf` и `BinarySearch` (а также методы, которые изменяют промежутки, вроде `Fill`, `Replace` и `Reverse`).

Начиная с версии .NET 8, доступны методы для поиска любого из нескольких значений, например, `ContainsAny`, `ContainsAnyExcept`, `IndexOfAny` и `IndexOfAnyExcept`. Этим методам можно указывать значения для поиска либо в виде промежутка, либо в виде экземпляра `SearchValues<T>` (из `System.Buffers`), который создается посредством вызова `SearchValues.Create`:

```
ReadOnlySpan<char> span = "The quick brown fox jumps over the lazy dog.";
var vowels = SearchValues.Create("aeiou");
Console.WriteLine(span.IndexOfAny(vowels)); // 2
```

Класс `SearchValues<T>` позволяет повысить производительность в случае многократного использования его экземпляра в нескольких операциях поиска.



Упомянутые выше методы также можно применять при работе с массивами или строками, просто вызывая `AsSpan()` на массиве или строке.

Работа с текстом

Промежутки спроектированы для эффективной работы со строками, которые трактуются как `ReadOnlySpan<char>`. Следующий метод подсчитывает пробельные символы:

```
int CountWhitespace (ReadOnlySpan<char> s)
{
    int count = 0;
    foreach (char c in s)
        if (char.IsWhiteSpace (c))
            count++;
    return count;
}
```

Вызывать такой метод можно со строкой (благодаря неявной операции преобразования):

```
int x = CountWhitespace ("Word1 Word2"); // Нормально
```

или с подстрокой:

```
int y = CountWhitespace (someString.AsSpan (20, 10));
```

Метод `ToString` преобразует структуру `ReadOnlySpan<char>` обратно в строку.

Расширяющие методы гарантируют, что некоторые часто применяемые методы класса `string` также доступны для `ReadOnlySpan<char>`:

```
var span = "This ".AsSpan(); // ReadOnlySpan<char>
Console.WriteLine (span.StartsWith ("This")); // True
Console.WriteLine (span.Trim().Length); // 4
```

(Обратите внимание, что по умолчанию методы вроде `StartsWith` используют *ординальное* сравнение, в то время как соответствующие методы класса `string` — сравнение, чувствительное к культуре.)

Методы наподобие `ToUpper` и `ToLower` доступны, но им придется передавать целевой промежуток с корректной длиной (это позволяет вам решить, как и где выделять память).

Некоторые методы класса `string` не будут доступными, скажем, `Split` (который расщепляет строку в массив слов). На самом деле написать прямой эквивалент метода `Split` класса `string` невозможно, поскольку нельзя создать массив промежутков.



Причина в том, что промежутки определены как *ссыпочные структуры*, которые могут существовать только в стеке.

(Под существованием только в стеке подразумевается то, что в стеке может располагаться сама структура. Содержимое, которое способен умещать промежуток, может находиться в куче — и в данном случае это так.)

Пространство имен `System.Buffers.Text` содержит дополнительные типы, помогающие работать с основанным на промежутках текстом, в том числе перечисленные ниже:

- `Utf8Formatter.TryParse` выполняет эквивалент вызова `ToString` для встроенных и простых типов, таких как `decimal`, `DateTime` и т.д., но вместо строки выдает промежуток;
- `Utf8Parser.TryParse` делает обратное и разбирает данные из промежутка в простой тип;
- `Base64` предлагает методы для чтения/записи данных Base-64.



Начиная с версии .NET 8, числовые типы и типы даты/времени .NET (а также другие простые типы) позволяют напрямую форматировать и разбирать UTF-8 с помощью новых методов `TryFormat` и `Parse/TryParse`, которые работают с типом `Span<byte>`. Новые методы определены в интерфейсах `IUtf8SpanFormattable` и `IUtf8SpanParsable<TSelf>` (последний задействует возможность C# 12 определять статические абстрактные члены интерфейса).

Фундаментальные методы CLR наподобие `int.Parse` также были перегружены с целью приема `ReadOnlySpan<char>`.

Memory<T>

Типы `Span<T>` и `ReadOnlySpan<T>` определены в виде *ссыпочных структур*, чтобы довести до максимума их оптимизационный потенциал и дать им возможность безопасно работать с памятью, выделенной в стеке (как будет

показано в следующем разделе). Однако они также накладывают ограничения. Помимо того, что ссылочные структуры недружественны к массивам, их также нельзя применять для полей в классе (в таком случае они размещались бы в куче). В свою очередь это препятствует их появлению в лямбда-выражениях, а также в качестве параметров в асинхронных методах, итераторах и асинхронных потоках данных:

```
async void Foo (Span<int> notAllowed) // Ошибка на этапе компиляции!
```

(Вспомните, что компилятор обрабатывает асинхронные методы и итераторы, реализуя закрытый *конечный автомат*, т.е. любые параметры и локальные переменные в итоге становятся полями. То же самое применимо к лямбда-выражениям, которые охватывают переменные: они будут полями в *замыкании*.)

Структуры `Memory<T>` и `ReadOnlyMemory<T>` учитывают это и действуют в качестве промежутков, которые не могут служить оболочками для памяти, выделенной в стеке, что делает возможным их использование в полях, лямбда-выражениях, асинхронных методах и т.д.

Экземпляр `Memory<T>` или `ReadOnlyMemory<T>` можно получать из массива через неявное преобразование либо расширяющий метод `AsMemory`:

```
Memory<int> mem1 = new int[] { 1, 2, 3 };
var mem2 = new int[] { 1, 2, 3 }.AsMemory();
```

Экземпляр `Memory<T>` или `ReadOnlyMemory<T>` можно легко “преобразовать” в экземпляр `Span<T>` или `ReadOnlySpan<T>` через его свойство `Span`, так что есть возможность взаимодействовать с ним, как если бы он был промежутком. Преобразование эффективно в том, что оно не выполняет никакого копирования:

```
async void Foo (Memory<int> memory)
{
    Span<int> span = memory.Span;
    ...
}
```

(Экземпляр `Memory<T>` или `ReadOnlyMemory<T>` можно также нарезать напрямую через его метод `Slice` или диапазон C# и получать доступ к длине через свойство `Length`.)



Еще один способ получения экземпляра `Memory<T>` предусматривает его аренду из *пула* с применением класса `System.Buffers.MemoryPool<T>`. Пул памяти работает аналогично пулу массивов (см. раздел “Организация пула массивов” в главе 12) и предлагает другую стратегию для сокращения нагрузки на сборщик мусора.

В предыдущем разделе было указано, что написать прямой эквивалент метода `string.Split` для промежутков не удастся, поскольку создавать массив промежутков нельзя. К типу `ReadOnlyMemory<char>` такое ограничение неприменимо:

```
// Разбить строку на слова:
IEnumerable<ReadOnlyMemory<char>> Split (ReadOnlyMemory<char> input)
{
    int wordStart = 0;
    for (int i = 0; i <= input.Length; i++)
        if (i == input.Length || char.IsWhiteSpace (input.Span [i]))
        {
            yield return input [wordStart..i]; // Нарезать с помощью
                                              // операции диапазона C#
            wordStart = i + 1;
        }
}
```

Реализация более эффективна, чем метод `Split` класса `string`: вместо создания новых строк для каждого слова она возвращает *части* исходной строки:

```
foreach (var slice in Split ("The quick brown fox jumps over the lazy dog"))
{
    // slice - экземпляр ReadOnlyMemory<char>
}
```



Экземпляр `Memory<T>` легко преобразовать в экземпляр `Span<T>` (через свойство `Span`), но не наоборот. По этой причине при наличии выбора лучше писать методы, которые принимают тип `Span<T>`, а не `Memory<T>`.

По той же самой причине лучше писать методы, принимающие тип `ReadOnlySpan<T>`, а не `Span<T>`.

Однонаправленные перечислители

В предыдущем разделе тип `ReadOnlyMemory<char>` был задействован в качестве решения для реализации метода `Split` в строковом стиле. Но, отказавшись от `ReadOnlySpan<char>`, мы утратили возможность нарезать промежутки, поддерживаемые неуправляемой памятью. Давайте вернемся к `ReadOnlySpan<char>` и посмотрим, сможем ли мы отыскать другое решение.

Возможный вариант мог бы предусматривать написание метода `Split` в таком виде, чтобы он возвращал *диапазоны*:

```
Range[] Split (ReadOnlySpan<char> input)
{
    int pos = 0;
    var list = new List<Range>();
    for (int i = 0; i <= input.Length; i++)
        if (i == input.Length || char.IsWhiteSpace (input [i]))
        {
            list.Add (new Range (pos, i));
            pos = i + 1;
        }
    return list.ToArray();
}
```

Затем в вызывающем коде возвращенные диапазоны можно было бы использовать для нарезания исходного промежутка:

```

ReadOnlySpan<char> source = "The quick brown fox";
foreach (Range range in Split (source))
{
    ReadOnlySpan<char> wordSpan = source [range];
}
...

```

Это улучшение, но все еще несовершенное. Прежде всего, одна из причин применения промежутков — избегание выделения памяти. Но обратите внимание, что наш метод Split создает экземпляр **List<Range>**, добавляет в него элементы и преобразует список в массив. Такие действия вовлекают, *по меньшей мере*, два выделения памяти, а также операцию копирования памяти.

Решение проблемы заключается в том, чтобы отказаться от списка и массива в пользу одностороннего перечислителя. С перечислителем труднее работать, но он может быть сделан без выделений памяти с использованием структур:

```

// Мы обязаны определить это как ref struct,
// потому что _input является ссылочной структурой.
public readonly ref struct CharSpanSplitter
{
    readonly ReadOnlySpan<char> _input;
    public CharSpanSplitter (ReadOnlySpan<char> input) => _input = input;
    public Enumerator GetEnumerator() => new Enumerator (_input);
    public ref struct Enumerator // Односторонний перечислитель
    {
        readonly ReadOnlySpan<char> _input;
        int _wordPos;
        public ReadOnlySpan<char> Current { get; private set; }
        public Rator (ReadOnlySpan<char> input)
        {
            _input = input;
            _wordPos = 0;
            Current = default;
        }
        public bool MoveNext()
        {
            for (int i = _wordPos; i <= _input.Length; i++)
                if (i == _input.Length || char.IsWhiteSpace (_input [i]))
                {
                    Current = _input [_wordPos..i];
                    _wordPos = i + 1;
                    return true;
                }
            return false;
        }
    }
}

public static class CharSpanExtensions
{
    public static CharSpanSplitter Split (this ReadOnlySpan<char> input)
        => new CharSpanSplitter (input);
    public static CharSpanSplitter Split (this Span<char> input)
        => new CharSpanSplitter (input);
}

```

Вот как его можно было бы применять:

```
var span = "the quick brown fox".AsSpan();
foreach (var word in span.Split())
{
    // word - экземпляр ReadOnlySpan<char>
}
```

За счет определения свойства `Current` и метода `MoveNext` наш перечисли-
тель может работать с оператором `foreach` языка C# (см. раздел “Перечисление”
в главе 4). Мы не обязаны реализовывать интерфейсы `IEnumerable<T>/`
`IEnumerator<T>` (на самом деле это невозможно; ссылочные структуры не мо-
гут реализовывать интерфейсы). Мы жертвуем абстракцией ради микроопти-
мизации.

Работа с выделяемой в стеке и неуправляемой памятью

Еще один эффективный прием микрооптимизации предусматривает сокра-
щение нагрузки на сборщик мусора путем минимизации выделений памяти,
основанных на куче. Это означает более широкое использование памяти в сте-
ке — или даже неуправляемой памяти.

К сожалению, обычно такой подход требует переписывания кода с целью
применения указателей. В случае нашего предыдущего примера, где суммиро-
вались элементы в массиве, пришлось бы написать другую версию, которая по-
казана ниже:

```
unsafe int Sum (int* numbers, int length)
{
    int total = 0;
    for (int i = 0; i < length; i++) total += numbers [i];
    return total;
}
```

чтобы мы могли поступать следующим образом:

```
int* numbers = stackalloc int [1000]; // Выделить память под массив в стеке
int total = Sum (numbers, 1000);
```

Проблему решают промежутки: сконструировать экземпляр `Span<T>` или
`ReadOnlySpan<T>` можно прямо из указателя:

```
int* numbers = stackalloc int [1000];
var span = new Span<int> (numbers, 1000);
```

Или за один шаг:

```
Span<int> numbers = stackalloc int [1000];
```

(Обратите внимание, что здесь не требуется `unsafe`.) Вспомним реализован-
ный ранее метод `Sum`:

```
int Sum (ReadOnlySpan<int> numbers)
{
```

```

int total = 0;
int len = numbers.Length;
for (int i = 0; i < len; i++) total += numbers [i];
return total;
}

```

Данный метод в равной степени хорошо работает для промежутка, выделенного в стеке. Мы выиграли по трем пунктам:

- один и тот же метод функционирует с массивами и памятью, выделенной в стеке;
- память, выделенную в стеке, можно использовать с минимальным применением указателей;
- промежуток можно нарезать.



Компилятор достаточно интеллектуален, чтобы воспрепятствовать написанию метода, который выделяет память в стеке и возвращает ее вызывающему коду через экземпляр `Span<T>` или `ReadOnlySpan<T>`.

(Тем не менее, в других сценариях можно законно возвращать `Span<T>` или `ReadOnlySpan<T>`.)

Промежутки можно также использовать для создания оболочек, умещающих память, которая выделяется в неуправляемой куче. В приведенном ниже примере мы выделяем неуправляемую память с применением функции `Marshal.AllocHGlobal`, помещаем ее внутрь экземпляра `Span<char>` и копируем строку в неуправляемую память. В заключение мы задействуем структуру `CharSpanSplitter`, написанную в предыдущем разделе, для разбиения неуправляемой строки на слова:

```

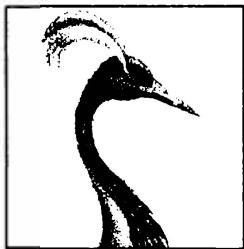
var source = "The quick brown fox".AsSpan();
var ptr = Marshal.AllocHGlobal (source.Length * sizeof (char));
try
{
    var unmanaged = new Span<char> ((char*)ptr, source.Length);
    source.CopyTo (unmanaged);
    foreach (var word in unmanaged.Split())
        Console.WriteLine (word.ToString());
}
finally { Marshal.FreeHGlobal (ptr); }

```

Приятным бонусом является то, что индексатор структуры `Span<T>` выполняет проверку входления в границы, предотвращая переполнение буфера. Эта проверка применяется в случае корректного создания экземпляра `Span<T>`: в нашем примере такая защита будет утрачена, если промежуток получен неправильно:

```
var span = new Span<char> ((char*)ptr, source.Length * 2);
```

Кроме того, отсутствует защита от эквивалента висячего указателя, поэтому придется позаботиться о том, чтобы не обращаться к промежутку после освобождения его неуправляемой памяти с помощью функции `Marshal.FreeHGlobal`.



Способность к взаимодействию

В настоящей главе рассматриваются способы интеграции с низкоуровневыми (неуправляемыми) динамически подключаемыми библиотеками (Dynamic Link Library — DLL) и компонентами COM. Если не указано иное, то упомянутые в главе типы находятся либо в пространстве имен System, либо в пространстве имен System.Runtime.InteropServices.

Обращение к низкоуровневым DLL-библиотекам

Технология *P/Invoke* (сокращение для Platform Invocation Services — службы вызова функций платформы) позволяет получать доступ к функциям, структурам и обратным вызовам в неуправляемых DLL-библиотеках (*совместно используемых библиотеках* в Unix).

Например, рассмотрим функцию MessageBox, которая определена в DLL-библиотеке Windows по имени user32.dll следующим образом:

```
int MessageBox (HWND hWnd, LPCTSTR lpText, LPCTSTR lpCaption, UINT uType);
```

Эту функцию можно вызывать напрямую, объявив статический метод с тем же именем, применив ключевое слово `extern` и добавив атрибут `DllImport`:

```
using System;
using System.Runtime.InteropServices;

MessageBox (IntPtr.Zero,
           "Please do not press this again.", "Attention", 0);
           // Не нажмите это снова.

[DllImport("user32.dll")]
static extern int MessageBox (IntPtr hWnd, string text, string caption,
                            int type);
```

Классы `MessageBox` в пространствах имен `System.Windows` и `System.Windows.Forms` сами вызывают подобные неуправляемые методы.

Вот пример с `DllImport` для Ubuntu Linux:

```
Console.WriteLine($"User ID: {getuid()}");  
[DllImport("libc")]  
static extern uint getuid();
```

Среда CLR включает маршализатор, которому известно, как преобразовывать параметры и возвращаемые значения между типами .NET и неуправляемыми типами. В примере для Windows параметры `int` транслируются прямо в четырехбайтовые целые числа, которые ожидает функция, а строковые параметры преобразуются в массивы символов Unicode (в кодировке UTF-16), завершающиеся символом `null`. Структура `IntPtr` предназначена для инкапсуляции неуправляемого дескриптора и занимает 32 бита на 32-разрядных платформах и 64 бита на 64-разрядных платформах. Похожая трансляция происходит и в Unix. (Начиная с версии C# 9, можно также использовать тип `nint`, который отображается на `IntPtr`.)

Маршализация типов и параметров

Маршализация общих типов

На неуправляемой стороне для представления необходимого типа данных может существовать более одного способа. Скажем, строка может содержать однобайтовые символы ANSI или символы Unicode в кодировке UTF-16 и предваряться в качестве префикса значением длины, завершаться символом `null` либо иметь фиксированную длину. С помощью атрибута `MarshalAs` маршализатору CLR сообщается используемый вариант, так что он обеспечит корректную трансляцию. Ниже показан пример:

```
[DllImport("...")]  
static extern int Foo ( [MarshalAs(UnmanagedType.LPStr)] string s );
```

Перечисление `UnmanagedType` включает все типы Win32 и COM, распознаваемые маршализатором. В этом случае маршализатору указано на необходимость трансляции в тип `LPStr`, который является строкой, завершающейся `null`, с однобайтовыми символами ANSI.

На стороне .NET также имеется выбор относительно того, какой тип данных применять. Например, неуправляемые дескрипторы могут отображаться на тип `IntPtr`, `int`, `uint`, `long` или `ulong`.



Большинство неуправляемых дескрипторов инкапсулирует адрес или указатель и потому должно отображаться на `IntPtr` для совместимости с 32- и 64-разрядными операционными системами. Типичным примером может служить `HWND`.

Довольно часто функции Win32 и POSIX поддерживают целочисленный параметр, который принимает набор констант, определенных в заголовочном

файле C++, таком как WinUser.h. Вместо определения в виде простых констант C# их можно представить как члены перечисления. Использование перечисления может дать в результате более аккуратный код и увеличить статическую безопасность типов. В разделе “Совместно используемая память” далее в главе будет приведен пример.



При установке Microsoft Visual Studio удостоверьтесь, что устанавливаете такие заголовочные файлы C++ — даже если в категории C++ не выбрано ничего другого. Именно здесь определены все низкоуровневые константы Win32. Выяснить местонахождение всех заголовочных файлов можно, поискав файлы *.h в каталоге программ Visual Studio.

Стандарт POSIX в среде Unix определяет имена констант, но индивидуальные реализации совместимых с POSIX систем Unix могут присваивать этим константам отличающиеся числовые значения. Вы должны применять корректное числовое значение для выбранной операционной системы. Аналогичным образом POSIX определяет стандарт для структур, используемых в вызовах взаимодействия. Порядок следования полей в структуре стандартом не фиксируется и реализация Unix может добавлять дополнительные поля. Заголовочные файлы C++, определяющие функции и типы, часто устанавливаются в /usr/include или /usr/local/include.

Получение строк из неуправляемого кода обратно в .NET требует проведения некоторых действий по управлению памятью. Маршализатор выполняет такую работу автоматически, если внешний метод объявлен как принимающий объект StringBuilder, а не string:

```
StringBuilder s = new StringBuilder (256);
GetWindowsDirectory (s, 256);
Console.WriteLine (s);

[DllImport ("kernel32.dll")]
static extern int GetWindowsDirectory (StringBuilder sb, int maxChars);
```

В среде Unix он работает похожим образом. В следующем коде вызывается getcwd для возвращения текущего каталога:

```
var sb = new StringBuilder (256);
Console.WriteLine (getcwd (sb, sb.Capacity));

[DllImport ("libc")]
static extern string getcwd (StringBuilder buf, int size);
```

Несмотря на удобство использования типа StringBuilder, с ним связана некоторая неэффективность, т.к. среди CLR приходится выполнять дополнительные выделения памяти и копирование. В “горячих” точках, критичных к производительности, этих накладных расходов можно избежать за счет применения char[] вместо StringBuilder:

```
[DllImport ("kernel32.dll", CharSet = CharSet.Unicode)]
static extern int GetWindowsDirectory (char[] buffer, int maxChars);
```

Обратите внимание, что в атрибуте `DllImport` должен быть указан параметр `CharSet`. Кроме того, после вызова функции выходную строку потребуется усечь до нужной длины. Добиться указанной цели, одновременно сводя к минимуму выделения памяти, можно с использованием пула массивов (см. раздел “Организация пула массивов” в главе 12):

```
string GetWindowsDirectory()
{
    var array = ArrayPool<char>.Shared.Rent(256);
    try
    {
        int length = GetWindowsDirectory(array, 256);
        return new string(array, 0, length).ToString();
    }
    finally { ArrayPool<char>.Shared.Return(array); }
}
```

(Разумеется, приведенный пример надуман, поскольку каталог Windows можно получить с помощью встроенного метода `Environment.GetFolderPath()`.)



Если вы не уверены, каким образом должен вызываться отдельный метод Win32 или Unix, тогда поищите пример его вызова в Интернете, указав в качестве строки поиска имя метода и слово `DllImport`. На сайте <http://www.pinvoke.net> стараются документировать все сигнатуры Win32.

Маршализация классов и структур

Иногда неуправляемому методу необходимо передавать структуру. Например, метод `GetSystemTime` в API-интерфейсе Win32 определен следующим образом:

```
void GetSystemTime (LPSYSTEMTIME lpSystemTime);
```

Тип `LPSYSTEMTIME` соответствует такой структуре C:

```
typedef struct _SYSTEMTIME {
    WORD wYear;
    WORD wMonth;
    WORD wDayOfWeek;
    WORD wDay;
    WORD wHour;
    WORD wMinute;
    WORD wSecond;
    WORD wMilliseconds;
} SYSTEMTIME, *PSYSTEMTIME;
```

Чтобы вызвать метод `GetSystemTime`, мы должны определить класс или структуру .NET для соответствия показанной выше структуре C:

```
using System;
using System.Runtime.InteropServices;
[StructLayout(LayoutKind.Sequential)]
```

```

class SystemTime
{
    public ushort Year;
    public ushort Month;
    public ushort DayOfWeek;
    public ushort Day;
    public ushort Hour;
    public ushort Minute;
    public ushort Second;
    public ushort Milliseconds;
}

```

Атрибут `StructLayout` указывает маршализатору, как следует отображать каждое поле на его неуправляемый эквивалент. Член перечисления `LayoutKind.Sequential` означает, что поля должны выравниваться последовательно по границам размеров пакета (объясняется ниже), точно так же как это было бы в структуре С. Имена полей роли не играют; важен только порядок следования полей.

Теперь метод `GetSystemTime` можно вызывать:

```

SystemTime t = new SystemTime();
GetSystemTime (t);
Console.WriteLine (t.Year);

[DllImport("kernel32.dll")]
static extern void GetSystemTime (SystemTime t);

```

А вот как его вызывать в среде Unix:

```

Console.WriteLine (GetSystemTime());
static DateTime GetSystemTime()
{
    DateTime startOfUnixTime =
        new DateTime(1970, 1, 1, 0, 0, 0, System DateTimeKind.Utc);
    Timespec tp = new Timespec();
    int success = clock_gettime (0, ref tp);
    if (success != 0) throw new Exception ("Error checking the time.");
                                                // Ошибка при проверке времени
    return startOfUnixTime.AddSeconds (tp.tv_sec).ToLocalTime();
}

[DllImport("libc")]
static extern int clock_gettime (int clk_id, ref Timespec tp);

[StructLayout(LayoutKind.Sequential)]
struct Timespec
{
    public long tv_sec;    /* секунды */
    public long tv_nsec;   /* наносекунды */
}

```

В языках С и C# поля в объекте располагаются со смещением в *n* байтов, начиная с адреса объекта. Разница в том, что в программе C# среда CLR находит такое смещение с применением маркера поля, а в случае С имена полей компилируются прямо в смещения. Например, в языке С поле `wDay` — просто маркер для представления чего-либо, находящегося по адресу экземпляра `SystemTime` плюс 24 байта.

Для ускорения доступа каждое поле размещается со смещением, кратным размеру поля. Однако используемый множитель ограничен максимумом в x байтов, где x представляет собой *размер пакета*. В текущей реализации стандартный размер пакета составляет 8 байтов, так что структура, содержащая поле `sbyte`, за которым следует (8-байтовое) поле `long`, занимает 16 байтов, и 7 байтов, следующих за `sbyte`, расходуются впустую. Потери подобного рода можно снизить или вообще устраниТЬ, указывая размер пакета через свойство `Pack` в атрибуте `StructLayout`: это обеспечивает выравнивание по смещениям, кратным заданному размеру пакета. Таким образом, при размере пакета, равном 1, только что описанная структура будет занимать только 9 байтов. В качестве размера пакета можно указывать 1, 2, 4, 8 или 16 байтов.

Атрибут `StructLayout` также позволяет задавать явные смещения полей (как показано в разделе “Эмуляция объединения С” далее в главе).

Маршализация параметров `in` и `out`

В предыдущем примере мы реализовали `SystemTime` в виде класса. Вместо него можно было бы выбрать структуру при условии, что метод `GetSystemTime` объявлен с параметром `ref` или `out`:

```
[DllImport("kernel32.dll")]
static extern void GetSystemTime (out SystemTime t);
```

В большинстве случаев семантика направленных параметров C# работает одинаково и с внешними методами. Параметры, передаваемые по значению, копируют параметры `in`, параметры `ref` в C# копируют параметры `in/out`, а параметры `out` в C# копируют параметры `out`. Тем не менее, существует ряд исключений для типов, которые имеют специальные преобразования. Например, классы массивов и класс `StringBuilder` требуют копирования при выдаче из функции, поэтому они являются `in/out`. Иногда такое поведение удобно переопределять посредством атрибутов `In` и `Out`. Скажем, если массив должен допускать только чтение, то атрибут `In` указывает, что в функцию поступает только копия массива, но выводиться он из функции не будет:

```
static extern void Foo ( [In] int[] array );
```

Соглашения о вызовах

Неуправляемые методы принимают аргументы и возвращают значения через стек и (необязательно) через регистры ЦП. Поскольку для этого существует несколько способов, появились различные протоколы, которые известны как *соглашения о вызовах*. В текущий момент среда CLR поддерживает три соглашения о вызовах: `StdCall`, `Cdecl` и `ThisCall`.

По умолчанию среда CLR использует стандартное соглашение о вызове, принятое для платформы. В Windows им является `StdCall`, а в Linux x86 — `Cdecl`.

Если неуправляемый метод не соответствует такому стандартному соглашению, тогда можно явно указать его соглашение о вызове, как показано ниже:

```
[DllImport ("MyLib.dll", CallingConvention=CallingConvention.Cdecl)]
static extern void SomeFunc (...)
```

Несколько запутанно именованный член `CallingConvention.WinApi` обозначает стандартное соглашение о вызове, принятое для платформы.

Обратные вызовы из неуправляемого кода

Язык C# также разрешает внешним функциям обращаться к коду C# через обратные вызовы. Есть два способа выполнения обратных вызовов:

- через указатели на функции (начиная с версии C# 9);
- посредством делегатов.

В целях иллюстрации мы будем вызывать определенную в библиотеке `User32.dll` следующую функцию Windows, которая предназначена для перечисления всех высокоранговых оконных дескрипторов:

```
BOOL EnumWindows (WNDENUMPROC lpEnumFunc, LPARAM lParam);
```

`WNDENUMPROC` — это обратный вызов, который последовательно запускается с дескриптором каждого окна (или до тех пор, пока обратный вызов не вернет `false`). Вот его определение:

```
BOOL CALLBACK EEnumWindowsProc (HWND hWnd, LPARAM lParam);
```

Обратные вызовы с помощью указателей на функции

Начиная с версии C# 9, самый простой и наиболее эффективный способ в ситуации, когда обратный вызов является статическим методом, предусматривает применение **указателя на функцию**. В случае обратного вызова `WNDENUMPROC` мы можем использовать указатель на функцию такого вида:

```
delegate*<IntPtr, IntPtr, bool>
```

Он обозначает функцию, которая принимает два аргумента типа `IntPtr` и возвращает значение `bool`. Затем с помощью операции & нашей функции можно передать статический метод:

```
using System;
using System.Runtime.InteropServices;
unsafe
{
    EnumWindows (&PrintWindow, IntPtr.Zero);
    [DllImport ("user32.dll")]
    static extern int EnumWindows (
        delegate*<IntPtr, IntPtr, bool> hWnd, IntPtr lParam);
    static bool PrintWindow (IntPtr hWnd, IntPtr lParam)
    {
        Console.WriteLine (hWnd.ToInt64 ());
        return true;
    }
}
```

Указатели на функции требуют, чтобы обратный вызов был статическим методом (или статической функцией, как в данном примере).

UnmanagedCallersOnly

Применив ключевое слово `unmanaged` к указателю на функцию и атрибут `[UnmanagedCallersOnly]` к методу обратного вызова, можно повысить производительность:

```
using System;
using System.Runtime.CompilerServices;
using System.Runtime.InteropServices;

unsafe
{
    EnumWindows (&PrintWindow, IntPtr.Zero);
    [DllImport ("user32.dll")]
    static extern int EnumWindows (
        delegate* unmanaged <IntPtr, IntPtr, byte> hWnd, IntPtr lParam);
    [UnmanagedCallersOnly]
    static byte PrintWindow (IntPtr hWnd, IntPtr lParam)
    {
        Console.WriteLine (hWnd.ToInt64 ());
        return 1;
    }
}
```

Атрибут `[UnmanagedCallersOnly]` отмечает метод `PrintWindow` как такой, который может быть вызван *только* из неуправляемого кода, позволяя исполняющей среде двигаться кратчайшими путями. Обратите внимание, что мы также изменили возвращаемый тип метода с `bool` на `byte`: причина в том, что методы, к которым применяется атрибут `[UnmanagedCallersOnly]`, могут использовать в своих сигнатурах только *преобразуемые* (*blittable*) типы значений. Преобразуемые типы — это типы, которые не требуют какой-то специальной логики маршализации, потому что они представлены идентично в управляемом и неуправляемом мирах. К ним относятся примитивные целочисленные типы, `float`, `double` и структуры, содержащие только преобразуемые типы. Тип `char` — тоже преобразуемый, если он является частью структуры с атрибутом `StructLayout`, указывающим `CharSet.Unicode`:

```
[StructLayout (LayoutKind.Sequential, CharSet=CharSet.Unicode)]
```

Нестандартные соглашения о вызовах

По умолчанию компилятор предполагает, что неуправляемый обратный вызов следует стандартному соглашению о вызове, принятому для платформы. Если это не так, тогда можно явно указать его соглашение о вызове через параметр `CallConvs` атрибута `[UnmanagedCallersOnly]`:

```
[UnmanagedCallersOnly (CallConvs = new[] { typeof (CallConvStdcall) })]
static byte PrintWindow (IntPtr hWnd, IntPtr lParam) ...
```

Также потребуется обновить тип указателя на функцию, вставив после ключевого слова `unmanaged` специальный модификатор:

```
delegate* unmanaged[Stdcall] <IntPtr, IntPtr, byte> hWnd, IntPtr lParam);
```



Компилятор позволяет помещать любой идентификатор (вроде XYZ) внутрь квадратных скобок при условии, что имеется тип .NET по имени CallConvXYZ (он воспринимается исполняющей средой и совпадает с тем, который был указан во время применения атрибута [UnmanagedCallersOnly]). Это облегчает добавление в будущем новых соглашений о вызовах разработчиками из Microsoft.

В данном случае был указан вариант StdCall, принятый по умолчанию для платформы Windows (для платформы Linux x86 по умолчанию принят вариант Cdecl). Ниже перечислены все варианты, которые поддерживаются в текущий момент:

Имя	Модификатор <code>unmanaged</code>	Поддерживающий тип
Stdcall	<code>unmanaged[Stdcall]</code>	CallConvStdcall
Cdecl	<code>unmanaged[Cdecl]</code>	CallConvCdecl
ThisCall	<code>unmanaged[Thiscall]</code>	CallConvThiscall

Обратные вызовы с помощью делегатов

Неуправляемые обратные вызовы могут выполняться также с помощью делегатов. Такой подход работает во всех версиях C# и позволяет обратным вызовам ссылаться на методы экземпляра.

Для начала мы объявим тип делегата с сигнатурой, которая совпадает с обратным вызовом. Затем можно передать экземпляр этого делегата внешнему методу:

```
class CallbackFun
{
    delegate bool EnumWindowsCallback (IntPtr hWnd, IntPtr lParam);
    [DllImport("user32.dll")]
    static extern int EnumWindows (EnumWindowsCallback hWnd, IntPtr lParam);
    static bool PrintWindow (IntPtr hWnd, IntPtr lParam)
    {
        Console.WriteLine (hWnd.ToInt64 ());
        return true;
    }
    static readonly EnumWindowsCallback printWindowFunc = PrintWindow;
    static void Main () => EnumWindows (printWindowFunc, IntPtr.Zero);
}
```

По иронии судьбы использовать делегаты для неуправляемых обратных вызовов небезопасно, поскольку легко угодить в ловушку, позволив обратному вызову произойти после того, как экземпляр делегата покинул область видимости (в этот момент делегат становится пригодным для сборки мусора). Результатом может оказаться наихудшее исключение времени выполнения — то, которое не имеет полезной трассировки стека. В случае обратных вызовов в виде статических методов описанной ситуации можно избежать, присваивая экземпляр делегата статическому полю, допускающему только чтение (как делалось в при-

мере выше). Обратным вызовам в виде методов экземпляра шаблон такого рода не поможет, поэтому нужно обеспечить, чтобы на протяжении любого потенциального обратного вызова поддерживалась хотя бы одна ссылка на экземпляр делегата. Но даже тогда при возникновении ошибки в управляемой функции, из-за которой она инициирует обратный вызов после того, как ей было запрещено это делать, возможно, придется иметь дело с исключением без трассировки стека. Решение проблемы предусматривает определение уникального типа делегата для каждой управляемой функции: прием полезен с точки зрения диагностики, т.к. в исключении будет сообщаться тип делегата.

Чтобы изменить стандартное соглашение о вызове, принятое для платформы, к делегату можно применить атрибут [UnmanagedFunctionPointer]:

```
[UnmanagedFunctionPointer (CallingConvention.Cdecl)]
delegate void MyCallback (int foo, short bar);
```

Эмуляция объединения С

Каждое поле в структуре получает достаточно места для хранения своих данных. Рассмотрим структуру, содержащую одно поле типа int и одно поле типа char. Поле int, по всей видимости, начнется со смещения 0 и гарантированно займет, по меньшей мере, четыре байта. Таким образом, поле char начнется со смещения минимум 4. Если по какой-то причине поле char начнется со смещения 2, то присваивание значения полю char приведет к изменению значения поля int. Похоже на хаос, не так ли? Как ни странно, в языке С поддерживается разновидность структуры под названием *объединение*, которая делает именно то, что было описано. Эмулировать объединение в языке C# можно с использованием значения LayoutKind.Explicit и атрибута FieldOffset.

Придумать сценарий, когда объединение может оказаться полезным, может быть непросто. Тем не менее, представим, что необходимо воспроизвести ноту на внешнем синтезаторе. API-интерфейс Windows Multimedia предоставляет функцию, которая делает это через протокол MIDI:

```
[DllImport ("winmm.dll")]
public static extern uint midiOutShortMsg (IntPtr handle, uint message);
```

Второй аргумент, message, описывает, какую ноту необходимо воспроизвести. Проблема связана с конструкцией этого 32-битного целого числа без знака: внутренне оно разделено на байты, представляющие канал MIDI, ноту и скорость звучания. Одно из решений предусматривает сдвиг и применение масок через побитовые операции <<, >>, & и | для преобразования таких байтов в и из 32-битного “упакованного” сообщения. Однако намного проще определить структуру с явной компоновкой:

```
[StructLayout (LayoutKind.Explicit)]
public struct NoteMessage
{
    [FieldOffset(0)] public uint PackedMsg; // Длина 4 байта
    [FieldOffset(0)] public byte Channel; // FieldOffset также 0
    [FieldOffset(1)] public byte Note;
    [FieldOffset(2)] public byte Velocity;
}
```

Поля Channel, Note и Velocity преднамеренно пересекаются с 32-битным упакованным сообщением, что позволяет осуществлять чтение и запись, используя либо то, либо другое. Для поддержания полей в синхронизированном состоянии никаких дополнительных вычислений не потребуется:

```
NoteMessage n = new NoteMessage();
Console.WriteLine (n.PackedMsg);                                // 0
n.Channel = 10;
n.Note = 100;
n.Velocity = 50;
Console.WriteLine (n.PackedMsg);                                // 3302410
n.PackedMsg = 3328010;
Console.WriteLine (n.Note);                                    // 200
```

Совместно используемая память

Размещенные в памяти файлы, или *совместно используемая память* — это функциональная возможность Windows, которая позволяет множеству процессов на одном компьютере совместно использовать данные. Совместно используемая память является исключительно быстрой и в отличие от каналов предлагает *произвольный* доступ к общим данным. В главе 15 было показано, как применять класс `MemoryMappedFile` для доступа к размещенным в памяти файлам; вызов методов Win32 напрямую будет хорошим способом демонстрации уровня P/Invoke.

Функция `CreateFileMapping` в API-интерфейсе Win32 выделяет совместно используемую память. Ей необходимо указать, сколько байтов требуется, а также имя, под которым будет идентифицироваться совместно используемая память. Затем другое приложение может подписатьсь на данную память, вызвав функцию `OpenFileMapping` с этим именем. Обе функции возвращают *дескриптор*, который можно преобразовать в указатель с помощью вызова функции `MapViewOfFile`.

Ниже представлен класс, инкапсулирующий доступ к совместно используемой памяти:

```
using System;
using System.Runtime.InteropServices;
using System.ComponentModel;
public sealed class SharedMem : IDisposable
{
    // Здесь мы используем перечисления, потому что они безопаснее констант
    enum FileProtection : uint           // константы из winnt.h
    {
        ReadOnly = 2,
        ReadWrite = 4
    }
    enum FileRights : uint               // константы из WinBASE.h
    {
        Read = 4,
        Write = 2,
        ReadWrite = Read + Write
    }
```

```

static readonly IntPtr NoFileHandle = new IntPtr (-1);

[DllImport ("kernel32.dll", SetLastError = true)]
static extern IntPtr CreateFileMapping (IntPtr hFile,
                                         int lpAttributes,
                                         FileProtection flProtect,
                                         uint dwMaximumSizeHigh,
                                         uint dwMaximumSizeLow,
                                         string lpName);

[DllImport ("kernel32.dll", SetLastError = true)]
static extern IntPtr OpenFileMapping (FileRights dwDesiredAccess,
                                         bool bInheritHandle,
                                         string lpName);

[DllImport ("kernel32.dll", SetLastError = true)]
static extern IntPtr MapViewOfFile (IntPtr hFileMappingObject,
                                         FileRights dwDesiredAccess,
                                         uint dwFileOffsetHigh,
                                         uint dwFileOffsetLow,
                                         uint dwNumberOfBytesToMap);

[DllImport ("Kernel32.dll", SetLastError = true)]
static extern bool UnmapViewOfFile (IntPtr map);

[DllImport ("kernel32.dll", SetLastError = true)]
static extern int CloseHandle (IntPtr hObject);

IntPtr fileHandle, fileMap;
public IntPtr Root => fileMap;

public SharedMem (string name, bool existing, uint sizeInBytes)
{
    if (existing)
        fileHandle = OpenFileMapping (FileRights.ReadWrite, false, name);
    else
        fileHandle = CreateFileMapping (NoFileHandle, 0,
                                         FileProtection.ReadWrite,
                                         0, sizeInBytes, name);

    if (fileHandle == IntPtr.Zero)
        throw new Win32Exception();

    // Получить отображение с возможностью чтения/записи для всего файла
    fileMap = MapViewOfFile (fileHandle, FileRights.ReadWrite, 0, 0, 0);

    if (fileMap == IntPtr.Zero)
        throw new Win32Exception();
}

public void Dispose()
{
    if (fileMap != IntPtr.Zero) UnmapViewOfFile (fileMap);
    if (fileHandle != IntPtr.Zero) CloseHandle (fileHandle);
    fileMap = fileHandle = IntPtr.Zero;
}
}

```

В приведенном примере мы указываем `SetLastError = true` в методах `DllImport`, которые используют протокол `SetLastError` для выдачи кодов ошибок. Это обеспечит заполнение исключения `Win32Exception` де-

тальными сведениями об ошибке, когда оно будет генерировано. (Вдобавок также появляется возможность запрашивать ошибку явно вызовом метода `Marshal.GetLastWin32Error`.)

Для демонстрации работы класса `SharedMem` понадобится запустить два приложения. Первое из них создает совместно используемую память следующим образом:

```
using (SharedMem sm = new SharedMem ("MyShare", false, 1000))
{
    IntPtr root = sm.Root;
    // Появился доступ к совместно используемой памяти
    Console.ReadLine(); // В этот момент мы запускаем второе приложение...
}
```

Второе приложение подписывается на совместно используемую память, конструируя объект `SharedMem` с тем же самым именем и передавая значение `true` в качестве аргумента `existing`:

```
using (SharedMem sm = new SharedMem ("MyShare", true, 1000))
{
    IntPtr root = sm.Root;
    // Появился доступ к той же самой совместно используемой памяти
    // ...
}
```

В конечном итоге каждая программа имеет объект `IntPtr` — указатель на одну и ту же неуправляемую память. Теперь два приложения должны каким-то образом выполнять чтение и запись в память через имеющийся общий указатель. Один из подходов предполагает построение сериализируемого класса, который инкапсулирует все совместно используемые данные, после чего сериализирует (и десериализирует) данные в неуправляемую память с применением класса `UnmanagedMemoryStream`. Однако при наличии большого объема данных такой прием неэффективен. Представьте себе ситуацию, когда класс совместно используемой памяти имеет мегабайт данных, но нужно обновить только одно целочисленное значение. Более удачный подход предусматривает определение конструкции совместно используемых данных в виде структуры, и затем ее отображение прямо на совместно используемую память. Мы обсудим это в следующем разделе.

Отображение структуры на неуправляемую память

Структура, для которой в атрибуте `StructLayout` указано значение `Sequential` или `Explicit`, может отображаться прямо на неуправляемую память. Рассмотрим показанную ниже структуру:

```
[StructLayout (LayoutKind.Sequential)]
unsafe struct MySharedData
{
    public int Value;
    public char Letter;
    public fixed float Numbers [50];
}
```

Директива `fixed` позволяет определять массивы типов значений фиксированной длины встроенным образом, что как раз и создает область `unsafe`. Пространство в данной структуре выделяется встроенным образом для 50 чисел с плавающей точкой. В отличие от стандартных массивов C# член `Numbers` — не ссылка на массив, а сам массив. Если выполнить следующий код:

```
static unsafe void Main() => Console.WriteLine (sizeof (MySharedData));
```

то на консоль выводится результат 208: 50 четырехбайтовых значений `float` плюс четыре байта для поля `Value` типа `int` плюс два байта для поля `Letter` типа `char`. Общее количество байтов, равное 206, округляется до 208 из-за того, что значения `float` выравниваются по четырехбайтовым границам (четыре байта — размер типа `float`).

Проще всего продемонстрировать использование структуры `MySharedData` в контексте `unsafe` на примере памяти, выделенной в стеке:

```
MySharedData d;  
MySharedData* data = &d; // Получить адрес d  
  
data->Value = 123;  
data->Letter = 'X';  
data->Numbers[10] = 1.45f;
```

или:

```
// Распределить массив в стеке:  
MySharedData* data = stackalloc MySharedData[1];  
data->Value = 123;  
data->Letter = 'X';  
data->Numbers[10] = 1.45f;
```

Разумеется, мы здесь не демонстрируем ничего такого, чего нельзя было бы достичь в управляемом контексте. Но предположим, что мы хотим хранить экземпляр `MySharedData` в *неуправляемой куче*, т.е. за пределами действия сборщика мусора CLR. Именно в таких случаях указатели становятся по-настоящему полезными:

```
MySharedData* data = (MySharedData*)  
Marshal.AllocHGlobal (sizeof (MySharedData)).ToPointer();  
data->Value = 123;  
data->Letter = 'X';  
data->Numbers[10] = 1.45f;
```

Метод `Marshal.AllocHGlobal` выделяет память в неуправляемой куче. Вот как позже освободить ту же самую память:

```
Marshal.FreeHGlobal (new IntPtr (data));
```

(Если забыть об освобождении этой памяти, тогда в результате возникнет хорошо известная утечка памяти.)



Начиная с версии .NET 6, для выделения и освобождения неуправляемой памяти можно применять класс `NativeMemory`, который использует более новый (и лучший) базовый API-интерфейс, чем `AllocHGlobal`, а также включает методы для выполнения выровненных выделений памяти.

В соответствии с ее именем мы будем применять структуру MySharedData вместе с классом SharedMem, написанным в предыдущем разделе. В следующей программе выделяется блок совместно используемой памяти, на который затем отображается структура MySharedData:

```
static unsafe void Main()
{
    using (SharedMem sm = new SharedMem ("MyShare", false,
                                         (uint) sizeof (MySharedData)))
    {
        void* root = sm.Root.ToPointer();
        MySharedData* data = (MySharedData*) root;
        data->Value = 123;
        data->Letter = 'X';
        data->Numbers[10] = 1.45f;
        Console.WriteLine ("Written to shared memory");
        // Записано в совместно используемую память
        Console.ReadLine();

        Console.WriteLine ("Value is " + data->Value);           // Поле Value
        Console.WriteLine ("Letter is " + data->Letter);         // Поле Letter
        Console.WriteLine ("11th Number is " + data->Numbers[10]);
        // 11-й элемент Numbers
        Console.ReadLine();
    }
}
```



Вместо SharedMem можно применять встроенный класс Memory MappedFile:

```
using (MemoryMappedFile mmfFile =
       MemoryMappedFile.CreateNew ("MyShare", 1000))
using (MemoryMappedViewAccessor accessor =
       mmfFile.CreateViewAccessor())
{
    byte* pointer = null;
    accessor.SafeMemoryMappedViewHandle.AcquirePointer
    (ref pointer);
    void* root = pointer;
    ...
}
```

Ниже представлена вторая программа, которая присоединяется к той же самой совместно используемой памяти и читает значения, записанные первой программой (она должна быть запущена, пока первая программа ожидает в операторе ReadLine, т.к. после выхода из оператора using объект совместно используемой памяти освобождается):

```
static unsafe void Main()
{
    using (SharedMem sm = new SharedMem ("MyShare", true,
                                         (uint) sizeof (MySharedData)))
    {
        void* root = sm.Root.ToPointer();
        MySharedData* data = (MySharedData*) root;
```

```

Console.WriteLine ("Value is " + data->Value);           // Поле Value
Console.WriteLine ("Letter is " + data->Letter);        // Поле Letter
Console.WriteLine ("11th Number is " + data->Numbers[10]);
               // 11-й элемент Numbers

// Наша очередь обновлять значения в совместно используемой памяти
data->Value++;
data->Letter = '!';
data->Numbers[10] = 987.5f;
Console.WriteLine ("Updated shared memory");
               // Обновлено в совместно используемой памяти
Console.ReadLine();
}
}

```

Далее приведен вывод из обеих программ.

Первая программа:

```

Written to shared memory
Value is 124
Letter is !
11th Number is 987.5

```

Вторая программа:

```

Value is 123
Letter is X
11th Number is 1.45
Updated shared memory

```

Не стоит путаться указателей: программисты на языке C++ применяют указатели в приложениях повсеместно и способны заставить их работать в любой ситуации. Во всяком случае, большую часть времени. Такой вид использования является сравнительно простым.

Наш пример небезопасен по другой причине. Мы не принимали во внимание проблемы безопасности в отношении потоков (или, выражаясь точнее — безопасности в отношении процессов), которые возникают в ситуации, когда две программы получают доступ к одной и той же памяти одновременно. Чтобы задействовать такой прием в производственном приложении, к полям *Value* и *Letter* структуры *MySharedData* потребуется добавить ключевое слово *volatile*, чтобы предотвратить кэширование этих полей компилятором JIT (или оборудованием в регистрах центрального процессора). Вдобавок по мере выхода взаимодействия с полями за рамки тривиального почти наверняка придется защищать доступ к ним с помощью межпроцессного объекта *Mutex* — точно так же, как мы бы применяли операторы *lock* для защиты доступа к полям в многопоточной программе. Безопасность к потокам подробно обсуждалась в главе 21.

fixed и fixed { . . . }

Одно из ограничений отображения структур напрямую в память связано с тем, что структуры могут содержать только неуправляемые типы. Если необходимо совместно использовать, например, строковые данные, тогда должен при-

меняться фиксированный массив символов, что означает ручное преобразование в тип `string` и из него. Вот как это делать:

```
[StructLayout (LayoutKind.Sequential)]
unsafe struct MySharedData
{
    ...
    // Выделить пространство для 200 символов (т.е. 400 байтов).
    const int MessageSize = 200;
    fixed char message [MessageSize];

    // Вероятно, данный код имеет смысл поместить во вспомогательный класс:
    public string Message
    {
        get { fixed (char* cp = message) return new string (cp); }
        set
        {
            fixed (char* cp = message)
            {
                int i = 0;
                for (; i < value.Length && i < MessageSize - 1; i++)
                    cp [i] = value [i];
                // Добавить завершающий символ null.
                cp [i] = '\0';
            }
        }
    }
}
```



Понятие вроде ссылки на фиксированный массив отсутствует; взамен вы получаете указатель. При индексации в фиксированном массиве вы на самом деле выполняете арифметические действия над указателями.

С помощью первого случая использования ключевого слова `fixed` мы выделяем пространство для 200 символов встроенным в структуру образом. Когда ключевое слово `fixed` позже применяется в определении свойства, оно имеет другой смысл (что иногда запутывает). В такой ситуации `fixed` инструктирует среду CLR о необходимости закрепления объекта, так что если принимается решение о проведении сборки мусора внутри блока `fixed`, то внутренняя структура не должна перемещаться в рамках кучи (поскольку по ее содержимому будет производиться итерация через прямые указатели в памяти). Глядя на приведенную выше программу, может возникнуть вопрос о том, как вообще структура `MySharedData` может переместиться в памяти, если она расположается не в куче, а в неуправляемой памяти, к которой сборщик мусора не имеет никакого отношения? Однако компилятору ничего не известно о данном факте, и он предполагает, что вы можете использовать `MySharedData` в управляемом контексте, поэтому настоятельно требует добавления ключевого слова `fixed`, чтобы сделать код `unsafe` безопасным в управляемых контекстах. И компилятор полностью прав — взгляните, насколько легко поместить структуру `MySharedData` в кучу:

```
object obj = new MySharedData();
```

Результатом будет упакованная структура `MySharedData`, которая находится в куче и может быть перемещена во время сборки мусора.

Рассмотренный пример проиллюстрировал, как строка может быть представлена в структуре, отображаемой на неуправляемую память. Для более сложных типов также доступен вариант применения существующего кода сериализации. Единственное условие — сериализованные данные никогда не должны превышать по длине выделенное для них пространство в структуре, иначе это приведет к непреднамеренному объединению с последующими полями.

Взаимодействие с СОМ

Исполняющая среда .NET предлагает специальную поддержку СОМ, разрешая работать с объектами СОМ в .NET и наоборот. Поддержка СОМ доступна только в Windows.

Назначение СОМ

Модель компонентных объектов (Component Object Model — СОМ) представляет собой двоичный стандарт для взаимодействия с библиотеками, который был выпущен Microsoft в 1993 году. Мотивацией к созданию СОМ была необходимость предоставления компонентам возможности взаимодействия друг с другом в независимой от языка и безразличной к версиям манере. До появления СОМ подход, применяемый в Windows, заключался в опубликовании DLL-библиотек, которые объявляли структуры и функции с использованием языка программирования С. Такой подход был не только специфичным к языку, но и достаточно хрупким. Спецификация типа в библиотеке подобного рода неотделима от его реализации: даже добавление к структуре нового поля разрушало ее спецификацию.

Элегантность СОМ заключалась в отделении спецификации типа от его реализации через конструкцию, известную как *интерфейс СОМ*. Технология СОМ также позволила вызывать методы на *объектах*, поддерживающих состояние — не ограничиваясь простыми вызовами процедур.



В определенном смысле модель программирования для .NET является эволюцией принципов программирования для СОМ: платформа .NET также упрощает разработку на многочисленных языках и позволяет двоичным компонентам развиваться, не нарушая работу приложений, которые от них зависят.

Основы системы типов СОМ

Система типов СОМ вращается вокруг интерфейсов. Интерфейс СОМ довольно похож на интерфейс .NET, но получил большее распространение из-за того, что тип СОМ открывает свою функциональность *только* через интерфейс. Например, вот как мы могли бы объявить тип в мире .NET:

```
public class Foo
{
    public string Test() => "Hello, world";
}
```

Потребители типа Foo могут применять метод Test напрямую. И если позже будет изменена реализация метода Test, то повторная компиляция вызывающих сборок не потребуется. В таком отношении платформа .NET отделяет интерфейс от реализации, не делая интерфейсы обязательными. Можно было бы даже добавить перегруженную версию метода Test без нарушения работы вызывающих компонентов:

```
public string Test (string s) => $"Hello, world {s}";
```

В мире СОМ для достижения такого же уровня развязки класс Foo открывает свою функциональность через интерфейс. Таким образом, в библиотеке типов Foo будет присутствовать интерфейс, подобный представленному ниже:

```
public interface IFoo { string Test(); }
```

(Мы иллюстрировали сказанное, показав интерфейс C# — не интерфейс СОМ. Тем не менее, принцип остается тем же самым, хотя связующий код отличается.)

Вызывающие компоненты будут затем взаимодействовать с IFoo, а не с Foo.

Когда дело доходит до добавления перегруженной версии метода Test, ситуация с технологией СОМ оказывается более сложной, чем с .NET. Во-первых, мы хотели бы избежать модификации интерфейса IFoo, т.к. это нарушило бы двоичную совместимость с предыдущей версией (один из принципов СОМ заключается в том, что интерфейсы после опубликования являются *неизменяемыми*). Во-вторых, технология СОМ не поддерживает перегрузку методов. Решение состоит в том, чтобы обеспечить реализацию классом Foo *другого интерфейса*:

```
public interface IFoo2 { string Test (string s); }
```

(И снова для придания знакомого вида мы представили его в виде интерфейса .NET.)

Поддержка множества интерфейсов играет ключевую роль в возможности создания версий библиотек СОМ.

IUnknown и IDispatch

Все интерфейсы СОМ идентифицируются с помощью глобально уникального идентификатора (Globally Unique Identifier — GUID).

Корневым интерфейсом в СОМ является IUnknown; его обязаны реализовывать все объекты СОМ. Он имеет три метода:

- AddRef
- Release
- QueryInterface

Методы AddRef и Release предназначены для управления временем жизни, поскольку в СОМ используется подсчет ссылок, а не автоматическая сборка мусора (технология СОМ была спроектирована для работы с неуправляемыми объектами).

мым кодом, в котором автоматическая сборка мусора неосуществима). Метод `QueryInterface` возвращает ссылку на объект, который поддерживает данный интерфейс, если он способен делать это.

Чтобы стало возможным динамическое программирование (например, написание сценариев и автоматизация), объект COM может также реализовывать интерфейс `IDispatch`. В результате у динамических языков появляется возможность обращаться к объектам COM с применением позднего связывания — почти как с помощью `dynamic` в C# (хотя только для простых вызовов).

Обращение к компоненту COM из C#

Наличие встроенной в CLR поддержки для COM означает, что работать напрямую с интерфейсами `IUnknown` и `IDispatch` не придется. Взамен вы имеете дело с объектами CLR, а исполняющая среда маршализирует обращения к миру COM через *вызываемые оболочки времени выполнения* (Runtime-Callable Wrapper — RCW). Исполняющая среда также отвечает за управление временем жизни, вызывая методы `AddRef` и `Release` (когда объект .NET финализируется), и заботится о преобразованиях примитивных типов между двумя мирами. Преобразование типов гарантирует, что каждая сторона видит, например, целочисленные и строковые типы в знакомых ей формах.

Кроме того, необходим какой-нибудь способ доступа к оболочкам RCW в статически типизированной манере. Такая работа выполняется *типами взаимодействия с COM*. Типы взаимодействия с COM — это автоматически сгенерированные типы-посредники, которые открывают доступ к члену .NET для каждого члена COM. Инструмент импорта библиотек типов (`tlbimp.exe`) генерирует типы взаимодействия с COM в командной строке на основе выбранной библиотеки COM и компилирует их в *сборку взаимодействия с COM*.



Если компонент COM реализует сразу несколько интерфейсов, тогда инструмент `tlbimp.exe` генерирует одиночный тип, который содержит объединение членов из всех интерфейсов.

Сборку взаимодействия с COM можно создать в Visual Studio, открыв диалоговое окно `Add Reference` (Добавить ссылку) и выбрав нужную библиотеку на вкладке COM. Например, при наличии установленной программы Microsoft Excel добавление ссылки на библиотеку Microsoft Excel Object Library позволяет взаимодействовать с классами COM для Excel. Ниже приведен код, который создает и отображает рабочую книгу, после чего заполняет в ней ячейку:

```
using System;
using Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel;

var excel = new Excel.Application();
excel.Visible = true;
excel.WindowState = Excel.XlWindowState.xlMaximized;
Excel.Workbook workBook = excel.Workbooks.Add();
((Excel.Range)excel.Cells[1, 1]).Font.FontStyle = "Bold";
((Excel.Range)excel.Cells[1, 1]).Value2 = "Hello World";
workBook.SaveAs(@"d:\temp.xlsx");
```



В настоящее время типы взаимодействия необходимо внедрять в разрабатываемое приложение (иначе исполняющая среда не найдет их во время выполнения). Щелкните на ссылке COM в проводнике решения Visual Studio и в окне свойств проекта установите параметр Embed Interop Types (Внедрять типы взаимодействия) в true или откройте файл .csproj и добавьте в него следующую строку (выделенную полужирным):

```
<ItemGroup>
  <COMReference Include="Microsoft.Office.Excel.dll">
    ...
    <EmbedInteropTypes>true</EmbedInteropTypes>
  </COMReference>
</ItemGroup>
```

Класс Excel.Application — это тип взаимодействия с COM, чьим типом времени выполнения является RCW. Когда мы обращаемся к свойствам Workbooks и Cells, то получаем еще больше типов взаимодействия.

Необязательные параметры и именованные аргументы

Поскольку API-интерфейсы COM не поддерживают перегрузку функций, очень часто приходится иметь дело с функциями, принимающими многочисленные параметры, часть которых являются необязательными. Например, вот как можно вызвать метод Save рабочей книги Excel:

```
var missing = System.Reflection.Missing.Value;
workBook.SaveAs(@"d:\temp.xlsx", missing, missing, missing, missing,
  missing, Excel.XlSaveAsAccessMode.xlNoChange, missing, missing,
  missing, missing, missing);
```

Хорошая новость заключается в том, что поддержка необязательных параметров в C# осведомлена о COM, поэтому можно поступать просто так:

```
workBook.SaveAs(@"d:\temp.xlsx");
```

(Как объяснялось в главе 3, необязательные параметры “расширяются” компилятором в полную форму.)

Именованные аргументы позволяют указывать дополнительные аргументы независимо от их позиций:

```
workBook.SaveAs(@"d:\test.xlsx", Password:"foo");
```

Неявные параметры `ref`

Некоторые API-интерфейсы COM (в частности, Microsoft Word) открывают доступ к функциям, которые объявляют *каждый* параметр как передаваемый по ссылке вне зависимости от того, модифицирует функция его значение или нет. Причина — выигрыш в производительности из-за отсутствия необходимости копировать значения аргументов (хотя фактический выигрыш в производительности незначителен).

Исторически сложилось так, что вызов методов подобного рода в коде C# был затруднен, поскольку для каждого аргумента приходилось указывать ключевое слово `ref`, а это препятствовало использованию необязательных параметров. Например, для открытия документа Word раньше нужно было поступать следующим образом:

```
object filename = "foo.doc";
object notUsed1 = Missing.Value;
object notUsed2 = Missing.Value;
object notUsed3 = Missing.Value;
...
Open (ref filename, ref notUsed1, ref notUsed2, ref notUsed3, ...);
```

Благодаря неявным ссылочным параметрам модификатор `ref` в вызовах функций COM можно опускать, делая возможным применение необязательных параметров:

```
word.Open ("foo.doc");
```

Однако следует помнить о том, что если вызываемый метод COM действительно изменит значение аргумента, то никакой ошибки не возникнет — ни на этапе компиляции, ни во время выполнения.

Индексаторы

Возможность не указывать модификатор `ref` дает еще одно преимущество: индексаторы COM с параметрами `ref` становятся доступными через обычный синтаксис индексаторов C#. В противном случае это было бы запрещено, т.к. параметры `ref/out` не поддерживаются индексаторами C#.

Можно также обращаться к свойствам COM, которые принимают аргументы. В следующем примере `Foo` является свойством, принимающим целочисленный аргумент:

```
myComObject.Foo [123] = "Hello";
```

Самостоятельное написание таких свойств в C# все еще запрещено: тип может открывать доступ к индексатору только на самом себе (“стандартный” индексатор). Таким образом, если необходимо написать код C#, который сделал бы предыдущий оператор законным, то свойство `Foo` должно было бы возвращать другой тип, открывающий доступ к (стандартному) индексатору.

Динамическое связывание

Есть два способа, которыми динамическое связывание может помочь при обращении к компонентам COM.

Первый способ связан с разрешением доступа к компоненту COM без типа взаимодействия COM. Для этого необходимо вызвать метод `Type.GetTypeFromProgID` с именем компонента COM, чтобы получить экземпляр COM и затем воспользоваться динамическим связыванием с целью вызова методов данного экземпляра. Естественно, средство IntelliSense здесь недоступно, и проверки на этапе компиляции невозможны:

```
Type excelAppType = Type.GetTypeFromProgID ("Excel.Application", true);
dynamic excel = Activator.CreateInstance (excelAppType);
excel.Visible = true;
dynamic wb = excel.Workbooks.Add();
excel.Cells [1, 1].Value2 = "foo";
```

(Аналогичной цели можно достичь и намного более запутанным путем, применив рефлексию вместо динамического связывания.)



Вариацией на эту тему является обращение к компоненту COM, который поддерживает только интерфейс `IDispatch`. Тем не менее, такие компоненты встречаются довольно редко.

Динамическое связывание также может быть удобным (в меньшей степени) при работе с COM-типов `variant`. По причинам, обусловленным скорее неудачным проектным решением, нежели необходимости, функции API-интерфейса COM зачастую буквально усыпаны данным типом, который является грубым эквивалентом типа `object` в .NET. Если вы включите параметр `Embed Interop Types` в своем проекте, тогда исполняющая среда будет отображать `variant` на `dynamic` вместо отображения `variant` на `object`, устранив необходимость в приведениях. Например, законно было бы поступить так:

```
excel.Cells [1, 1].Font.FontStyle = "Bold";
```

вместо:

```
var range = (Excel.Range) excel.Cells [1, 1];
range.Font.FontStyle = "Bold";
```

Недостаток такого способа работы связан с утратой возможности автозавершения, поэтому вы должны точно знать, что свойство по имени `Font` существует. По указанной причине обычно проще динамически присваивать результат известному типу взаимодействия:

```
Excel.Range range = excel.Cells [1, 1];
range.Font.FontStyle = "Bold";
```

Как видите, код не намного короче, чем при подходе в старом стиле!

Отображение `variant` на `dynamic` принято по умолчанию и является функцией включения параметра `Embed Interop Types` (Внедрять типы взаимодействия) для ссылки.

Внедрение типов взаимодействия

Ранее упоминалось о том, что C# обычно обращается к компонентам COM через типы взаимодействия, которые генерируются путем запуска инструмента `tlbimp.exe` (напрямую или через Visual Studio).

По историческим причинам единственным вариантом была ссылка на сборки взаимодействия, как в случае любых других сборок. Дело могло быть хлопотным, потому что сборки взаимодействия для сложных компонентов COM нередко оказываются довольно большими. Скажем, крошечный дополнительный модуль для Microsoft Word требует сборки взаимодействия, которая на порядки больше его самого.

Вместо ссылки на сборку взаимодействия можно внедрять лишь те части, которые используются. Компилятор анализирует сборку на предмет типов и членов, которые требуются в приложении, и внедряет определения (только) таких типов и членов прямо в приложение. В итоге устраняется эффект разбухания кода, а также отпадает необходимость в поставке дополнительного файла.

Щелкните на ссылке COM в проводнике решения Visual Studio и в окне свойств проекта установите параметр Embed Interop Types (Внедрять типы взаимодействия) в true или отредактируйте файл .csproj, как было описано ранее в главе в разделе “Обращение к компоненту COM из C#”.

Эквивалентность типов

Среда CLR поддерживает эквивалентность типов для связанных типов взаимодействия. Это означает, что если две сборки связываются с каким-то типом взаимодействия, то такие типы будут считаться эквивалентными, если они являются оболочками для одного и того же типа COM. Сказанное справедливо, даже когда сборки взаимодействия, с которыми они связаны, были сгенерированы независимо друг от друга.



Эквивалентность типов полагается на атрибут TypeIdentifier Attribute из пространства имен System.Runtime.InteropServices. Компилятор автоматически применяет его во время связывания со сборками взаимодействия. Затем типы COM считаются эквивалентными, если они имеют одинаковые идентификаторы GUID.

Открытие объектов C# для COM

Существует также возможность написания классов C#, которые могут потребляться в мире COM. Среда CLR делает это возможным через посредника под названием *вызываемая оболочка COM* (COM-callable wrapper — CCW). Оболочка CCW маршализирует типы между двумя мирами (подобно RCW), а также реализует интерфейс IUnknown (и дополнительно IDispatch), как того требует протокол COM. Временем жизни оболочки CCW управляет сторона COM через подсчет ссылок (а не посредством сборщика мусора CLR).

Любой открытый класс можно делать доступным COM (в качестве “внутрипроцессного” сервера). Для начала создайте интерфейс, назначьте ему идентификатор GUID (в Visual Studio можно выбрать пункт меню Tools⇒Create GUID (Сервис⇒Создать GUID)), объявите его видимым COM и установите тип интерфейса:

```
namespace MyCom
{
    [ComVisible(true)]
    [Guid ("226E5561-C68E-4B2B-BD28-25103ABC3B1")] // Измените этот GUID
    [InterfaceType (ComInterfaceType.InterfaceIsIUnknown)]
    public interface IServer
    {
        int Fibonacci();
    }
}
```

Затем сделайте доступной реализацию нашего интерфейса, назначив ей идентификатор GUID:

```
namespace MyCom
{
    [ComVisible(true)]
    [Guid ("09E01FCD-9970-4DB3-B537-0EC555967DD9")]      // Измените этот GUID
    public class Server
    {
        public ulong Fibonacci (ulong whichTerm)
        {
            if (whichTerm < 1) throw new ArgumentException (...);
            ulong a = 0;
            ulong b = 1;
            for (ulong i = 0; i < whichTerm; i++)
            {
                ulong tmp = a;
                a = b;
                b = tmp + b;
            }
            return a;
        }
    }
}
```

Отредактируйте свой файл .csproj, добавив следующую строку (выделенную полужирным):

```
<PropertyGroup>
    <EnableComHosting>true</EnableComHosting>
</PropertyGroup>
```

Теперь при построении проекта генерируется дополнительный файл MyCom.comhost.dll, который можно зарегистрировать для взаимодействия с СОМ. (Имейте в виду, что в зависимости от конфигурации проекта этот файл будет 32- или 64-битным: в таком сценарии не существует понятия “любой центральный процессор”.) Откройте окно командной подсказки с повышенными полномочиями, перейдите в каталог с вашей DLL-библиотекой и введите команду regsvr32 MyCom.comhost.dll.

Затем вы сможете использовать свой компонент СОМ в коде на большинстве языков, способных взаимодействовать с СОМ. Например, создайте в текстовом редакторе показанный ниже сценарий на Visual Basic и запустите его, дважды щелкнув на имени файла в проводнике Windows или введя имя файла в окне командной подсказки, как поступили бы с обычновенной программой:

```
REM Сохраните файл как ComClient.vbs
Dim obj
Set obj = CreateObject ("MyCom.Server")
result = obj.Fibonacci(12)
Wscript.Echo result
```

Обратите внимание, что .NET Framework нельзя загрузить в тот же процесс, что и .NET 5+ или .NET Core. Следовательно, COM-сервер .NET 5+ не может быть загружен в процесс COM-клиента .NET Framework и наоборот.

Включение COM без регистрации

Традиционно COM добавляет информацию о типах в реестр. Для управления активизацией объектов COM без регистрации используется файл манифеста, а не реестр. Чтобы включить данное средство, добавьте в свой файл .csproj приведенную далее строку (выделенную полужирным):

```
<PropertyGroup>
  <TargetFramework>netcoreapp3.0</TargetFramework>
  <EnableComHosting>true</EnableComHosting>
  <EnableRegFreeCom>true</EnableRegFreeCom>
</PropertyGroup>
```

В результате построения проекта будет сгенерирован файл MyCom.X.manifest.



Поддержка генерации библиотеки типов COM (*.t1b) в .NET 5+ отсутствует. Для низкоуровневых объявлений в интерфейсе вы можете вручную написать файл IDL (Interface Definition Language — язык определения интерфейсов) или заголовочный файл C++.



25

Регулярные выражения

Язык регулярных выражений распознает символьные образцы. Типы .NET, поддерживающие регулярные выражения, основаны на регулярных выражениях Perl 5 и обеспечивают функциональность как поиска, так и поиска/замены.

Регулярные выражения используются для решения следующих задач:

- проверка текстового ввода, такого как пароли и телефонные номера;
- преобразование текстовых данных в более структурированные формы (например, в строку версии NuGet);
- замена образцов текста в документе (например, только целых слов).

Настоящая глава разделена на концептуальные разделы, обучающие основам регулярных выражений в .NET, и справочные разделы, в которых приводится описание языка регулярных выражений.

Все типы для работы с регулярными выражениями определены в пространстве имен `System.Text.RegularExpressions`.



Все примеры, приведенные в главе, можно загрузить вместе с утилитой LINQPad, которая также включает интерактивный инструмент RegEx (для его открытия — нажмите комбинацию клавиш `<Ctrl+Shift+F1>`). Онлайновая версия инструмента доступна по ссылке <http://regexstorm.net/tester>.

Основы регулярных выражений

Одной из наиболее распространенных операций регулярных выражений является **квантификатор**. Операция `?` — это квантификатор, который соответствует предшествующему элементу 0 или 1 раз. Другими словами, `?` означает **необязательный**. Элемент представляет собой либо одиночный символ, либо сложную структуру символов в квадратных скобках. Например, регулярное выражение "colou?r" соответствует `color` и `colour`, но не `colouur`:

```
Console.WriteLine (Regex.Match ("color", @"colou?r").Success); // True
Console.WriteLine (Regex.Match ("colour", @"colou?r").Success); // True
Console.WriteLine (Regex.Match ("colouur", @"colou?r").Success); // False
```

Метод `Regex.Match` выполняет поиск внутри большой строки. Возвращаемый им объект имеет свойства для позиции (`Index`) и длины (`Length`) совпадения, а также свойство для действительного значения (`Value`) совпадения:

```
Match m = Regex.Match ("any colour you like", @"colou?r");
Console.WriteLine (m.Success); // True
Console.WriteLine (m.Index); // 4
Console.WriteLine (m.Length); // 6
Console.WriteLine (m.Value); // colour
Console.WriteLine (m.ToString()); // colour
```

Метод `Regex.Match` можно воспринимать как более мощную версию метода `IndexOf` типа `string`. Разница в том, что он ищет совпадение с *образцом*, а не с *литеральной строкой*.

Метод `IsMatch` — сокращение для вызова метода `Match` с последующей проверкой свойства `Success`.

Механизм регулярных выражений по умолчанию работает слева направо, поэтому возвращается только самое левое соответствие. Для возвращения дополнительных совпадений можно применять метод `NextMatch`:

```
Match m1 = Regex.Match ("One color? There are two colours in my head!",
    @"colou?rs?");
Match m2 = m1.NextMatch();
Console.WriteLine (m1); // color
Console.WriteLine (m2); // colours
```

Метод `Matches` возвращает все совпадения в виде массива. Предыдущий пример можно переписать, как показано ниже:

```
foreach (Match m in Regex.Matches
    ("One color? There are two colours in my head!", @"colou?rs?"))
    Console.WriteLine (m);
```

Еще одной распространенной операцией регулярных выражений является *перестановка*, обозначаемая вертикальной чертой, т.е. `|`. Перестановка выражает альтернативы. Следующий код дает совпадения для Jen, Jenny и Jennifer:

```
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("Jenny", "Jen(ny|nifer)?")); // True
```

Скобки вокруг перестановки отделяют альтернативы от остальной части выражения.



При поиске совпадений с регулярными выражениями можно указывать тайм-аут. Если операция поиска совпадения занимает больше времени, чем заданное в объекте `TimeSpan`, тогда генерируется исключение `RegexMatchTimeoutException`. Прием может быть полезен, когда программа обрабатывает регулярные выражения, предоставляемые пользователем (например, в диалоговом окне расширенного поиска), потому что при этом предотвращается бесконечное зацикливание неправильно сформированных регулярных выражений.

Скомпилированные регулярные выражения

В некоторых рассмотренных ранее примерах мы многократно вызывали статический метод `RegEx` с одним и тем же образцом. В таких случаях альтернативным подходом является создание объекта `Regex` с этим образцом и флагом `RegexOptions.Compiled`, а затем вызов методов экземпляра:

```
Regex r = new Regex(@"sausages?", RegexOptions.Compiled);
Console.WriteLine(r.Match("sausage")); // sausage
Console.WriteLine(r.Match("sausages")); // sausages
```

Флаг `RegexOptions.Compiled` инструктирует экземпляр `RegEx` о том, что должна использоваться облегченная генерация кода (`DynamicMethod` в `Reflection.Emit`) для динамического построения и компиляции кода, настроенного на это конкретное выражение. В результате обеспечивается более быстрое сопоставление за счет затрат на первоначальную компиляцию.

Создать объект `Regex` можно также без применения `RegexOptions.Compiled`. Экземпляр `Regex` является неизменяемым.



Механизм регулярных выражений характеризуется высокой скоростью. Даже без компиляции нахождение простого совпадения требует менее микросекунды.

Перечисление флагов `RegexOptions`

Перечисление флагов `RegexOptions` позволяет настраивать поведение сопоставления. Распространенное применение `RegexOptions` связано с выполнением поиска, нечувствительного к регистру символов:

```
Console.WriteLine(Regex.Match("a", "A", RegexOptions.IgnoreCase)); // a
```

Это задействует правила для эквивалентности регистров символов текущей культуры. Флаг `CultureInvariant` позволяет затребовать инвариантную культуру:

```
Console.WriteLine(Regex.Match("a", "A", RegexOptions.IgnoreCase
    | RegexOptions.CultureInvariant));
```

Большинство флагов `RegexOptions` можно также активизировать внутри самого регулярного выражения с использованием однобуквенного кода:

```
Console.WriteLine(Regex.Match("a", @"(?i)A")); // a
```

Действие флагов можно включать и отключать на протяжении всего выражения:

```
Console.WriteLine(Regex.Match("AAAa", @"(?i)a(?-i)a")); // Aa
```

Еще одним полезным флагом является `IgnorePatternWhitespace` или `(?x)`. Он позволяет вставлять пробельные символы, чтобы улучшить читабельность регулярного выражения — без трактовки таких символов литеральным образом.

Значение `NonBacktracking` (введенное в .NET 7) заставляет механизм регулярных выражений применять алгоритм сопоставления с продвижением только вперед. Обычно это приводит к снижению производительности и отключению некоторых расширенных функций, таких как просмотр вперед или просмотр назад. Тем не менее, в таком случае также предотвращается почти бесконечное время выполнения искаженных или злонамеренно созданных выражений, уменьшая потенциальную атаку типа отказа в обслуживании при обработке регулярных выражений, которые предоставлены пользователем (атака ReDOS). В сценариях подобного рода также полезно указывать тайм-аут.

В табл. 25.1 приведены все значения `RegexOptions` вместе с их однобуквенными кодами.

Таблица 25.1. Параметры регулярных выражений

Значение перечисления	Код в регулярном выражении	Описание
None		
<code>IgnoreCase</code>	<code>i</code>	Игнорировать регистр символов (по умолчанию регулярные выражения чувствительны к регистру символов)
<code>Multiline</code>	<code>m</code>	Изменить <code>^</code> и <code>\$</code> так, чтобы они соответствовали началу/концу строчки текста, а не началу/концу всей строки
<code>ExplicitCapture</code>	<code>n</code>	Захватывать только явно именованные или явно нумерованные группы (как описано в разделе “Группы” далее в главе)
<code>Compiled</code>		Инициировать компиляцию регулярного выражения в IL (см. раздел “Скомпилированные регулярные выражения” ранее в главе)
<code>Singleline</code>	<code>s</code>	Сделать точку <code>(.)</code> соответствующей любому символу (вместо соответствия любому символу кроме <code>\n</code>)
<code>IgnorePatternWhitespace</code>	<code>x</code>	УстраниТЬ из образца неотмененные пробельные символы
<code>RightToLeft</code>	<code>r</code>	Выполнять поиск справа налево; указывать где-то посередине не разрешено
<code>ECMAScript</code>		Обеспечить совместимость с ECMA (по умолчанию реализация не совместима с ECMA)
<code>CultureInvariant</code>		Отключить поведение, специфичное для культуры, при сравнении строк
<code>NonBacktracking</code>		Отключить возврат назад с целью обеспечения предсказуемой (хотя и более низкой) производительности

Отмена символов

Регулярные выражения имеют следующие метасимволы, которые трактуются специальным образом, отличающимся от их литерального смысла:

\ * + ? | { [() ^ \$. #

Чтобы применить метасимвол литерально, его потребуется предварить обратной косой чертой, т.е. отменить. В следующем примере мы отменяем символ ? для сопоставления со строкой "what?":

```
Console.WriteLine (Regex.Match ("what?", @"what\?")); // what? (правильно)
Console.WriteLine (Regex.Match ("what?", @"what?")); // what (неправильно)
```



Если символ находится внутри **набора** (в квадратных скобках), то данное правило не действует, и метасимволы интерпретируются литеральным образом. Наборы обсуждаются в следующем разделе.

Методы Escape и Unescape класса Regex преобразуют строку, содержащую метасимволы регулярных выражений, путем замены их отмененными эквивалентами и наоборот. Например:

```
Console.WriteLine (Regex.Escape    (@"?"));           // \?
Console.WriteLine (Regex.Unescape (@"\?"));           // ?>
```

Все строки регулярных выражений в настоящей главе представлены с помощью литерала @ из C#. Так сделано для того, чтобы обойти механизм отмены языка C#, в котором также используется обратная косая черта. Без символа @ литеральная обратная косая черта потребовала бы указания четырех таких символов:

```
Console.WriteLine (Regex.Match ("\\", "\\\\"));        // \
```

Если не включена опция (?x), тогда пробелы в регулярных выражениях трактуются литеральным образом:

```
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("hello world", @"hello world")); // True
```

Наборы символов

Наборы символов действуют в качестве групповых символов для отдельного множества символов.

Выражение	Описание	Инверсия ("не")
[abcdef]	Соответствует одиночному символу в списке	[^abcdef]
[a-f]	Соответствует одиночному символу в диапазоне	[^a-f]
\d	Соответствует чему угодно из категории цифр Unicode. В режиме ECMAScript это то же самое, что и [0-9]	\D
\w	Соответствует символу, который допустим в словах (по умолчанию варьируется согласно CultureInfo.CurrentCulture; например, в английском языке это то же самое, что и [a-zA-Z_0-9])	\W

Выражение	Описание	Инверсия (“не”)
\s	Соответствует пробельному символу, т.е. любому символу, для которого <code>char.IsWhiteSpace</code> возвращает <code>true</code> (включая пробелы Unicode). В режиме ECMAScript это то же самое, что и <code>[\n\r\t\f\v]</code>	\S
\p{категория}	Соответствует символу в указанной категории	\P
.	(Стандартный режим.) Соответствует любому символу кроме <code>\n</code>	\p
.	(Режим SingleLine.) Соответствует любому символу	\p

Для соответствия в точности одному символу из набора поместите набор символов в квадратные скобки:

```
Console.WriteLine(Regex.Matches("That is that.", "[Tt]hat").Count); // 2
```

Для соответствия любому символу, исключая перечисленные в наборе, поместите набор в квадратные скобки и укажите `^` перед первым символом набора:

```
Console.WriteLine(Regex.Match("quiz qwerty", "q[^aeiou]").Index); // 5
```

С помощью дефиса можно задавать диапазон символов. Следующее выражение соответствует шахматному ходу:

```
Console.WriteLine(Regex.Match("b1-c4", @"[a-h]\d-[a-h]\d").Success); // True
```

`\d` указывает цифровой символ, поэтому `\d` будет соответствовать любой цифре. `\D` соответствует любому нецифровому символу.

`\w` указывает символ, допустимый в словах, что включает буквы, цифры и подчеркивание. `\W` соответствует любому символу, наличие которого в словах не допускается. Это также работает ожидаемым образом и для неанглийских букв, таких как кириллица.

. соответствует любому символу кроме `\n` (но разрешает `\r`).

`\p` соответствует символу в указанной категории, такой как `{Lu}` для буквы верхнего регистра или `{P}` для знака пунктуации (список категорий будет приведен в справочном разделе далее в главе):

```
Console.WriteLine(Regex.IsMatch("Yes, please", @"\p{P}")); // True
```

Мы приведем больше случаев применения `\d`, `\w` и ., когда будем комбинировать их с квантификаторами.

Квантификаторы

Квантификаторы обеспечивают соответствие элементу указанное количество раз.

Квантификатор	Описание
*	Ноль или больше совпадений
+	Одно или больше совпадений
?	Ноль или одно совпадение
{n}	В точности n совпадений
{n,}	По меньшей мере, n совпадений
{n,m}	Количество совпадений между n и m

Квантификатор * обеспечивает соответствие предшествующего символа или группы ноль или более раз. Следующее выражение соответствует имени файла cv.docx, а также любым версиям имени с числами (например, cv2.docx, cv15.docx):

```
Console.WriteLine (Regex.Match ("cv15.docx", @"cv\d*\.\.docx").Success); // True
```

Обратите внимание, что мы должны отменить символ точки в расширении файла с помощью обратной косой черты.

Показанное ниже выражение допускает наличие любых символов между cv и .docx и эквивалентно команде dir cv*.docx:

```
Console.WriteLine (Regex.Match ("cvjoint.docx", @"cv.*\.\.docx").Success); // True
```

Квантификатор + обеспечивает соответствие предшествующего символа или группы один или более раз, например:

```
Console.WriteLine (Regex.Matches ("slow! yeah slooow!", "slo+w").Count); // 2
```

Квантификатор {} обеспечивает соответствие указанному количеству (или диапазону) повторений. Следующее выражение выводит показания артериального давления:

```
Regex bp = new Regex (@"\d{2,3}/\d{2,3}");
Console.WriteLine (bp.Match ("It used to be 160/110")); // 160/110
Console.WriteLine (bp.Match ("Now it's only 115/75")); // 115/75
```

Жадные или ленивые квантификаторы

По умолчанию квантификаторы являются **жадными** как противоположность **ленивым** квантификаторам. Жадный квантификатор повторяется настолько много раз, сколько может, прежде чем продолжить. Ленивый квантификаторы повторяются настолько мало раз, сколько может, прежде чем продолжить. Для того чтобы сделать любой квантификатор ленивым, его необходимо снабдить суффиксом в виде символа ?. Чтобы проиллюстрировать разницу, рассмотрим следующий фрагмент HTML-разметки:

```
string html = "<i>By default</i> quantifiers are <i>greedy</i> creatures";
```

Предположим, что нужно извлечь две фразы, выделенные курсивом. Если мы запустим следующий код:

```
foreach (Match m in Regex.Matches (html, @"<i>.*</i>"))
    Console.WriteLine (m);
```

то результатом будет не два, а одно совпадение:

```
<i>By default</i> quantifiers are <i>greedy</i>
```

Проблема в том, что квантификатор `*` жадным образом повторяется настолько много раз, сколько может, перед обнаружением соответствия `</i>`. Таким образом, он поглощает первое вхождение `</i>`, останавливаясь только на финальном вхождении `</i>` (*последнее место*, где все еще обеспечивается совпадение).

Если сделать квантификатор ленивым, тогда он остановится в *первом* месте, после которого остаток выражения может дать совпадение:

```
foreach (Match m in Regex.Matches (html, @"<i>.*?</i>"))
    Console.WriteLine (m);
```

Вот результат:

```
<i>By default</i>
<i>greedy</i>
```

Утверждения нулевой ширины

Язык регулярных выражений позволяет размещать условия, которые должны удовлетворяться *до* или *после* совпадения, через *просмотр назад*, *просмотр вперед*, *привязки и границы слов*. Все вместе они называются *утверждениями нулевой ширины*, потому что они не увеличивают ширину (или длину) самого совпадения.

Просмотр вперед и просмотр назад

Конструкция `(?=expr)` проверяет, соответствует ли следующий за ней текст выражению `expr`, не включая `expr` в результат. Это называется *положительным просмотром вперед*. В приведенном ниже примере мы ищем число, за которым расположено слово `miles`:

```
Console.WriteLine (Regex.Match ("say 25 miles more", @"\d+\s(?=miles)"));
```

Вот вывод:

```
25
```

Обратите внимание, что слово `miles` не возвращается как часть результата, хотя оно требовалось для того, чтобы удовлетворить условие совпадения.

После успешного просмотра вперед поиск совпадения продолжается, как если бы предварительный просмотр никогда не выполнялся. Таким образом, если добавить к выражению конструкцию `.*`, как показано ниже:

```
Console.WriteLine (Regex.Match ("say 25 miles more", @"\d+\s(?=miles).*"));
то результатом будет 25 miles more.
```

Просмотр вперед может быть полезен для навязывания правил выбора сильных паролей. Предположим, что пароль должен иметь длину не менее шести символов и содержать, по крайней мере, одну цифру. С помощью просмотра задачу можно решить следующим образом:

```
string password = "...";
bool ok = Regex.IsMatch (password, @"^(?=.*\d).{6,}");
```

Здесь сначала осуществляется *просмотр вперед*, чтобы удостовериться в наличии цифры где-нибудь в строке. Если цифра обнаружена, тогда происходит возврат к позиции перед началом предварительного просмотра и производится проверка соответствия шести или более символам. (В разделе “Рецептурный справочник по регулярным выражениям” далее в главе мы приводим более существенный пример проверки паролей.)

Противоположностью является конструкция *отрицательного просмотра вперед*, т.е. (?!.expr). Она требует, чтобы совпадение *не* следовало за выражением expr. Приведенное далее выражение соответствует good, если только *позже* в строке не встречается however или but:

```
string regex = "(?i)good (?!.* (however|but))";
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("Good work! But...", regex)); // False
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("Good work! Thanks!", regex)); // True
```

Конструкция (?<=expr) обозначает *положительный просмотр назад* и требует, чтобы совпадению *предшествовало* указанное выражение. Противоположная конструкция, (?<!expr), обозначает *отрицательный просмотр назад* и требует, чтобы совпадению *не предшествовало* указанное выражение. Например, следующее выражение соответствует good, если только however не встречалось *ранее* в строке:

```
string regex = "(?i)(?<!however.*)good";
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("However good, we...", regex)); // False
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("Very good, thanks!", regex)); // True
```

Приведенные примеры можно было бы усовершенствовать за счет добавления *утверждений границ слов*, которые вскоре будут описаны.

Привязки

Привязки ^ и \$ соответствуют конкретной *позиции*. По умолчанию:

- ^ соответствует *началу строки*;
- \$ соответствует *концу строки*.



В зависимости от контекста символ ^ означает *привязку* или *отрицание класса символов*.

В зависимости от контекста символ \$ означает *привязку* или *маркер группы замены*.

Например:

```
Console.WriteLine (Regex.Match ("Not now", "^[Nn]o")); // No
Console.WriteLine (Regex.Match ("f = 0.2F", "[Ff]$")); // F
```

Если указать RegexOptions.Multiline или включить в выражение конструкцию (?m), то:

- символ ^ соответствует началу всей строки или *строки текста* (сразу после \n);
- символ \$ соответствует концу всей строки или *строки текста* (непосредственно перед \n).

С использованием символа \$ в многострочном (Multiline) режиме связана одна загвоздка: новая строка в Windows почти всегда обозначается с помощью комбинации \r\n, а не просто \n. Это значит, что для обеспечения полезности символа \$ в случае файлов Windows обычно придется искать совпадение также и с \r, применяя *положительный просмотр вперед*:

```
(?=\r?\$)
```

Положительный просмотр вперед гарантирует, что \r не станет частью результата. Показанный ниже код соответствует строкам, которые заканчиваются на ".txt":

```
string fileNames = "a.txt" + "\r\n" + "b.doc" + "\r\n" + "c.txt";
string r = @"^.+\.\txt(?=\r?\$)";
foreach (Match m in Regex.Matches (fileNames, r, RegexOptions.Multiline))
    Console.WriteLine (m + " ");
```

Вывод:

```
a.txt c.txt
```

Следующий код соответствует всем пустым строкам текста внутри строки s:

```
MatchCollection emptyLines = Regex.Matches (s, "^(?=\r?\$)",
    RegexOptions.Multiline);
```

Показанный далее код соответствует всем строкам текста, которые либо пусты, либо содержат только пробельные символы:

```
MatchCollection blankLines = Regex.Matches (s, "^\s*(?=\r?\$)",
    RegexOptions.Multiline);
```



Поскольку привязка соответствует позиции, а не символу, указание одной лишь привязки соответствует пустой строке:

```
Console.WriteLine (Regex.Match ("x", "$").Length); // 0
```

Границы слов

Утверждение границы слова \b дает совпадение, когда символы, допустимые в словах (\w), соседствуют с:

- символами, не допустимыми в словах (\W);
- началом/концом строки (^ и \$).

\b часто используется для соответствия целым словам:

```
foreach (Match m in Regex.Matches ("Wedding in Sarajevo", @"\b\w+\b"))
    Console.WriteLine (m);
```

Вывод:

```
Wedding
in
Sarajevo
```

Следующие операторы подчеркивают эффект от границы слова:

```
int one = Regex.Matches ("Wedding in Sarajevo", @"\bin\b").Count; // 1
int two = Regex.Matches ("Wedding in Sarajevo", @"\bin").Count; // 2
```

В приведенном далее выражении применяется *положительный просмотр вперед* для возврата слов, за которыми следуют символы (sic):

```
string text = "Don't loose (sic) your cool";
Console.WriteLine (Regex.Match (text, @"\b\w+\b\s(=?\(\sic\))")); // loose
```

Группы

Временами регулярное выражение удобно разделять на последовательности подвыражений, или *группы*. Например, рассмотрим следующее регулярное выражение, которое представляет телефонные номера в США, такие как 206-465-1918:

```
\d{3}-\d{3}-\d{4}
```

Предположим, что мы хотим разделить его на две группы: код зоны и локальный номер. Задачу можно решить, используя круглые скобки для *захвата* каждой группы:

```
(\d{3})-(\d{3}-\d{4})
```

Затем группы можно извлекать программно:

```
Match m = Regex.Match ("206-465-1918", @"(\d{3})-(\d{3}-\d{4})");
Console.WriteLine (m.Groups[1]);           // 206
Console.WriteLine (m.Groups[2]);           // 465-1918
```

Нулевая группа представляет полное совпадение. Другими словами, она имеет то же самое значение, что и свойство Value совпадения:

```
Console.WriteLine (m.Groups[0]);           // 206-465-1918
Console.WriteLine (m);                     // 206-465-1918
```

Группы являются частью самого языка регулярных выражений. Это означает, что вы можете ссылаться на группу внутри регулярного выражения. Синтаксис \n позволяет индексировать группу по ее номеру n в рамках выражения. Например, выражение (\w)\e\1 дает совпадения для deed и reer. В следующем примере мы ищем в строке все слова, начинающиеся и заканчивающиеся на ту же самую букву:

```
foreach (Match m in Regex.Matches ("pop pope peep", @"\b(\w)\w+\1\b"))
    Console.WriteLine (m + " ");           // pop peep
```

Скобки вокруг \w указывают механизму регулярных выражений на необходимость сохранения подсовпадений в группе (одиночной буквы в данном случае), поэтому их можно будет применять позже. В дальнейшем на данную группу можно ссылаться с использованием \1, что означает первую группу в выражении.

Именованные группы

В длинном или сложном выражении работать с группами удобнее по *именам*, а не по индексам. Ниже приведен переписанный предыдущий пример, в котором применяется группа по имени 'letter':

```

string regEx =
    @"^b" + // граница слова
    @"(?'letter'\w)" + // соответствует первой букве;
                        // назовем группу 'letter'
    @"\w+" + // соответствует промежуточным буквам
    @"\k'letter'" + // соответствует последней букве,
                     // отмеченной как 'letter'
    @"$"; // граница слова

foreach (Match m in Regex.Matches ("bob pope peep", regEx))
    Console.WriteLine (m + " "); // bob peep

```

Вот как назначить имя захваченной группе:

(?'имя-группы' выражение-группы) или (?<имя-группы>выражение-группы)

А вот как ссылаться на группу:

\k'имя-группы' или \k<имя-группы>

В следующем примере производится сопоставление для простого (не вложенного) элемента XML/HTML за счет поиска начального и конечного узлов с совпадающими именами:

```

string regFind =
    @"<(?'tag'\w+?) .*>" + // соответствует первому дескриптору;
                            // назовем группу 'tag'
    @"(?'text'.*)" + // соответствует текстовому содержимому;
                      // назовем группу 'text'
    @"</\k'tag'>"; // соответствует последнему дескриптору,
                     // отмеченному как 'tag'

Match m = Regex.Match ("

# hello</h1>", regFind); Console.WriteLine (m.Groups ["tag"]); // h1 Console.WriteLine (m.Groups ["text"]); // hello


```

Анализ всех возможных вариаций в структуре XML, таких как вложенные элементы, является более сложным. Механизм регулярных выражений .NET имеет расширение под названием “соответствующие сбалансированные конструкции”, которое может помочь в обработке вложенных дескрипторов — информация о нем доступна в Интернете, а также в книге Джейфри Фридла *Mastering Regular Expressions* (O'Reilly).

Замена и разделение текста

Метод `RegEx.Replace` работает подобно `string.Replace` за исключением того, что использует регулярное выражение.

Следующий код заменяет строку `cat` строкой `dog`.

В отличие от `string.Replace` слово `catapult` не будет изменено на `dogapult`, потому что совпадения ищутся по границам слов:

```

string find = @"\bcat\b";
string replace = "dog";
Console.WriteLine (Regex.Replace ("catapult the cat", find, replace));

```

Вывод:

`catapult the dog`

Строка замены может ссылаться на исходное совпадение посредством подстановочной конструкции \$0. В следующем примере числа внутри строки помещаются в угловые скобки:

```
string text = "10 plus 20 makes 30";
Console.WriteLine (Regex.Replace (text, @"\d+", @"<$0>"));
```

Вывод:

```
<10> plus <20> makes <30>
```

Обращаться к захваченным группам можно с помощью конструкций \$1, \$2, \$3 и т.д. или \${имя} для именованных групп. Чтобы продемонстрировать, когда это может быть удобно, вспомним регулярное выражение из предыдущего раздела, соответствующее простому элементу XML. За счет перестановки групп мы можем сформировать выражение замены, которое перемещает содержимое элемента в атрибут XML:

```
string regFind =
    @"<(?'tag'\w+?) .*>" +      // соответствует первому дескриптору;
                                         // назовем группу 'tag'
    @"(?'text'.*)" +                  // соответствует текстовому содержимому;
                                         // назовем группу 'text'
    @"</\k'tag'>";                 // соответствует последнему дескриптору,
                                         // отмеченному как 'tag'

string regReplace =
    @"<$tag>" +                   // <tag
    @"value="" " +                  // value="
    @"${text}" +                    // text
    @"""/>";                      // "/>

Console.Write (Regex.Replace ("<msg>hello</msg>", regFind, regReplace));
```

Вот результат:

```
<msg value="hello"/>
```

Делегат MatchEvaluator

Метод Replace имеет перегруженную версию, принимающую делегат MatchEvaluator, который вызывается для каждого совпадения. Это позволяет поручить построение содержимого строки замены коду C#, если язык регулярных выражений в такой ситуации оказывается недостаточно выразительным. Например:

```
Console.WriteLine (Regex.Replace ("5 is less than 10", @"\d+",
    m => (int.Parse (m.Value) * 10).ToString ()) );
```

Вывод:

```
50 is less than 100
```

В рецептурном справочнике мы покажем, как применять MatchEvaluator с целью защиты символов Unicode специально для HTML-разметки.

Разделение текста

Статический метод `Regex.Split` представляет собой более мощную версию метода `string.Split` с регулярным выражением, обозначающим образец разделителя. В следующем примере мы разделяем строку, в которой разделителем считается любая цифра:

```
foreach (string s in Regex.Split ("a5b7c", @"\d"))
    Console.WriteLine (s + " "); // a b c
```

Результат не содержит сами разделители. Тем не менее, включить разделители можно, поместив выражение внутрь *положительного просмотра вперед*. Следующий код разбивает строку в верблюжьем стиле на отдельные слова:

```
foreach (string s in Regex.Split ("oneTwoThree", @"(?=[A-Z])"))
    Console.WriteLine (s + " "); // one Two Three
```

Рецептурный справочник по регулярным выражениям

Рецепты

Соответствие номеру карточки социального страхования или телефонному номеру в США

```
string ssNum = @"\d{3}-\d{2}-\d{4}";
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("123-45-6789", ssNum)); // True
string phone = @"(?x)
  (\d{3}[-\s] | \(\d{3}\)\s?)?
  \d{3}[-\s]?
  \d{4}";
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("123-456-7890", phone)); // True
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("(123) 456-7890", phone)); // True
```

Извлечение пар "имя = значение" (по одной в строке текста)

Обратите внимание на использование в самом начале директивы `(?m)`:

```
string r = @"(?m)^[\s*('name'\w+)\s*=\s*('value'.*)\s*(?=\r?\$)";
```

string text =
 @"id = 3
 secure = true
 timeout = 30";

foreach (Match m in Regex.Matches (text, r))
 Console.WriteLine (m.Groups["name"] + " is " + m.Groups["value"]);

Вывод:

```
id is 3 secure is true timeout is 30
```

Проверка сильных паролей

Следующий код проверяет, что пароль состоит минимум из шести символов и включает цифру, символ или знак пунктуации:

```
string r = @"(?x)^(?=.*(\d|\p{P}|\p{S})).{6,}";  
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("abc12", r)); // False  
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("abcdef", r)); // False  
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("ab88yz", r)); // True
```

Строки текста, содержащие, по крайней мере, 80 символов

```
string r = @"(?m)^.{80,}(?=^$)";  
string fifty = new string ('x', 50);  
string eighty = new string ('x', 80);  
string text = eighty + "\r\n" + fifty + "\r\n" + eighty;  
Console.WriteLine (Regex.Matches (text, r).Count); // 2
```

Разбор даты/времени (N/N/N H:M:S AM/PM)

Показанное ниже выражение поддерживает разнообразные числовые форматы дат и работает независимо от того, где указан год — в начале или в конце. Директива (?x) улучшает читабельность, разрешая применение пробельных символов; директива (?i) отключает чувствительность к регистру символов (для необязательного указателя AM/PM). Затем к компонентам совпадения можно обращаться через коллекцию Groups:

```
string r = @"(?x)(?i)  
(\d{1,4}) [./-]  
(\d{1,2}) [./-]  
(\d{1,4}) [\sT]  
(\d+):(\d+):(\d+) \s? (A|.?M|.?|P|.?M|.?)?";  
  
string text = "01/02/2021 3:30:55 PM";  
  
foreach (Group g in Regex.Match (text, r).Groups)  
    Console.WriteLine (g.Value + " ");
```

Вывод:

01/02/2021 3:30:55 PM 01 02 2021 3 30 55 PM

(Разумеется, выражение не проверяет корректность даты/времени.)

Соответствие римским числам

```
string r =  
    @"(?i)\bm*"  
    +  
    @"(d?c{0,3}|c[dm])"  
    +  
    @"(l?x{0,3}|x[lc])"  
    +  
    @"(v?i{0,3}|i[vx])"  
    +  
    @"\b";  
  
Console.WriteLine (Regex.IsMatch ("MCMLXXXIV", r)); // True
```

Удаление повторяющихся слов

Здесь мы захватываем именованную группу dupe:

```
string r = @"(?<dupe'\w+)>\w\k'dupe'";  
string text = "In the the beginning...";  
Console.WriteLine (Regex.Replace (text, r, "${dupe}"));
```

Вывод:

```
In the beginning
```

Подсчет слов

```
string r = @"\b(\w|[-])+\b";  
string text = "It's all mumbo-jumbo to me";  
Console.WriteLine (Regex.Matches (text, r).Count); // 5
```

Соответствие идентификатору GUID

```
string r =  
    @"(?i)\b"  
    +  
    @"[0-9a-fA-F]{8}\-" +  
    @"[0-9a-fA-F]{4}\-" +  
    @"[0-9a-fA-F]{4}\-" +  
    @"[0-9a-fA-F]{4}\-" +  
    @"[0-9a-fA-F]{12}" +  
    @"\b";  
  
string text = "Its key is {3F2504E0-4F89-11D3-9A0C-0305E82C3301}.  
Console.WriteLine (Regex.Match (text, r).Index); // 12
```

Разбор дескриптора XML/HTML

Класс Regex удобен при разборе фрагментов HTML-разметки — особенно, когда документ может быть сформирован некорректно:

```
string r =  
    @"<(?<'tag'\w+?) .*>" + // соответствует первому дескриптору;  
                                // назовем группу 'tag'  
    @"(?<'text'.*)"         + // соответствует текстовому содержимому;  
                                // назовем группу 'text'  
    @"</\k'tag'>";          // соответствует последнему дескриптору,  
                                // отмеченному как 'tag'  
  
string text = "<h1>hello</h1>";  
Match m = Regex.Match (text, r);  
Console.WriteLine (m.Groups ["tag"]); // h1  
Console.WriteLine (m.Groups ["text"]); // hello
```

Разделение на слова в верблюжьем стиле

Решение требует положительного просмотра вперед, чтобы включить разделители в верхнем регистре:

```
string r = @"(?=[A-Z])";  
foreach (string s in Regex.Split ("oneTwoThree", r))  
    Console.Write (s + " "); // one Two Three
```

Получение допустимого имени файла

```
string input = "My \"good\" <recipes>.txt";
char[] invalidChars = System.IO.Path.GetInvalidFileNameChars();
string invalidString = Regex.Escape (new string (invalidChars));
string valid = Regex.Replace (input, "[" + invalidString + "]", "");
Console.WriteLine (valid);
```

Вывод:

```
My good recipes.txt
```

Защита символов Unicode для HTML

```
string htmlFragment = "© 2007";
string result = Regex.Replace (htmlFragment, @"\u0080-\uFFFF",
    m => @"#" + ((int)m.Value[0]).ToString() + ";");
Console.WriteLine (result); // © 2007
```

Преобразование символов в строке запроса HTTP

```
string sample = "C%23 rocks";
string result = Regex.Replace (
    sample,
    @"% [0-9a-f][0-9a-f]",
    m => ((char) Convert.ToByte (m.Value.Substring (1), 16)).ToString(),
    RegexOptions.IgnoreCase
);
Console.WriteLine (result); // C# rocks
```

Разбор поисковых терминов Google из журнала веб-статистики

Это должно использоваться в сочетании с предыдущим примером преобразования символов в строке запроса:

```
string sample =
    "http://google.com/search?hl=en&q=greedy+quantifiers+regex&btnG=Search";
Match m = Regex.Match (sample, @"(?=<google\..+search\?.*q=).+?(?=(&|$))");
string[] keywords = m.Value.Split (
    new[] { '+' }, StringSplitOptions.RemoveEmptyEntries);
foreach (string keyword in keywords)
    Console.Write (keyword + " "); // greedy quantifiers regex
```

Справочник по языку регулярных выражений

В табл. 25.2–25.12 представлена сводка по грамматике и синтаксису регулярных выражений, которые поддерживаются в реализации .NET.

Таблица 25.2. Управляющие символы

Управляющая последовательность	Описание	Шестнадцатеричный эквивалент
\a	Звуковой сигнал	\u0007
\b	Забой	\u0008
\t	Табуляция	\u0009
\r	Возврат каретки	\u000A
\v	Вертикальная табуляция	\u000B
\f	Перевод страницы	\u000C
\n	Новая строка	\u000D
\e	Отмена	\u001B
\nnn	ASCII-символ nnn в восьмеричной форме (например, \n052)	
\xnn	ASCII-символ nn в шестнадцатеричной форме (например, \x3F)	
\c1	Управляющий ASCII-символ 1 (например, \cG для <Ctrl+G>)	
\unnnn	Unicode-символ nnnn в шестнадцатеричной форме (например, \u07DE)	
\символ	Непреобразуемый символ	

Специальный случай: внутри регулярного выражения комбинация \b означает границу слова за исключением ситуации, когда находится в наборе [], где \b означает символ забоя.

Таблица 25.3. Наборы символов

Выражение	Описание	Инверсия ("не")
[abcdef]	Соответствует одиночному символу в списке	[^abcdef]
[a-f]	Соответствует одиночному символу в диапазоне	[^a-f]
\d	Соответствует десятичной цифре То же самое, что и [0-9]	\D
\w	Соответствует символу, допустимому в словах (по умолчанию варьируется согласно CultureInfo.CurrentCulture; например, в английском языке это то же самое, что и [a-zA-Z_0-9])	\W
\s	Соответствует пробельному символу То же самое, что и [\n\r\t\f\v]	\S
\p{категория}	Соответствует символу в указанной категории (табл. 25.6)	\P
.	(Стандартный режим.) Соответствует любому символу кроме \n	\n
.	(Режим SingleLine.) Соответствует любому символу	\n

Таблица 25.4. Категории символов

Категория	Описание
\p{L}	Буквы
\p{Lu}	Буквы в верхнем регистре
\p{Ll}	Буквы в нижнем регистре
\p{N}	Числа
\p{P}	Знаки пунктуации
\p{M}	Диакритические знаки
\p{S}	Символы
\p{Z}	Разделители
\p{C}	Управляющие символы

Таблица 25.5. Квантификаторы

Квантификатор	Описание
*	Ноль или больше совпадений
+	Одно или больше совпадений
?	Ноль или одно совпадение
{n}	В точности n совпадений
{n,}	По меньшей мере, n совпадений
{n, m}	Количество совпадений между n и m

К любому квантификатору можно применить суффикс ?, чтобы сделать его ленивым, а не жадным.

Таблица 25.6. Подстановки

Выражение	Описание
\$0	Подстановка совпадающего текста
\$номер-группы	Подстановка индексированного номера группы внутри совпадающего текста
\${имя-группы}	Подстановка текстового имени группы внутри совпадающего текста

Подстановки указываются только внутри образца замены.

Таблица 25.7. Утверждения нулевой ширины

Выражение	Описание
^	Начало строки (или строчки текста в многострочном режиме)
\$	Конец строки (или строчки текста в многострочном режиме)
\A	Начало строки (многострочный режим игнорируется)
\z	Конец строки (многострочный режим игнорируется)
\Z	Конец строчки текста или всей строки
\G	Место начала поиска
\b	На границе слова
\B	Не на границе слова
(?=expr)	Продолжать поиск совпадения, только если выражение <i>expr</i> дает совпадение справа (<i>положительный просмотр вперед</i>)
(?!expr)	Продолжать поиск совпадения, только если выражение <i>expr</i> не дает совпадение справа (<i>отрицательный просмотр вперед</i>)
(?<=expr)	Продолжать поиск совпадения, только если выражение <i>expr</i> дает совпадение слева (<i>положительный просмотр назад</i>)
(?<!expr)	Продолжать поиск совпадения, только если выражение <i>expr</i> не дает совпадение слева (<i>отрицательный просмотр назад</i>)
(?>expr)	Подвыражение <i>expr</i> дает совпадение один раз, и не было возврата назад

Таблица 25.8. Конструкции группирования

Синтаксис	Описание
(expr)	Захват давшего совпадение выражения <i>expr</i> в индексированную группу
(?номер)	Захват совпадающей подстроки в группу с указанным номером
(?'имя')	Захват совпадающей подстроки в группу с указанным именем
(?'имя1-имя2')	Отменить определение <i>имя2</i> и сохранить интервал и текущую группу в <i>имя1</i> ; если <i>имя2</i> не определено, тогда поиск совпадения возвращается назад
(?:expr)	Незахватываемая группа

Таблица 25.9. Обратные ссылки

Синтаксис	Описание
\index	Ссылка на предыдущую захваченную группу по <i>индексу</i>
\k<имя>	Ссылка на предыдущую захваченную группу по <i>имени</i>

Таблица 25.10. Перестановки

Синтаксис	Описание
	Логическое “ИЛИ”
(? (expr) yes no)	Соответствует yes, если выражение expr дает совпадение; в противном случае соответствует по (конструкция по является необязательной)
(? (пате) yes no)	Соответствует yes, если именованная группа пате имеет совпадение; в противном случае соответствует по (конструкция по является необязательной)

Таблица 25.11. Вспомогательные конструкции

Синтаксис	Описание
(?#комментарий)	Встроенный комментарий
#комментарий	Комментарий до конца строки (работает только в режиме IgnorePatternWhitespace)

Таблица 25.12. Параметры регулярных выражений

Параметр	Описание
(?i)	Соответствие, нечувствительное к регистру символов (регистр символов “игнорируется”)
(?m)	Многострочный режим; изменяет ^ и \$ так, что они соответствуют началу и концу любой строки текста
(?n)	Захватывает только явно именованные или пронумерованные группы
(?c)	Компилирует в IL
(?s)	Однострочный режим; изменяет значение точки (.) так, что она соответствует любому символу
(?x)	Устраняет из образца ненужные пробельные символы
(?r)	Поиск справа налево; не может быть указан где-то посередине

Предметный указатель

А

Адаптер
двоичный, 771
потоков, 765; 772
текстовый, 766
Алгоритм
Рэндала, 939
сжатия Brotli, 774
хеширования, 937
Аннотации, 596
Аргумент, 68
Архитектура
исполняющей среды, 38
потоковая, 749
сетевая, 797; 798
Асинхронность, 324
Атомарность, 955
Атрибут, 282; 324
извлечение атрибутов во время выполнения, 893
псевдоспециальные, 890
специальный, 890
Аутентификация, 808
через заголовки, 809

Б

Балансировка нагрузка, 1007
Барьер, 982
Безопасность, 789
Безопасность к типам
во время выполнения, 36
на этапе компиляции, 36
Библиотека
базовых классов, 38
базовых классов (BCL), 39
параллельных задач, 993
Avalonia, 41
BCL, 322
.NET BCL, 442
Блокирование, 687; 955; 959
асинхронное, 745
вложенное, 955
монопольное, 950
немонопольное, 950; 965
с двойным контролем, 984
Блокировка, 690; 953
объектов чтения/записи, 968
рекурсия блокировок, 972
Блок операторов, 68; 226

В

Ввод-вывод, 324; 687; 749
файловый, 792
Ветвление, 899
Взаимоблокировка, 956
Виртуализация, 792
Выполнение, 495
отложенное, 509
Выражение, 114
запросов, 36; 472
коллекции, 1042
первичное, 115
пустое, 115
регулярное, 1077
справочник по языку регулярных выражений, 1093

Г

Генератор
дополнительный, 533
исходного кода, 162
Глобализация, 375
Группа, 1087
именованная, 1087
Группирование, 550

Д

Данные
потоки данных, 324; 749
Декартово произведение, 534
Деконструктор, 60; 146
Делегат, 36; 211
групповой, 213
Дерево выражения, 513; 514
Дескриптор
ожидания событий, 973
Диапазон, 53; 99
Дизассемблер, 916
Динамическое связывание, 63; 287; 1072
Директива
global using, 133
using, 68; 133
using static, 134
Директивы препроцессора, 310
Диспетчеризация
множественная, 927
одиночная, 927

З

Загрузка
ленивая, 508
Задача, 745
комбинаторы задач, 741

отмена задач, 1021
параллелизм задач, 1018
Замыкание, 228
Запись, 36; 51; 156; 265; 753
Запрос, 323; 576
внешний, 483
интерпретируемый, 492
упаковка запросов, 488
Зацикливание, 687
Зондирование
стандартное, 850

И

Идентификатор, 70
URI, 801
Изменение
неразрушающее, 451
Имя
скрытие имен, 135
типа, 868
Индекс, 53; 99
Индексаторы, 154; 1072
Индексация, 422
Инициализатор
индекса, 62
модуля, 159
объекта, 64; 147
свойства, 151
Инициализация
ленивая, 982
Инкапсуляция, 35
Интерполяция строк, 96
Интерфейс, 35; 184; 188; 869
COM, 1068
EqualityComparer, 455
ICollection, 416
ICollection<T>, 416
IComparable, 398
IComparer, 457
IDictionary, 439
IDictionary< TKey, TValue >, 437
IDisposable, 410
IEnumerator, 408
IEnumerator< T >, 410
IEqualityComparer, 455
 IList, 417
 IList< T >, 417
многоплатформенных приложений
(MAUI), 41
Инфраструктура
PLINQ, 1006
WPF, 328

Исключение, 704
генерация исключений, 238
обработка исключений, 693; 901
отправка исключений, 731
специфических типов, 235
Исполняющая среда, 39
Итератор, 244; 245; 412

К

Канал
анонимный, 760; 763
именованный, 760
Квантификатор, 566; 1077; 1082
жадный, 1083
ленивый, 1083
Класс, 139
абстрактный, 169
атрибутов, 283
маршализация классов, 1054
словарей, 438
статический, 160
AggregateException, 1029
ArrayList, 428
Collection< T >, 412
Comparer, 457
Dictionary, 439; 440
HybridDictionary, 442
ListDictionary, 442
OrderedDictionary, 441
Клиент
обогащенный, 326
тонкий, 326
Ключевое слово, 70
контекстное, 71
await, 716
base, 170
into, 487
let, 491
public, 75
stackalloc, 305
Ключ сортировки, 470
Ковариантность, 205; 207; 218
Код
динамическая генерация кода, 894
Кодировка
текста, 341
символов, 769
UTF-8, 342
UTF-16, 342; 770
UTF-32, 342
Коллекция, 322; 407
выражения коллекций, 1042
замороженная, 453
настраиваемая, 444
неизменяемая, 450

Комбинаторы
задач, 741
специальные, 743

Комментарии, 72

Компаратор, 549
эквивалентности, 436

Компилятор
C#, 68
Roslyn, 326

Компиляция, 68
оперативной (JIT), 38
ранняя (AOT), 38
условная, 659

Конструирование, 422

Конструктор, 171; 908
копирования, 270
неоткрытый, 145
неявный, 145
основной, 155; 274
перегрузка конструкторов, 144
стандартный, 179
статический, 159
экземпляров, 144

Контравариантность, 208; 218

Конфигурирование подключения, 500

Копирование, 427

Кортежи, 60; 260
деконструирование кортежей, 264

Криптография, 325; 935

Куча, 103; 104

Л

Литерал, 68; 71
вещественный, 84
двоичный, 58
необработанный строковый, 45
целочисленный, 84

Локальные переменные
неявно типизированные, 64

Лямбда-выражение, 36; 64; 226; 468; 489; 692
асинхронное, 727
статическое, 229

М

Манифест
приложения, 791; 825
сборки, 824

Маркер, 617

Маршализация
классов, 1054
параметров, 1056
типов, 1052

Массив, 98; 206
встроенный, 45
зубчатый, 101
многомерный, 100

Метаданные, 38; 865

Метка, 130

Метод, 36; 142; 161
анонимный, 232
виртуальный, 444
деконструирующий, 146
локальный, 59; 142
обобщенный, 198; 884
перегрузка методов, 143
преобразования, 555
расширяющий, 64; 256
сжатый до выражения, 142
частичный
расширенный, 162

экземпляра, 213

AsEnumerable, 497

AsQueryable, 512

AsTask, 730

BinarySearch, 424

ConstrainedCopy, 427

Contains, 566

DefineMethod, 905

Element, 578

Empty, 567

FindAll, 425

FromAsync, 746

GetKeyForItem, 447

IndexOf, 425

LastIndexOf, 425

Nodes, 576

Range, 568

Repeat, 568

SetValue, 581

UnionBy, 555

UnionWith, 436

Многопоточность
расширенная, 325; 949

Модель
конфигурирование, 500
DOM-, 569
выражения, 513

Модификатор
асинхронного кода, 142
доступа, 142; 181
наследования, 142
неуправляемого кода, 142
обязательный, 878
статический, 142
частичного метода, 142
in, 109
out, 107
params, 109
ref, 107

Модуль, 826
инициализатор модуля, 159
Мультисловарь, 544

Н

Набор, 428
символов, 341; 1081

Навигация, 576

Нарезание, 1040

Наследование, 35; 163; 171

О

Обобщения, 196
Общязыковая исполняющая среда, 37; 38
Объект
 блокировки объектов чтения/записи, 968
 выталкивание объекта из стека, 174
 заталкивание объекта в стек, 174
 инициализаторы объектов, 147
 корневой, 639
 отслеживание объектов, 504
 ожидания (awaiter), 706
 Lookup, 544
Ограничение, 201
 базового класса, 201
 интерфейса, 201
 конструктора без параметров, 202
 неуправляемого кода, 202

Округление, 372

Оператор, 121

 верхнего уровня, 50; 69
 выбора, 123
 выражения, 122
 итераций, 128
 объявления, 122
 смешанный, 131
 перехода, 130
 foreach, 410
 try, 233
 fixed, 304
 goto, 130
 lock, 951
 return, 131
 throw, 131
 using, 131; 631

Операция, 71; 114

 арифметическая, 86
 ассоциативность операций, 115
 запроса, 464
 левоассоциативная, 116
 над множествами, 554
 над элементами, 559
 перегрузка операций, 296
 полиморфная, 301

правоассоциативная, 116

приоритеты операций, 115

сравнения, 92

указателя на член, 304

условная (тернарная), 92; 93

эквивалентности, 276

Aggregate, 563

All, 567

Any, 566

AsEnumerable, 558

AsQueryable, 558

C#, 117

Concat, 554

Contains, 566

DefaultIfEmpty, 561

Distinct, 525

ElementAt, 560

Except, 555

GroupBy, 550

GroupJoin, 543

Intersect, 555

Join, 540; 545

LINQ, 517

MinBy, 560

MaxBy, 560

OrderBy, 548

SequenceEqual, 567

SelectMany, 535

ToArray, 558

ToDictionary, 558

ToHashSet, 558

ToList, 558

ToLookup, 558

Where, 522

Zip, 547

Оптимизация, 732

Очереди, 428

П

Память

совместно используемая, 793; 1061

совместно используемая процессами, 794

Параллелизм, 324; 726

задач, 1018

Параметр, 103; 106

атрибута, 283

маршализация параметров, 1056

необязательный, 110

совместимость параметров, 218

Перегрузка, 174

конструкторов, 144

операций, 296; 298

Переменная, 103
генерация локальных переменных, 898
диапазона, 474
захваченные, 228; 478
локальные ссылочные, 58
шаблонные, 59
Перечисление, 191; 382; 385; 408; 423
преобразование перечислений, 192
BindingFlags, 883
Перечислитель, 242
однонаправленный, 1046
Планировщик задач, 1027
Платформа UWP, 330
Подзапрос, 482; 485; 489
Подключение
конфигурирование, 500
Подписание, 945
Подписчики, 219
Подпись Authenticode, 831
Поиск, 424; 754
Поле, 139
очистка полей, 635
Полиморфизм, 35; 164
статический, 190; 300
Последовательность, 463
Посредник, 444; 449
Построители, 452
Поток, 684; 701
адаптер потоков, 772
адаптеры потоков, 765
асинхронные потоки, 728
барьер выполнения потоков, 981
безопасность потоков, 690; 959
вызывающий, 957
данных
асинхронный, 57
использование потоков, 751
локальное хранилище потока, 985
с декораторами, 750
с опорными хранилищами, 750
создание потока, 684
со сжатием, 773
Предикат, 468
Преобразование, 377
булевское, 91
динамическое, 292
между типами с плавающей точкой, 85; 86
между целочисленными типами, 85
распаковывающее, 166
символьное, 94
специальное, 166; 204
ссылочное, 164; 176
упаковывающее, 176
числовое, 176

Преобразователи типов, 374
Префикс, 591; 595; 608
Приведение
вверх, 164
вниз, 165
Привязки, 1085
Приложение
манифест приложения, 825
UWP, 329
Присваивание
деконструирующее, 147
Программирование
асинхронное, 712
динамическое, 325; 921
параллельное, 325; 993
функциональное, 266
Продолжение, 705; 1024
асинхронное, 63
Проектирование
в конкретные типы, 530
индексированное, 527
Производительность, 957
Прокси-сервер, 807
Пространства имен, 67; 132; 590; 608
с областью видимости на уровне файлов, 48
Протокол
BitTorrent, 817
TCP, 817
Пул потоков, 699
P
Распаковка (unboxing), 175
Распознавание, 174
Реализация
явная, 185
Реентерабельность, 720
Рекурсия блокировок, 972
Ретранслятор, 219
Рефакторинг, 68
Рефлексия, 39; 324; 865; 873
сборок, 888
C
Сборка (assembly), 38, 68; 324; 823; 895
дружественная, 183
загрузка сборок, 844
имена сборок, 829
манифест сборки, 824
мусора
автоматическая, 637
однофайловая, 826
распознавание сборок, 846
рефлексия сборок, 888
ссылочная, 321
portable executable (PE), 823

Сбрасывание, 755
Свойства, 36; 149
автоматические, 65; 151
вычисляемые, 150
допускающие только инициализацию, 878
инициализаторы свойств, 151
сжатые до выражений, 151
только для чтения, 150

Связывание
динамическое, 63; 287; 865
специальное, 289
статическое, 880
языковое, 290

Семафор, 965
асинхронный, 967

Сериализация, 283; 326; 573

Сжатие, 780

Сигнализация, 950

Сигнатура, 142; 906

Символ, 93
кодировки символов, 769

Синхронизация, 950

Система Authenticode, 832

Словарь, 436
отсортированный, 442
классы словарей, 438

Слой
прикладной, 38; 39

События, 36; 219

Соединение
перекрестное, 534

Сопоставления, 549

Сортировка, 425

Списки, 428

Справочник по языку регулярных выражений, 1093

Сравнение
структурное, 460

Среда
.NET Framework, 41

Средства доступа только для инициализации, 51

Ссылка this, 149

Стек, 103; 174; 428
вычислений, 896

Строка, 93
запроса, 810
интерполяция строк, 62; 96
конструирование строк, 333
объединение строк, 336
пустая (null), 333
разделение строк, 336
сравнение строк, 337
стандартная форматная, 364
UTF-8, 45; 97

Структура, 178
маршализация структур, 1054
сырьевая, 180
типа записей, 49
BigInteger, 378
Complex, 380
Guid, 386
Half, 379
Utf8JsonReader, 618

Счетчик производительности, 673
чтение данных счетчика, 675

Т

Таблица
дочерняя, 537
радужная, 939
родительская, 537

Тайм-аут, 755

Таймеры, 653; 989
многопоточные, 990
однопоточные, 992

Текст
кодировка текста, 341

Тестирование, 376

Технология
Blazor, 37
COM, 1068
P/Invoke, 1051

Тип, 35
активизация типов, 866
анонимный, 259; 490
базовый, 372; 869
булевский, 82; 91
вложенный, 195
возвращаемый
ковариантный, 168
делегата, 211
допускающий null, 56; 81; 248
закрытый, 197
имена типов, 868
маршализация типов, 1052
обобщенный, 196
закрытый, 873
объектный, 82
открытый, 197
преобразователи типов, 374
производный, 168
символьный (char), 82; 331
системный, 322
сырьевый, 80
строковый (string), 82; 94; 333
унификация типов, 382
унифицированная система типов, 35
частичный, 161
числовой, 82

Типизация
стatischeкая, 36
Трассировки, 679

У

Указатель, 303
на функцию, 52; 308; 1057
void, 306
Упаковка (boxing), 175; 188
Управляющие последовательности, 93

Ф

Файл
безопасность файлов, 781
проекта, 69
.resources, 836; 838
.resx, 837
Tar, 777
ZIP-, 776
Фильтр
исключений, 62; 236
Фильтрация
индексированная, 523
Финализаторы, 160; 639
Флаг HideBySig, 906
Формат
JSON, 616
Форматирование, 358
смешанное, 361
Функция, 294
асинхронная, 57; 722
виртуальная, 167
запечатывание функций, 170
сжатая до выражения, 62; 142

Х

Хеширование, 935; 937
алгоритм хеширования, 937
паролей, 939
Хранилище
опорное, 749

Ц

Центр сертификации (СА), 832
Цикл
do-while, 128
for, 129
while, 128
Цифровой сертификат сайта, 946
Цифровая подпись, 947

Ч

Числовые суффиксы, 84
Член
анонимный вызов членов обобщенного интерфейса, 884
Чтение, 753

Ш

Шаблон, 166
асинхронный, 736
на основе событий, 746
константы, 278
кортежа, 279
позиционный, 56
реляционный, 51; 278
свойства, 56; 277; 280
списка, 46; 282
типа, 166; 277
устаревший, 745
APM, 745
Шифрование, 780
в памяти, 941
симметричное, 935; 939
с открытым ключом, 935; 945

Э

Экземпляр, 213
Элемент, 463

Я

Язык
безопасный к типам, 36
интегрированных запросов (LINQ), 463
промежуточный, 38
строго типизированный, 37
управляемый, 38
PLINQ, 995

C# 12

Справочник

В этом уже ставшем бестселлером руководстве читатель найдет все необходимые ответы на разнообразные вопросы по языку C# 12 или библиотекам .NET 8. Язык C# обладает замечательной гибкостью и широким размахом, но такое непрекращающееся развитие означает, что по-прежнему есть многие вещи, которые предстоит изучить. В соответствии с традициями справочников O'Reilly это основательно обновленное издание будет наилучшим однотомным источником сведений о языке C#, доступным на сегодняшний день. Организованное вокруг концепций и сценариев использования, новое издание книги снабдит программистов средней и высокой квалификации лаконичным планом получения глубоких знаний по языку C#, среде CLR и основным библиотекам .NET без длинных вступлений и раздутых примеров.

- Освойте все аспекты языка C#, от синтаксиса и переменных до таких сложных тем, как указатели, записи, замыкания и шаблоны
- Тщательно исследуйте LINQ с помощью трех глав, специально посвященных этой теме
- Узнайте о параллелизме и асинхронности, расширенной многопоточной обработке и параллельном программировании
- Научитесь работать с функциональными средствами .NET, включая регулярные выражения, взаимодействие с сетью, сборки, промежутки, криптографию и рефлексию

Категория: программирование

Предмет рассмотрения: C# / Microsoft .NET

Уровень: для пользователей средней и высокой квалификации

ISBN 978-5-907705-47-0

24045

9 785907 705470

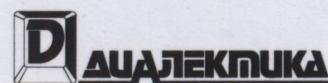
"Одна из немногих книг, которые я держу на столе в качестве быстрого справочника."

Скотт Гатри, Microsoft

"Как новички, так и эксперты найдут здесь все новейшие приемы программирования на C#."

Эрик Липперт,
Комитет по стандартам C#

Джозеф Албахари —
создатель LINQPad и автор книг
C# 10 in a Nutshell
и *C# 12 Pocket Reference*.



<http://www.williamspublishing.com>

<http://oreilly.com>