

- C++11, C++14, C++17
- Атрибуты
 - C++11
 - C++14
 - C++17
- Lambda
 - C++11
 - C++14
 - C++17
- POD-type
- auto/decltype
 - C++11
 - **Альтернативный синтаксис шаблонных функций**
 - C++14
- Literals
 - C++11
 - **Строковые литералы**
 - **Пользовательские литералы**
 - C++14
 - **Строковый литерал**
 - **Бинарные литералы**
 - **Разделители числовых литералов**
 - **STL литералы**
- Initialization
 - C++11
 - **Универсальная инициализация**
 - **std::initializer_list**
 - C++14
 - **Aggregate initialization with default member initializer**
 - C++17
 - **auto + std::initializer_list**
 - **Агрегатная инициализация базового класса**
- constexpr
 - C++11
 - C++14
 - C++17
- Шаблоны
 - C++11
 - **Вариативные шаблоны (Variadic template)**
 - **Extern templates**
 - C++14
 - **Шаблон переменной (Variable template)**
 - C++17
 - **Выведение типов шаблонных аргументов**
 - **template auto**
 - **Fold expressions (свертка функций)**

- **constexpr if**
- Спецификаторы
 - **'default' + 'deleted' specifiers**
 - **'override' + 'final' specifiers**
- Небольшие нововведения
 - C++11
 - **Move semantics**
 - **noexcept**
 - **Range based for cycle**
 - **Delegate constructors**
 - **Default values for non-static class members**
 - **nullptr**
 - **enum class**
 - **enum underlying type**
 - **Explicit cast operators**
 - **Relaxed rules for unions**
 - **static_assert**
 - **alignof, alignas**
 - **'using' for types**
 - C++14
 - **Memory allocation ellision/combining**
 - C++17
 - **noexcept**
 - **Copy elision**
 - **Structure bindings**
 - **Последовательность операций вызова**
 - **'if' / 'switch' with initialization**
 - **inline variables**
 - **__has_include()**
 - **alignas (32)**
 - **static_assert(true)**
 - **Nasted namespaces**
- STL
 - C++11
 - **Chrono**
 - **Random**
 - **Regex**
 - **Multithreading**
 - **Обновления вызванные новым стандартом**
 - **std::tuple**
 - **Accosicative unordered containers**
 - **Smart pointers**
 - **std::function**
 - **std::reference_wrapper**
 - C++14
 - **Гетрогенный поиск по ассоциативным контейнерам**

- Адресация элементов кортежа через тип
- `std::make_unique`
- `std::exchange`
- `rbegin, rend, cbegin, cend, rcbegin, rcend`
- C++17
 - `string_view`
 - `std::to_chars/std::from_chars`
 - `std::optional`
 - `std::variant`
 - `std::any`
 - `std::filesystem`
 - `std::byte`
 - `std::apply`
 - `std::as_const`
 - `std::clamp`
 - Ассоциативные контейнеры
 - `std::size, std::data, std::empty`
 - `non const std::string::data`
 - `std::not_fn`
 - `emplace_back`
 - `std::scoped_lock`
 - `shared_ptr` для массивов
 - Математические функции
 - `Parallel algorithms`
- Undefined behavior
 - Неуточненное поведение
 - Примеры undefined behavior
 - Более серьёзные, и менее очевидные случаи:
- Выведение типов лекция
 - Обзор
 - Правила вывода для шаблонов
 - **Правила вывода типов по значению**
 - **Правила вывода типов для указателей и ссылок**
 - **Правила вывода типов для forwarding reference**
 - Правила вывода для `auto`
 - Правила вывода для `lambda capture-list`
 - Правила вывода для `decltype`
 - Правила вывода для возвращаемого типа
 - Как найти\отладить выводимый тип
 - Вывод типов на runtime: RTTI
- Метапрограммирование
 - Не типовые шаблонные параметры
 - Типовые шаблонные параметры
 - Ключевое слово `typename`
 - Explicit (full) specialization (явная\полная специализация)
 - Partial specialization (частичная специализация)

- Variadic template (вариативные шаблоны)
- Вычисления на этапе компиляции
- Compile-time type manipulation (Преобразование с типами)
 - Primary type categories
 - Composite type categories
 - Type properties
 - Supported operations properties
 - Type relationships
 - Property queries
 - Type transformations
- Curiously recurring template pattern : CRTP
- SFINAE (Subsituation Failure Is Not An Error)
 - Tag dispatch
 - Практический пример основанный на SFINAE
- Special metafunctions
- void_t
- Detectors
- STL
 - Базовая структура STL
 - Контейнеры
 - **std::allocator**
 - **Последовательные контейнеры**
 - **std::vector**
 - **std::array**
 - **std::forward_list**
 - **std::list**
 - **std::deque**
 - **Упорядоченные ассоциативные контейнеры**
 - **std::set / std::multiset**
 - **std::map / std::multimap**
 - **Неупорядоченные ассоциативные контейнеры**
 - ****std::unordered_set ****
 - ****std::unordered_map ****
 - Адаптеры
 - **std::stack**
 - **std::queue**
 - **std::priority_queue**
 - Итераторы
 - **InputIterator**
 - **ForwardIterator**
 - **BidirectionalIterator**
 - **RandomAccessIterator**
 - **OutputIterator**
 - **std::iterator_trait**
- TODO

C++11, C++14, C++17

Ниже рассмотрены нововведения 3х стандартов языка C++.

Атрибуты

C++11

`[[noreturn]]`

Функция помеченная так не должна возвращать поток управления.

`[[carries_dependencies]]`

Атрибут связан с моделями памяти.

C++14

`[[deprecated]]`

Атрибут позволяет разметить устаревший код, вызывая warning'и при его использовании.

```
struct [[deprecated]] Name;
[[deprecated]] typedef S* pS;
using PS [[deprecated]] = S*;
[[deprecated]] int x;
union U { [[deprecated]] int n; }
[[deprecated]] void f();
namespace [[deprecated]] {NS { int x; }
enum [[deprecated]] E {};}
enum E { a [[deprecated]], b [[deprecated]] = 1 };
template < > struct [[deprecated]] X<int> {};
```

C++17

`[[fallthrough]]`

Используется для switch блоков, сообщая что оператор break не был пропущен по ошибке.

```
switch (x)
{
    case 1:
        [[fallthrough]] //No warning
    case 2:
        break;
```

```

    case 3: //Warning
    case 4:
        break;
}

```

[[nodiscard]]

Атрибут требует чтобы результат функции не был проигнорирован.

```

[[nodiscard]] bool isEmpty() { ... }

bool status = isEmpty(); //No warning

isEmpty(); //Warning - результат возвращаемый функцией проигнорирован

```

[[maybe_unused]]

Атрибут убирает warning от неиспользуемых аргументов\переменных\функций итд.

```

struct [[maybe_unused]] S;
[[maybe_unused]] typedef S* PS;
using PS [[maybe_unused]] = S*;
[[maybe_unused]] int x;
union U { [[maybe_unused]] int n; };
[[maybe_unused]] void f();
enum [[maybe_unused]] E {};
enum { A [[maybe_unused]], B [[maybe_unused]] };

```

Lambda

C++11

Анонимные функции, вызываемого типа std::function, могут использоваться в STL.

Общий вид:

```

auto lamda = [capture-list](arguments) mutable -> ret_type
{
    ...
}; //Создание

//Если не указывать mutable - по дефолту он не включен

lambda(arguments); //Вызов

```

Списки захвата:

```
[ ] // ничего не захватывается  
[=] // локальные переменные по значению  
[&] // локальные переменные по ссылке  
[this] // this по ссылке  
[a, &b] // захват отдельных переменных, по значению и ссылке
```

C++14

Дополнены правила списка захвата:

```
[&r = x, x = x + 1]  
//в lambda можно захватить ссылку, и назвать её как удобно, и можно использовать  
выражение для инициализации переменной  
  
[x = factory(2)]  
[p = std::move(p)]  
  
//Пример генератора  
auto generator = [x = 0]() mutable { return x++; }  
int a = generator(); // == 0  
int b = generator(); // == 1
```

Так же перестал быть необходим trailing return type, для возвращаемого типа auto.

Были введены генерализированные lambdas, когда аргументы указаны типа auto.

C++17

Добавлена возможность захвата текущего объекта по копии, а не по ссылке.

```
[*this]
```

Необходим спецификатор mutable, для того чтобы иметь возможность вызывать неконстантные версии функций класса.

POD-type

Plain old data - структура размещающаяся в памяти таким образом, как её описал программист, исключая оптимизации. Это может быть необходимо для передачи данных в другие языки программирования.

POD = Тривиальный класс + Класс со стандартным размещением

Тривиальный класс:

- T() = default;
- T(const T&) = default;
- T& operator=(const T&) = default;
- T(T&&) = default;
- T& operator=(T&&) = default;
- ~T() = default;
- Нет виртуальных методов и виртуального наследования
- Все нестатические поля тривиальны
- Все базовые классы тривиальны(при наличии)

Класс со стандартным размещением:

- Все нестатические поля имеют одинаковый доступ private\public\protected
- Нет виртуальных методов и вирт. наследования
- Нет нестатических полей-ссылок
- Все нестатические поля и базовые классы со стандартным размещением
- Все нестатические поля объявлены в одном классе в иерархии наследования
- Нет базовых классов того же типа, что и первое нестатическое поле

auto/decltype

auto - возможность замена типа на auto.

Примеры типов: переменной, возвращаемого значения функции, и шаблоных аргументов.

decltype() - позволяет выводить тип переменной или выражения.

C++11

Особенности работы auto:

```
int bar();

auto i = 0; //int
auto ui = 0u; //unsigned int
volatile auto ci = i; //volatile int
const volatile auto cvi = i; // const volatile int
auto j = cvi; //int

auto& ri = i; //int &
const auto& cri = i; //const int&

auto&& fri = i; // int &
auto&& fcvi = cvi; // const int &
```



```
auto &&frv = 0; // int &&  
auto &&frvf = bar(); // int &&
```

Альтернативный синтаксис шаблонных функций

Позволяет выводить возвращаемый тип шаблонной функции.

```
template <typename T1, typename T2>  
auto sum(const T1& lhs, const T2& rhs) -> decltype(lhs + rhs)  
{  
    return lhs + rhs;  
}
```

C++14

Не нужен trailing return type, достаточно auto, Можно реализовать функцию факториал с возвращаемым типом auto, но факториал от нуля должен быть определён до рекурсивного использования этой функции.

Так же было осуществленно послабление, теперь внутри decltype() можно указывать не выражение\переменную, а auto.

Примеры:

```
double foo();  
double&& bar();  
  
double v1 = 0.0; //double  
const double& v2 = v1; //const double &  
  
decltype(auto) v3 = v1; //double  
decltype(auto) v4 = (v1); //double&  
decltype(auto) v5 = v2; //const double&  
  
decltype(auto) v6 = foo(); //double  
decltype(auto) v7 = bar(); //double &&
```

Literals

C++11

Строковые литералы

```
//Было до C++11

"Text" //char
L"Text" //wchar_t

//Появилось в C++11 - utf

u8"Text" //char - utf8
u"Text" //char16_t
U"Text"//char32_t

//Сырые строки обрамляются в ( ) в "" и могут иметь произвольны delemiter
R"delimiter( raw string )delimiter"
LR"delimiter( raw string )delimiter"
u8R"delimiter( raw string )delimiter"
uR"delimiter( raw string )delimiter"
UR"delimiter( raw string )delimiter"
```

Пользовательские литералы

Пример пользовательского литерала преобразования радиан в градусы.

```
long double operator""_degrees(long double value)
{
    return value * M_PI / 180.0;
}

double degrees = 0.38__degrees
```

Список возможных аргументов, при определении пользовательского литерала:

```
( const char * )
( unsigned long long int )
( long double )
( char )
( wchar_t )
( char16_t )
( char32_t )
( const char * , std::size_t )
( const wchar_t * , std::size_t )
( const char16_t * , std::size_t )
( const char32_t * , std::size_t )
```

C++14

Строковый литерал

```
std::string from_literal = "some string"s;
```

Бинарные литералы

```
int a = 0b111; // == 7
int b = 0B11; // == 3
```

Разделители числовых литералов

```
int a = 1'000'000;
int b = 3.14'15'92'65;
```

STL литералы

```
auto half_minute = 30s; // std::chrono::duration
auto day = 24h; // std::chrono::duration

auto complex = 1 + 1i; //std::complex
```

Initialization

C++11

Универсальная инициализация

Везде можно использовать {}:

```
// До C++11

int a;           //(1) default init
int b(2);        //(2) direct init
int c = 2;       //(3) copy init
int d = int();   //(4) value init
int arr[] = {1, 2, 3}; //(5) aggregate init

struct Point { double x, y; } point (0.0, 0.0); //(5)
std::complex<double> cpl(0.0, 0.0); //(2)
std::complex<double> c2 = std::complex<double>(0.0, 0.0); //(3)
```

```
// Начиная с C++11 можно везде {}

int a;
int b{2};
int c = {2};
int d{};
int arr[] = {1, 2, 3};

struct Point { double x, y; } point {0.0, 0.0}; //(5)
std::complex<double> cml{0.0, 0.0}; //(2)
std::complex<double> c2 = std::complex<double>{0.0, 0.0}; //(3)
```

std::initializer_list

Возможность использовать список инициализации для создания конструкторов или операторов присвоения.

Значения задаются между {} и через запятую.

initializer_list содержит следующие функции:

```
auto init_list = initializer_list<int> { 1, 2, 3};
init_list.size();
init_list.begin();
init_list.end();

init_list.r/c/begin/end(); // Начиная с C++14

init_list.empty(); // Начиная с C++17
init_list.data(); // Начиная с C++17
```

C++14

Aggregate initialization with default member initializer

```
struct x
{
    int a,b;
    char c = '0';
};

x v { 1, 2 }; // До C++14 нельзя было опустить третье поле "c"
```

C++17

auto + std::initializer_list

```
// До C++17

auto v1 { 1, 2, 3}; // std::initializer_list<int>
auto v2 = { 1, 2, 3, }; // std::initializer_list<int>
auto v3 {42}; // std::initializer_list<int>
auto v4 = { 42 }; // std::initializer_list<int>

// Начиная с C++17

auto v1 { 1, 2, 3}; // compile error
auto v2 = { 1, 2, 3, }; // std::initializer_list<int>
auto v3 {42}; // int
auto v4 = { 42 }; // std::initializer_list<int>
```

Агрегатная инициализация базового класса

Возможность вложенной инициализации:

```
struct Base
{
    std::string name;
    std::string sur_name;
};

struct Child : public Base
{
    int age;
}

Child ch1; //name, sur_name - empty, age undefined
Child ch2{}; //all fields empty

Child ch3 {"name", "sur", 99};
Child ch4 {"name", "sur", 99};
```

constexpr

C++11

Функции помеченные constexpr могут вычислять на этапе компиляции. Изначально такие функции имели большое количество ограничений, например должны были состоять из только 1 блока return.

C++14

Ограничения были существенно ослаблены. Запрещенным остались:

```
__asm__  
goto  
метки, кроме case\default в switch,  
блок try,  
переменные нелитерального типа,  
static \ thread_local переменные,  
переменные без инициализации
```

Так же они удобны для применения в шаблонной магии, например в вариативных шаблонах, о них ниже.

C++17

Лямбда может быть помечена как constexpr:

```
constexpr auto add = [](int a, int b) { return a + b; }
```

Если она может быть вызвана на этапе компиляции - это будет осуществлено, иначе она будет работать в run-time.

Шаблоны

C++11

Вариативные шаблоны (Variadic template)

Используются для создания функций с переменным числом аргументов:

```
template <typename... Args>  
void printf(const char* const format, const Args&... args);  
  
//При вызове  
printf("test", 1, 0.1);  
  
// Произойдёт инстанцирование  
printf<int, double>("test", 1, 0.1);
```

Помимо этого, используются в кортежах (tuple).

Extern templates

Используются с целью осуществить единичное инициализирование при компиляции, для её ускорения.

```
extern template void foo<int>(int);  
extern template class SomeClass<int>;
```

C++14

Шаблон переменной (Variable template)

```
template <class T>  
struct is_reference  
{  
    static constexpr bool value = false;  
};  
  
template <class T>  
struct is_reference<T&>  
{  
    static constexpr bool value = true;  
};  
  
template <class T>  
struct is_reference<T&&>  
{  
    static constexpr bool value = true;  
};  
  
template <typename T>  
constexpr bool is_reference_v = is_reference<T>::value;  
  
static_assert(!is_reference_v<SomeType>, " SomeType is reference");
```

C++17

Выведение типов шаблонных аргументов

Возможность не использовать указание типа шаблонного параметра в <>:

```
std::pair m {0, 0}; //Вместо std::pair<int, int> { 0, 0};  
std::vector v { 0.0 }; // Вместо std::vector<double> { 0.0; }  
std::lock_guard lock(mutex); // Вместо std::lock_guard<std::mutex>
```

Так же deduction guide может быть определен вручную. Пример для std::array:

```

namespace std
{
template <class T, size_t N>
struct array
{
    T arr[N];
};

template <class T, class... U>
array(T, U...) -> array<T, sizeof...(U) + 1>

};

//Тогда возможно использование
std::array arr {0, 1, 2, 3}; //Вместо std::array<int, 4>;

```

template auto

Полезно для template not-type параметров.

```

template <auto Val> // Эквивалент template <decltype(auto) Val>
struct integral_const
{
    using value_type = decltype(Val);
    static constexpr value_type value = Val;
};

using true_type = integral_const<true>; //Не требуется задавать тип вручную
using false_type = integral_const<false>; //integral_const<bool, false>

//Схожий пример:
template <auto.. seq>
struct my_sequence
{
    ...
};

auto seq = std::integer_sequence<int, 0, 1, 2>(); //int задан явно
auto seq2 = my_sequence<1, 2, 3>(); //int будет выведен из значений

```

Fold expressions (свертка функций)

Позволяет записывать операции для вариативного числа шаблонных аргументов:

```

template <typename T, typename ..Types>
constexpr auto sum(T t1, Types ..tN)
{
    return (t1 + ... + tN);
}

```



```
constexpr size_t res = sum(0, 1, 2, 3);
```

Четыре вида свёрток функций:

```
(pack op ...) = (E_1 op (... op (E_N-1 op E_N)))
(... op pack) = (((E_1 op E_2) op ...) op E_N)
(pack op ... op init) = (E_1 op (... op (E_N-1 op (E_N op I))))
(init op ... op pack) = (((I op E1) op E2) op ...) op E_N
```

Операции:

```
op:
+, -, *, /, %, ^, &, |, =, <, >, <<, >>,
+=, -=, *=, /=, %=, ^=, &= |=,
<<=, >>=, ==, !=, <=, >=, &&, ||, .*, ->*
и оператор ,
```

Начиная с C++17 возможна запись:

```
template <typename ...Types>
void print(const Types& ...tN)
{
    std::cout << ... << tN;
}
```

constexpr if

Метод разметить ветки для шаблонов:

```
template <size_t N>
decltype(auto) get(const Person& )
{
    if constexpr (N == 0)
    {
        return p.Name();
    }
    else if constexpr (N == 1)
    {
        return p.GetSurname();
    }
}
```

Спецификаторы

'default' + 'deleted' specifiers

Возможность либо пометить удалённой и недопустимой функцию (deleted). Либо реализовать стандартное поведение для конструкторов\операторов присваивания итд.

- 1. Дефотный конструктор
- 2. Констуктор копирования
- 3. Конструктор перемещения
- 4. Оператор копирования
- 5. Оператор перемещения

Если компилятор может - он постарается вывести поехсепт версии функций

'override' + 'final' sepcifiers

override - указывает на то, что функция переопределяет виртуальную функцию из наследуемого класса.

final - не даст переопределять функции дальше, т.е. означает что это финальная версия перезагруженной функции.

```
virtual void foo(int) const override {}  
  
virtual void foo(int) const final {}
```

Так же final может запретить дальнейшее наследование, если мы хотим создать класс\структуру, от которой нельзя наследоваться дальше.

Небольшие нововведения

C++11

Move semantics

Добавлен новый тип r-value ссылка T&&, который представляет собой временное значение, например результат вычисления выражений или результат вызова функций.

Для того чтобы перенести такое значение без копирования введена специальная функция std::move().

Move семантика полезна когда объект тяжелый для копирования, но легкий для перемещения. Или же когда объект запрещено копировать, например unique_ptr.

noexcept

Метод пометить функцию, что она не должна вызывать исключения.

Необходимо для создания move-конструктора и оператора присвоения, если они не помечены как noexcept будут вызваны конструктор копирования и оператор копирования (например при создании векторов нашего произвольного класса).

Range based for cycle

Вызов цикла в конструкции вида:

```
for (const auto& element: container)
{
    ...
}
```

Где container это класс с функциями begin/end, возвращающих итератороподобный объект, который должен уметь инкрементироваться и разыменовываться как указатель.

Delegate constructors

Возможность вызова одного из конструкторов из тела другого.

Default values for non-static class members

Возможность проинициализировать переменную класса в месте её определения

nullptr

Общий тип для обозначения пустых указателей. Можно перегружать функции, используя std::nullptr_t как аргумент.

enum class

Не позволяет сравнивать поля разных enum'ов.

enum underlying type

Позволяет задать тип, в котором хранится перечисление, например:

```
enum X : int
{
    A,
    B
};
```

Тем самым можно задать размер переменной типа X.

Explicit cast operators

Операторы явного каста:

```
class P
{
    explicit operator bool() { return ...; }
};

P ptr;
int flag = ptr; // Преобразования не будет,
//т.к. помечено explicit: ошибка компиляции
```

Relaxed rules for unions

До 11 стандарта можно было использовать только POD внутри union.

Теперь почти любой, но важно для юнона так же объявить конструктор, если он есть у вложенной структуры. Но в 17 стандарте это стало не обязательным для реализации.

static_assert

Возможность использования ассертов на этапе компиляции, условие + строка сообщения, например:

```
static_assert(std::is_pod(variable), "ERROR: !!");
```

В 17 стандарте строка стала не обязательной.

alignof, alignas

Позволяет использовать нужное выравнивание или узнать его

'using' for types

Более современная замена typedef, способная принимать шаблонные аргументы:

```
typedef std::vector<int>::iterator vec_iter;

template <typename T>
typedef std::vector<T>::iterator vec_t_iter;
//Ошибка при компиляции

Альтернативная запись:
using vec_iter = std::vector<int>::iterator;

template <typename T>
using vec_t_iter = std::vector<T>::iterator;

vec_t_iter<int> it; //ok!
```

C++14

Memory allocation ellision/combining

Вызовы new\delete могут оптимизироваться.

C++17

noexcept

Спецификатор того, что функция не выбрасывает исключения - теперь часть системы типов функции.

```
typedef void (*nef)() noexcept;
typedef void (*ya)();

void foo() noexcept;
void bar();

ef pf1 = foo; // +
nef pf2 = foo; // +
ef = bar; // +
nef = bar; //Compile error
```

Copy elision

Создание объекта не при выходе из функции, а в месте его последующего применения, там где эта функция вызывалась.

Structure bindings

Возможность раскрутить группу значений в серию переменных. Можно раскрыть:

- array
- tuple
- pair/structure

```
const auto& [field1, field2, field2] = structure/tupple/..
```

Можно реализовать для произвольного класса:

```
template <size_t N>
decltype(auto) get(const Person&);

template <>
decltype(auto) get<0>(const Person& p)
```

```

{
    return p.GetName();
}

template <>
decltype(auto) get<1>(const Person& p)
{
    return p.GetSurname();
}

// Далее нужно определить tuple_size в std::

namespace std
{
    template <>
    struct tuple_size<Person> : std::integral_constant<size_t, 2>
    {};

    template <>
    struct tuple_element<0, Person>
    {
        using type = const std::string &;
    };

    template <>
    struct tuple_element<1, Person>
    {
        using type = const std::string &;
    };
}

```

Последовательность операций вызова

```

a.b
a->b
a->*b
a(b1, b2, b3)
// b1, b2, b3 не последовательны
// их порядок не определен
b @= a
a[b]
a << b << c
a >> b >> c

```

'if' / 'switch' with initialization

Возможность задать значение в теле условия:

```
if (int a = f(5); a > 2)
{
    //а существует здесь
}
//а не существует здесь
```

Можно использовать structure bindings на этапе if initialization. Тем самым подготовить сразу несколько переменных для условий и вычислений.

inline variables

Необходимы чтобы быть разделяемыми между файлами, будучи определенными в хэдере. Или для функций - чтобы писать определение прямо в хэдере.

__has_include()

Директива препроцессора, проверяет наличие хэдеров

alignas (32)

Теперь выравнивание структуры по границе заданной, при динамическом размещении

static_assert(true)

Теперь можно использовать без строки, просто 1 условие

Nasted namespaces

```
namespace A::B::C {
    int i;
}

//Эквивалентно:
namespace n1 {
    namespace n2 {
        int n;
    };
};

//Вызов
n1::n2::n;
```

STL

C++11

Chrono

Используется для измерения времени:

```
#include <chrono>

template <class Clock, class Duration = typename Clock::duration>
std::chrono::time_point; //Тип для хранения момента времени

std::chrono::system_clock; //Возможные типы отсчётов
std::chrono::high_resolution_clock;
std::chrono::steady_clock; //Наиболее приоритетный

auto start = std::chrono::steady_clock::now();
auto end = std::chrono::steady_clock::now();

std::chrono::duration<double> elapsed_seconds = end - start;
auto durMs = duration_cast<std::chrono::milliseconds>(end - start);

//Другие варианты для std::chrono::duration_cast:
std::chrono::nanoseconds;
std::chrono::microseconds;
std::chrono::milliseconds;
std::chrono::seconds;
std::chrono::minutes;
std::chrono::hours;
```

Random

Используется для генерации случайных чисел.

```
Random number engines
{
    linear_congruential_engine,
    mersenne_twister_engine,
    subtract_with_carry_engine
};

Random number engine adaptors
{
    discard_block_engine,
    independent_bits_engine,
    shuffle_order_engine
};

Predefined generators
{
    minstd_rand0,
    minstd_rand,
    mt19937,
```



```

    mt19937_64,
    ranlux24_base,
    ranlux48_base,
    ranlux24,
    ranlux48,
    knuth_b,
    default_random_engine
};

Non-deterministic random numbers : random_device;

//Внутри каждого из них есть несколько вариаций
Distributions
{
    Uniform distributions,
    Bernoulli distributions,
    Poisson distributions,
    Normal distributions,
    Sampling distributions
};

```

Пример:

```

#include <random>

std::mt19937_64 engine { std::random_device{ }() };
std::uniform_int_distribution<> distr { 0, 100 };
std::cout << distr(engine);
auto generator = std::bind(distr, engine);
std::cout << generator();

```

Regex

Регулярные выражения:

```

#include <regex>

std::regex pattern { R"((\d{2}).(\d{2}).(\d{2,4}))"};
std::string str{"I was born 01.02.1993"};

for (auto it = std::sregex_iterator {str.begin(), str.end(), pattern},
      end = std::sregex_iterator { }; it != end; ++it)
{
    auto&& match = *it;
    std::string day = match[1]; //01
    std::string day = match[2]; //02
    std::string day = match[3]; //1993
    std::string day = match[4]; // ""
}

```

```
//Другой вариант использования - замена:  
  
auto replaced = std::regex_replace(str, pattern, "xx.xx.xxxx");
```

Multithreading

Используется для реализации многопоточных или асинхронных приложений.

```
#include <thread>  
  
// Потоки и синхронизация:  
std::thread  
std::mutex  
std::recursive_mutex  
std::timed_mutex  
std::recursive_timed_mutex  
std::conditional_variable  
  
// Модели и барьеры памяти:  
std::memory_order  
std::atomic_thread_fence  
  
// Атомарные переменные:  
std::atomic  
  
// Асинхронные вычисления:  
std::future  
std::packaged_task  
std::promise
```

Обновления вызванные новым стандартом

```
// конструирование на месте, на подобии как make_pair: только 1 вызов move  
конструктора  
std::container<T>::emplace();  
std::container<T> ::cbegin(), ::end(), std::begin, std::end;  
  
// если unordered контейнер, когда есть ясность куда вставить значение - это может  
улучшить скорость  
std::associative_container<T>::emplace_hint();  
  
// обрезать по границе использования  
std::seq_container<T>::shrink_to_fit();  
std::vector<T>::data();  
std::list<T>; // complexity constraints
```

std::tuple

Можно использовать функцию `make_tuple()`.

Доставать значения можно `std::get(v)`;

Функция `tie` - которая может сформировать tuple от левых ссылок, `std::tie(name, surname) = get_person(1)`;

В C++17 он перестаёт быть нужен, но можно им сравнивать группы значений:

```
std::tie(year, month, day) > std::tie(year2, month2, day2);
```

Accosicative unordered containers

`unordered_set`, `_multiset`, `_map`, `_multimap`,

Поиск за $O(1)$, как и вставка\удаление. Но зависит от количества элементов на bucket'e.

Smart pointers

```
//Можно настроить делитер - который закроет файл
std::unique_ptr<FILE, decltype(deleter)>;

std::unique_ptr<T>
std::shared_ptr<T>
std::weak_ptr<T> //решение для перекрестных ссылок
```

std::function

Обертка для callable объекта, которым может выступать лямбда.

Или результат `std::bind`.

std::reference_wrapper

Модулирование поведения ссылки. Нужны для thread'ов - чтобы протолкнуть объект по ссылке

`std::ref` + `std::cref` - функции помогающие сгенерировать объект типа `reference_wrapper`.

C++14

Гетрогенный поиск по ассоциативным контейнерам

```
//Гетрогенный компаратор less
std::set<std::string, std::less<>> elements { ... };
//При вызове не будет формироваться новые std::string для сравнения:
elements.find("const char*");
```

Адресация элементов кортежа через тип

Стала доступна адресация по типу `::get()`.

Если будет указан несуществующий тип - ошибка будет на этапе компиляции. Но элементов с одинаковым типом не должно быть, для корректной работы функции.

std::make_unique

Подобие `make_shared`, `make_pair`, `make_tuple`.

std::exchange

`std::exchange(объект, следующее его значение)`. Результат вызова это изначальный объект.

Можно использовать чтобы пробежать по массиву и обнулить его:

```
for (const auto x: std::exchange(vec, {}))
    std::cout << x << std::endl;
```

Другая область использования это реализация своего `move` конструктора, или `move` оператора присваивания.

rbegin, rend, cbegin, cend, rbegin, rcend

Константные и реверсивные интераторы для контейнеров.

C++17

string_view

Обобщенный и легковесный вариант для хранения строчек `std::string`/`c_string` `std::string_view` // `std::wstring_view`

std::to_chars/std::from_chars

Функции преобразования цифр. Может содержать ошибку парсинга.

std::optional

Хранит либо значение, либо `nullopt`

```
#include <optional>

std::optional<int> opt = 3;

opt.has_value(); // == if (optional)
opt.value(); // == *optional

//Возвращает значение, если оно есть, или переданный объект:
opt.value_or({});
```

```
//Операции сравнения в условиях с нижележащим классом
if (optional > 2) {}
```

std::variant

Метод хранения множества разнотипных значений вместе:

```
#include <variant>

std::get<0>();
std::get<std::string>();

//Возвращает const type* ptr, или nullptr если не удалось преобразовать к типу
std::get_if<type>(variant);

//возможность установки базового состояния variant
//на случай если другие объекты не имеют конструктора по умолчанию
std::monostate;

//Можно всё обработать единственной лямбдой с auto аргументом
std::visit( [](auto arg) { std::cout << arg << ' '; }, v);
```

std::any

Принимает произвольный тип, но почти всегда происходит динамическая локация. Если возможно, лучше использовать variant.

Пример:

```
std::any x{5};
x.has_value(); // == true
std::any_cast<int>(x); // == 5
```

std::filesystem

Позволяет использовать функции доступа к файловой системе:

```
if (std::filesystem::exists(my_path))
{
    const auto fileSize { std::filesystem::file_size(my_path)};
    std::filesystem::path tmpPath { "/tmp"};
    if (std::filesystem::space(tmpPath).available > fileSize )
    {
        std::filesystem::create_directory(tmpPath.append("example"))
        std::filesystem::copy_file(my_path, tmpPath.append("newFile"))
    }
}
```

```
}
}
```

std::byte

```
//Новый тип для хранения "сырых" байтов, перегружен
std::byte a { 0 };
int x = std::to_integer<int>(a);
```

std::apply

Применение функции к tuple\pair:

```
auto add = [](int x, int y)
{
    return x + y;
};
std::apply(add, std::make_tuple(2, 3)); // == 5
std::apply(add, std::make_pair(1, 2)); // == 3
```

std::as_const

Обертка для получение const-ref.

std::clamp

Клипует значение по 2м границам - верхней и нижней.

Ассоциативные контейнеры

Добавлены функции: try_emplace, insert_or_assign.

Добавлены функции: extract, insert, merge.

```
// merge:
std::set<int> src { 1, 3, 5};
std::set<int> dst { 2, 4, 5};
dst.merge(src);
// dst == {1, 2, 3, 4, 5}
// src == {5} !!!

// extract\insert - позволяют move'нуть объект из одного контейнера, в другой
// Или изменить ключ у поля
std::map m;
auto e = m.extract(2); // key == 2
e.key() = 4;
m.insert(std::move(e));
```

std::size, std::data, std::empty

Свободные обобщенные функции для всех контейнеров.

non const std::string::data

Доступ к сырой памяти строки.

std::not_fn

Wrapper возвращающий отрицательное\обратное значение функции.

emplace_back

Функции теперь возвращают ссылку на объект.

std::scoped_lock

Возможность использовать несколько мьютексов в одном локе.

shared_ptr для массивов

TODO дополнить.

Математические функции

TODO дополнить + (std::gcd, std::lcm).

Parallel algorithms

Возможность использовать параллельные вычисления в стандартных алгоритмах.

TODO дополнить с примерами.

Undefined behavior

Стандарт языка допускает **неопределенное поведение**, в некоторых ситуациях. Это сделано с целью сделать код наиболее эффективным и быстрым, и не платить за дорогие проверки.

Неуточненное поведение

Неуточненное поведение или **поведение определяемое реализацией** - поведение, которое может различаться на разных платформах и компиляторах, т.к. спецификация языка предлагает несколько доступных вариантов реализации конструкции.

В отличие от **неопределённого поведения**, программа с неуточненным поведением с точки зрения соответствия спецификации языка не считается ошибочной. Но писать такой код - плохая идея.

```
int a = 0;
// Неуточненное поведение:
foo(a = 2, a);
// Последовательность вычисления аргументов не гарантирована стандартом
```

```
// -1 знаковое целое, вычисление b будет неуточненным поведением:
int b = (-1) >> 5;
```

Примеры undefined behavior

```
void foo()
{
    int a[10];
    //Выход за границу массива:
    a[22] = 10;
}
```

```
struct Base
{
    //virtual ~Base() = default;
    virtual void f();
}

struct Derived : Base {};

void foo()
{
    Base* b = new Derived();
    delete b; // UB т.к. нет виртуального деструктора в Base
}
```

```
auto p1 = new int[10];
delete p1; //Должно быть delete[]

auto p2 = new int;
delete[] p2; //Должно быть delete

auto p3 = new int[10];
free(p3); //Должно быть delete[]

auto p4 = new int;
free(p4); //Должно быть delete
```


Более серьёзные, и менее очевидные случаи:

```
int try_init(struct usb_line6_podhd* podhd)
{
    //Отсутствует проверка что podhd != nullptr
    struct usb_line* line6 = &podhd->line6;

    //Тут у нас уже возможно UB:
    if (podhd == nullptr) //Проверять надо раньше
        return -ENODEV;
    //Компилятор может оптимизировать условие!
}
```

Пример из JPEG:

```
//Схожая ситуация, как с >>
((-1) << 2) + 1;
//Правильный unsigned вариант
((~0u) << 2) | 1;
```

Целочисленное переполнение:

```
size_t count = (size_t)(5) * 1024 * 1024 * 1024; // 5 Gb
//... выделим array размера count

// count не поместится в int, если он 32
for (int i = 0; i != count; ++i)
    //Произойдёт переполнение i
    array[i] = (char)(i) | 1;

//Если вдруг count == 0, тут тоже UB
if (array[count - 1] == 0)
    std::cout << "Issue";
```

```
int foo(const unsigned char* s)
{
    int r = 0; //Fix: unsigned
    while (*s)
    {
        //Возможно переполнение r
        //Но это не рассматривается, т.к. запрещено переполнять знаковые числа
        r += ((r * 20891 + *s * 200) | *s ^ 4 | *s ^ 3) ^ (r >> 1);
        s++;
    }
    //Компилятор может оптимизировать и убрать операцию ниже
    //Т.к. суммация положительного числа с положительным
```

```
    return r & 0x7fffffff  
    // Станет: return r;  
    // И мы вернём отрицательное число, после оптимизации  
}
```

Выведение типов лекция

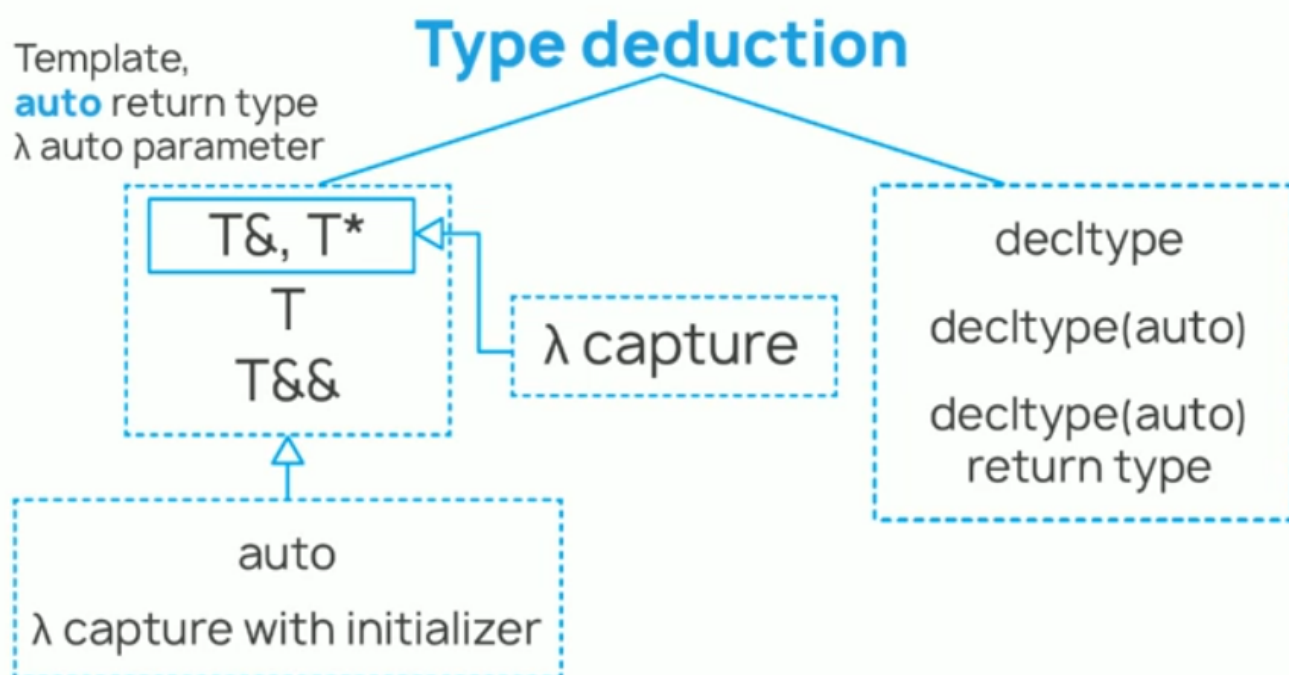
До C++11 вывод типов применялся только в шаблонах.

Потом приехали новые конструкции языка.

C++11: r-value/forwarding reference, auto, decltype, lambda capture, return type deduction for lambda.

C++14: function return type deduction, lambda caption with initialization.

Обзор



Изначально было 2 типа правил, для вывода шаблонных типов:

- для указателей и ссылок
- для обычных типов

В C++11 появились r-value ссылки, которые в шаблонах работают не совсем как r-value, а как forwarding reference и в зависимости от того чем инициализируется становится либо r-value либо l-value ссылкой.

Появилось ключевое слово auto, которое наследует правила вывода всех шаблонных аргументов.

Далее появилось ключевое слово decltype.

Появились списки захвата lambda, которые наследуют правила вывода типов для ссылок и указателей.

Появился вывод типов lambda, который как auto наследует правила вывода шаблонных аргументов.

Правила вывода для шаблонов

Правила вывода типов по значению

Отбрасываются ссылки, const, volatile:

```
template <typename T>
void foo(T param); //param типа T

int i = 0;           // int
int &ri = i;         // int&
const int &rci = i;   // const int&
volatile int &rvi = i; // volatile int&
const volatile int &rcvi = i; // const volatile int&

foo(ri);    //T = int, param тип = int
foo(rci);   //T = int, param тип = int
foo(rvi);   //T = int, param тип = int
foo(rcvi);  //T = int, param тип = int
```

```
//Если заменить на const T:
template <typename T>
void foo(const T param); //param типа T

//Тогда:
foo(ri);    //T = int, param тип = const int
foo(rci);   //T = int, param тип = const int
foo(rvi);   //T = int, param тип = const int
foo(rcvi);  //T = int, param тип = const int

//Тоже самое для void foo(volatile T param);
//T = int, param тип = volatile int
```

Отбрасывается модификатор для указателя (const\volatile):

```
template <typename T>
void foo(T param); //param типа T

int i = 0;           //int
const int* pci = &i;  //const int*
volatile int* pvi = &i; //volatile int*

//const int * const
```

```

const int* const cpci = &i;
//volatile int * volatile
volatile int* volatile vpvi = &i;

//cv int * cv
const volatile int* const volatile cvpcvi = &i;

foo(pci);    //T = const int*, param тип = const int*
foo(pvi);    //T = volatile int*, param тип = volatile int*
foo(cpci);   //T = const int*, param тип = const int*
foo(vpvi);   //T = volatile int*, param тип = volatile int*
foo(cvpcvi); //T = cv int*, param тип = cv int*

```

```

template <typename T>
void foo(T param);

void bar();
int arr[10]; //int[10]

foo(arr); //T = int*, param тип = int*
foo(bar); //T = void(*)(), param тип = void(*)()

foo({1, 2, 3}); //ERROR: fails to deduce type

```

Правила вывода типов для указателей и ссылок

Если передаётся значение, у которого есть референс - он отбрасывается, остальные модификаторы сохраняются:

```

template <typename T>
void foo(T& param);

int i = 0;
const int ci = i;
volatile int vi = i;
const volatile int cvi = i;

foo(i); // T = int, param тип = int&
foo(ci); // T = const int, param тип = const int&
foo(vi); // T = volatile int, param тип = volatile int&
foo(cvi); // T = cv int, param тип = cv int&

//Если добавить ссылки перед ci, vi, cvi
//То результат не изменится

```

Если наш параметр должен быть ссылкой на константный объект:

```

template <typename T>
void foo(const T& param);

int i = 0;           // int
int &ri = i;         // int&
const int &rci = i;   // const int&
volatile int &rvi = i; // volatile int&
const volatile int &rcvi = i; // const volatile int&

foo(ri); //T = int, param тип = const int&
foo(rci); //T = int, param тип = const int&
foo(rvi); //T = volatile int, param тип = cv int&
foo(rcvi); //T = volatile int, param тип = int cv int&

```

Для указателей действуют схожие правила:

```

template <typename T>
void foo(T* param);

int i = 0;
int* pi = &i;
const int* pci = &i;
volatile int* pvi = &i;
const volatile int* pcvi = &i;

foo(pi); // T = int, param тип = int*
foo(pci); // T = const int, param тип = const int*
foo(pvi); // T = volatile int, param тип = volatile int*
foo(pcvi); // T = const volatile, param тип = const volatile int*

```

При добавлении константности для указателей:

```

template <typename T>
void foo(const T* param);

int i = 0;
int* pi = &i;
const int* pci = &i;
volatile int* pvi = &i;
const volatile int* pcvi = &i;

foo(pi); // T = int, param тип = const int*
foo(pci); // T = int, param тип = const int*
foo(pvi); // T = volatile int, param тип = volatile int*
foo(pcvi); // T = volatile int, param тип = const volatile int*

```

```

template <typename T>
void foo(T& param);

void bar();
int arr[10]; //int[10]

foo(arr); //T = int [10], param тип = int(&)[10]
foo(bar); //T = void(), param тип = void(&)()

foo({1, 2, 3}); //ERROR: fails to deduce type

```

Правила вывода типов для forwarding reference

Если передается ссылка на объект l-value, т.е. объект у которого есть имя и адрес, тогда аргумент ссылка на l-value.

Если передаётся временный объект, то раскрывается аргумент на r-value ссылка.

```

template <typename T>
void foo(const T&& param);

int i = 0;           // int
int &ri = i;         // int&
const int &rci = i;   // const int&
volatile int &rvi = i; // volatile int&
const volatile int &rcvi = i; // const volatile int&

foo(ri);   //T = int&, param тип = int&
foo(rci);  //T = const int&, param тип = const int&
foo(rvi);  //T = volatile int&, param тип = volatile int&
foo(rcvi); //T = cv int&, param тип = int cv int&
foo(42);   //T = int, param тип = int&&

```

Подобное поведение было необходимо для реализации `emplace_back`.

```

//Плохо: копирование
template <class... Args>
void emplace_back(Args... args);

//Лучше - ссылки
template <class... Args>
void emplace_back(Args&... args);

//Идеально
template <class... Args>
void emplace_back(Args&... args)
{
    T* ptr = ....; //Memory region from allocator

```

```
new (ptr) T { std::forward<Args>(args)...}; //TODO placement new в конспект
}
```

TODO более детально про std::forward.

Правила вывода для auto

```
int i = 0;           // int
int &ri = i;         // int&
const int &rci = i;   // const int&
volatile int &rvi = i; // volatile int&
const volatile int &rcvi = i; // const volatile int&
```

//Все auto = int, все типы переменных = int:

```
auto a_i = i;
auto a_ri = ri;
auto a_rci = rci;
auto a_rvi = rvi;
auto a_rcvi = rcvi;
```

//Для задания переменной со спецификатором:

```
const auto ca_i = i;
volatile auto va_i = ri;
volatile auto va_i = rvi;
const volatile auto cva_i = rcvi;
//Полный тип переменной = specifiers + int
```

При указании ссылки, работают правила вывода ссылки в шаблонах:

```
auto& a_i = i;           //auto == int, var type = int&
auto& a_ri = ri;         //auto == int, var type = int&
auto& a_rci = rci;       //auto == const int, var type = const int&
auto& a_rvi = rvi;       //auto == volatile int, var type = volatile int&
auto& a_rcvi = rcvi;     //auto == cv int, var type = cv int&
```

При добавлении спецификаторов немного меняется поведение:

```
int i = 0;           // int
int &ri = i;         // int&
const int &rci = i;   // const int&
volatile int &rvi = i; // volatile int&
const volatile int &rcvi = i; // const volatile int&

auto& a_i = i; //auto = int, var type = int&
```

```
const auto& ca_rci = rci; //auto = int, var type = const int&
volatile auto& va_rvi = rvi; //auto = int, var type = volatile int&
const volatile auto& cva_rcvi = rcvi; //auto = int, var type = cv int&
```

При применении двойного амперсанда:

```
int foo();
int&& bar();

int i = 0;      // int
int &ri = i;    // int&
int &rri = 42;  // int&&

auto&& a_i = i; //auto = int, var type = int&
auto&& a_ri = ri; //auto = int, var type = int&

auto&& a_foo = foo(); //auto = int, var type = int&&
auto&& a_bar = bar(); //auto = int, var type = int&&
```

Пример с массивом и функцией:

```
void bar();
int arr[10];

auto& rarr = arr; // auto = int[10], var type = int(&)[10]
auto& abar = bar; // auto = void(), var type = void(&)()

auto parr = arr; // auto = int*, var type = int*
auto pbar = bar; // auto = void(*)(), var type = void(*)()

auto init_list1 {1, 2, 3}; // auto = std::initializer_list<int>
auto init_list2 = {1, 2, 3}; // auto = std::initializer_list<int>

auto err_list = {1, 0.2}; // не удастся вывести тип
```

Правила вывода для lambda capture-list

Список типов захвата:

```
[=]
[&]
[this]
[*this] // C++17
[identifier]
[&identifier]
```



```
[identifier initializer] // C++14  
[&identifier initializer] // C++14
```

Захват по копии:

```
const int cx = 42;  
auto lambda = [cx] { ... };  
  
// При раскручивании в компиляторе:  
class LambdaCompilerRepresentation  
{  
    // Сохраняется const\volatile:  
    const int cx;  
public:  
    auto operator()() const { ... }  
}
```

Влияние mutable спецификатора:

```
int x = 42;  
// Compile error:  
auto lambda = [x] { x = 0; }; // Нехватает mutable  
  
class LambdaCompilerRepresentation  
{  
    int x;  
public:  
    // const модификатор причина проблемы выше  
    auto operator()() const { ... }  
    // требуется модификатор mutable в lambda  
}
```

```
const int x = 42;  
// Compile error:  
auto lambda = [x] mutable { x = 0; };  
  
class LambdaCompilerRepresentation  
{  
    // const модификатор причина проблемы выше:  
    const int x;  
public:  
    auto operator()() { x = 0; }  
}
```

Захват по ссылке:

```
int x = 42;
auto lambda = [&x] { x = 0; }; // ok

class LambdaCompilerRepresentation
{
    int& x;
public:
    auto operator()() const { x = 0; }
}
```

```
const int x = 42;
auto lambda = [&x] { x = 0; }; // compile error

class LambdaCompilerRepresentation
{
    const int& x;
public:
    auto operator()() const { x = 0; }
}
```

Список захвата с инициализацией:

```
auto p = std::make_unique<SomeClass>();

auto lambda = [p = std::move(p)] { ... }; // ok

class LambdaCompilerRepresentation
{
    //Если захват не по ссылке const\volatile отбросятся
    std::make_unique<SomeClass> p;
public:
    auto operator()() const { ... }
}
```

```
int x = 42;
auto lambda = [&rx = x] { rx = 0; }; // ok

class LambdaCompilerRepresentation
{
    //Если захват по ссылке const\volatile сохраняются
    int& rx;
public:
    auto operator()() const { rx = 0; }
}
```

Правила вывода для decltype

```
int foo();
int&& bar();

int arr[10];

int v1 = 0.0; //int
const int& v2 = v1; //const int &
int&& v3 = 0; //int&&

decltype(auto) v4 = v1; //int
decltype(auto) v5 = (v1); //int&
decltype(auto) v6 = v2; //const int&

decltype(auto) v7 = foo(); //int
decltype(auto) v8 = bar(); //int &&

decltype(auto) v9 = arr[0]; //int &

//Если не использовать (auto) - compile errors:
decltype(foo) v10 = foo(); //int ()()
decltype(bar) v11 = bar(); //int && ()()
//Исправляется через decltype(foo()), decltype(bar())
```

Правила вывода для возвращаемого типа

```
// Будет использоваться шаблонный вывод типов:
[capture-list](params) -> T
{
    return ...;
}

//В C++ не обязательно использовать ->
//Тогда будут применены правила вывода auto

// Будет использоваться шаблонный вывод типов:
auto foo() -> T
{
    return ...;
}

//Не обязательно использовать ->, как выше

// Будет использовать decltype вывод типов:
decltype(auto) bar()
{
```

```
    return ...;
}
```

Применение механизмов выше, создание обобщенного оператора суммации:

```
template <typename T1, typename T2>
auto operator+(T1&& lhs, T2&& rhs)
{
    return std::forward<T1>(lhs) + std::forward<T2>(rhs);
}
```

```
template <typename Callable, typename ...Args>
auto operator+(Callable&& op, Args&& args) // auto не может вернуть ссылку
{
    return std::forward<Callable>(op)(std::forward<Args>(args)...);
}

template <typename Callable, typename ...Args>
auto&& operator+(Callable&& op, Args&& args) // Могут быть проблемы!
{
    return std::forward<Callable>(op)(std::forward<Args>(args)...);
}
// Если Callable возвращает просто тип T, тогда вернется ссылка
// на локальный объект, который погибнет сразу же: undefined behavior

template <typename Callable, typename ...Args>
decltype(auto) operator+(Callable&& op, Args&& args) // Perfect returning
{
    return std::forward<Callable>(op)(std::forward<Args>(args)...);
}
```

Но с decltype нужно быть аккуратным:

```
template <typename T>
decltype(auto) lookup(T value)
{
    static const std::vector<SomeClass> values = {...};
    size_t idx = ...; // Найти индекс по value

    auto ret = values[idx];
    return ret; // Возвращаемый тип SomeClass
}

// НО:

template <typename T>
decltype(auto) lookup(T value)
```

```
{
    static const std::vector<SomeClass> values = {...};
    size_t idx = ...; // Найти индекс по value

    auto ret = values[idx];
    return (ret); // Возвращаемый тип SomeClass&
}
// Из-за лишних скобок вернётся ссылка на локальный объект
// А это выстрел в ногу
```

Как найти\отладить выводимый тип

Следующий код выведет ошибку компиляции, из которой можно понять выводимый тип:

```
template <typename T, typename ...Types>
class TypePrinter;

template<typename T>
void foo(const T& t)
{
    TypePrinter<T, decltype(t)> _;
}

class SomeClass { ... };

SomeClass obj;
foo(obj);
```

Вывод типов на runtime: RTTI

```
template <typename T>
void print_type(const T& arg)
{
    std::cout << "T = " << typeid(T).name() << "\n";
    std::cout << "arg = " << typeid(arg).name() << "\n";
}

SomeClass { ... };

void foo()
{
    std::vector<SomeClass> vec { ... };
    print_type(vec.data());
}

//Ожидание:
//T = SomeClass *
```

```
//arg = SomeClass * const&

//Реальность:
//T = P9SomeClass, demangle - SomeClass*
//arg = P9SomeClass, demangle - SomeClass*
```

Если необходимо - можно решить задачу через `boost::typeindex`.

Метапрограммирование

Вид программирования, связанный с созданием программ, которые порождают другие программы, как результат своей работы.

В C++ реализуется при помощи шаблонов: инстанцируемые функции и классы.

Не типовые шаблонные параметры

Существует 4 вариации:

```
template <size_t> // или <size_t N>
struct int_array { ... };

template <size_t = 42> // или <size_t N = 42>
struct array { ... };

// Начиная с C++11:
template <size_t ...> // или <size_t ...ints>
class sizeT_sequence { ... };

// Начиная с C++17:
template<auto V> // или <decltype(auto) V>
struct B { .... };
```

Параметром могут выступать:

- l-value reference
- `std::nullptr_t`
- integral type (bool, char, signed char, unsigned char, short, ...)
- pointer
- pointer to member
- enumeration

Типовые шаблонные параметры

Три наиболее часто используемых варианта:

```

template <class> // или <typename T>
class FalseVector { ... };

template <class T, class Alloc = std::allocator<T>>
class TrueVector { ... };

// Начиная с C++11:
template <class ...> // или <typename ...Types>
class tuple { .... };

```

Начиная с C++17 доступны три более экзотических вариантов, шаблон в шаблоне:

```

template <class K, class T, template <class> class Container>
class MyMap
{
    Container<K> keys;
    Container<T> values;
};

template<class T> class my_array { ... };

template<class K, class T, template <class> class Container = my_array>
class MyMap { ... };

template <class K, class T, template <class, class> class ...Map>
class MyMap : Map<K, T>... { ... };

```

Ключевое слово typename

Может быть использовано несколькими разными способами:

```

template <typename T>
struct X : B<T> // B<T> is dependent T
{
    //Если не написать typename T::A может интерпретироваться не верно
    typename T::A* pa; // T::A is dependent name from T

    void f(B<T>* pb)
    {
        static int i = B<T>::i; // B<T>::i is dependent variable on T
        pb->j++; // pb->j is dependent variable from T ??? B ???
    }
}

```

Explicit (full) specialization (явная\полная специализация)

Пример для классов:

```
template <class T>
class vector // class template
{
    ...
};

// full specialization for vector<bool>:
template<>
class vector<bool>
{
    ....
};
```

Пример для функций:

```
template <class T>
void print(const T& obj) // function template
{
    std::cout << obj;
};

class SomeClass {...};

// full specialization for print:
template<>
void print<SomeClass>(const SomeClass& obj)
{
    std::cout << obj;
};
```

Partial specialization (частичная специализация)

```
// Шаблонный класс
template <class T, class Deleter>
class unique_ptr
{
public:
    T* operator->() const noexcept;
}

// Частичная специализация для шаблонного класса
// Реализация unique_ptr для массивов
template <class T, class Deleter>
```



```
class unique_ptr<T[], Deleter>
{
public:
    T& operator[](size_t idx) noexcept;
    const T& operator[](size_t idx) const noexcept;
}
```

Для функций частичная специализация не доступна.

Variadic template (вариативные шаблоны)

```
template <class T1, class T2, class T3>
bool equalsAnyOf(const T1& t1, const T2& t2, const T3& t3)
{
    return t1 == t2 || t1 == t3;
}
// 4,5,6 и больше аргументов - стали уже огромными
```

Решение:

```
// C++11:
template <class T1>
bool equalsAnyOf(const T1& t1) noexcept
{
    return false;
}

template <class T1, class T2, class ...TN>
bool equalsAnyOf(const T1& t1, const T2& t2, const TN&... tN) noexcept
{
    // Вызывается первый аргумент и оставшиеся tN
    // каждый раз на 1 меньше, за счёт вышедшего T2
    return t1 == t2 || EqualsAnyOf(t1, tN...); // рекурсия
}

// Вызов:
std::cout << equalsAnyOf(0, 'a', 0.0, 42);
```

Свертка позволяет избежать рекурсии и переполнение стека, в отличие от решения стандарта 11 года.

```
// C++17:

template <class T1, class T2, class ...TN>
bool equalsAnyOf(const T1& t1, const T2& t2, const TN&... tN) noexcept
{
```

```
// Лаконичное решение через свертку функций
return ((t1 == t2) || ... || (t1 == tN));
}

std::cout << equalsAnyOf(0, 'a', 0.0, 42);
```

Пример использования в std::vector:

```
template <class T, class Alloc = std::allocator<T>>
class vector
{
public:
    template <class ...Args>
    T& emplace_back(Args&&... args)
    {
        T* ptr = ...; // указатель на новый объект
        new (ptr) T { std::forward<Args>(args)...};
        // new (ptr) T { std::forward<Arg1>(arg1), std::forward<Arg2>(arg2), ...};
        return *ptr;
    }
};
```

Вычисления на этапе компиляции

```
template <size_t N>
struct Facrotial;

template <>
struct Facrotial<0>
{
    // enum использовались в старых компиляторах
    // так как должны вычисляться на этапе компиляции
    // До C++11
    enum { value = 1 };
};

template <>
struct Facrotial<1>
{
    enum { value = 1 };
};

template <>
struct Facrotial<2>
{
```

```
enum { value = 2 };  
};
```

Более разумное решение, без определения каждой частичной спецификации:

```
// Если не реализовать <0> и <1>  
// Тогда рекурсия будет бесконечной  
  
template <size_t N>  
struct Facrotial  
{  
    // До C++11  
    enum { value = N * Factorial<N - 1>::value };  
};  
  
template <>  
struct Facrotial<0>  
{  
    enum { value = 1 };  
};  
  
template <>  
struct Facrotial<1>  
{  
    enum { value = 1 };  
};  
  
const auto fac5 = Factorial<5>::value;
```

Однако в данном случае присутствует рекурсия, но её глубина может достигать 1024 вызовов.

Начиная с C++11:

```
template <size_t N>  
struct Facrotial  
{  
    static constexpr size_t value = N * Facrotial<N - 1>::value;  
};  
  
template <>  
struct Facrotial<0>  
{  
    static constexpr size_t value = 1;  
};  
  
template <>  
struct Facrotial<1>  
{  
    static constexpr size_t value = 1;  
};
```

```
};

const auto fac5 = Factorial<5>::value;
```

Такие структуры называются метафункции. Стандартное название для переменной метафункций `::value` - негласное соглашение программистов.

Вариант с использованием функций `constexpr`:

```
constexpr size_t Factorial(size_t n) noexcept
{
    return n > 1 ? n * Facrotial(n - 1) : 1; // Начиная с C++11
}

// Не рекурсивный вариант:
constexpr size_t Facrotial(size_t n) noexcept
{
    size_t acc = 1;
    for (size_t i = 2; i <= n; ++i)
        acc *= i;

    return acc; // Начиная с C++14
}
```

Возведение некоторого числа, в степень:

```
template<size_t Exp>
struct pow1
{
    double operator()(double base) const noexcept
    {
        return base * pow1<Exp - 1>{}(base);
    }
}

template <>
struct pow1<0>
{
    double operator()(double base) const noexcept
    {
        return 1.0;
    }
}
```

Компилятор зная степень, подготовит вычисления на этапе компиляции.

Возможные оптимизации:

```

template<size_t Exp>
struct pow2
{
    double operator()(double base) const noexcept
    {
        return (Exp % 2 != 0)
            ? base * pow2<(Exp - 1) / 2>{}(base) * pow2<(Exp - 1) / 2>{}(base)
            : pow2<Exp / 2>{}(base) * pow2<Exp / 2>{}(base);
    }
}

template <>
struct pow2<0>
{
    double operator()(double base) const noexcept
    {
        return 1.0;
    }
}

```

Так же на C++17 можно записать прошлый вариант короче:

```

template <size_t Exp>
struct pow1
{
    double operator()(double base) const noexcept
    {
        if constexpr(Exp == 0)
        {
            return 1.0;
        }
        else
        {
            return base * pow1<Exp - 1>{}(base);
        }
    }
};

```

И для оптимизированной версии:

```

template <size_t Exp>
struct pow2
{
    double operator()(double base) const noexcept
    {
        if constexpr(Exp == 0)
        {
            return 1.0;
        }
    }
}

```

```

        else if constexpr (Exp & 1 != 0)
        {
            return base * pow2<(Exp - 1) / 2>{}(base)
                * pow2<(Exp - 1) / 2>{}(base);
        }
        else
        {
            return pow2<Exp / 2>{}(base)
                * pow2<Exp / 2>{}(base);
        }
    }
};

```

В итоге pow2 почти всегда лучше встроенной функции в компилятор.

Подсчёт бит в числе:

```

constexpr uint8_t popcount(uint64_t value) noexcept
{
    uint8_t res = 0;
    while (value != 0)
    {
        res += value & 1;
        value >>= 1;
    }

    return res;
}

constexpr uint8_t pop_count = popcount(0b010010010); // == 3

```

Наибольший общий делитель:

```

constexpr uint64_t gcd(uint64_t a, uint64_t b) noexcept
{
    while (a != b)
    {
        if (a > b)
        {
            a -= b;
        }
        else
        {
            b -= a;
        }
    }
    return a;
}

```

```
constexpr auto gcd_a_b = gcd(15, 125); // == 5
```

Решето Эратосфена:

```
template <uint64_t N, size_t ...Idx>
constexpr std::array<bool, N + 1> sieve_impl(std::index_sequence<Idx...>) noexcept
{
    //Нужно просто чтобы заполнить массив true:
    std::array<bool, N + 1> primes { (Idx, true)... };
    //В C++20 можно использовать вектора, и это не понадобится.

    primes[0] = primes[1] = false;

    for (size_t i = 2; i * i <= N; ++i)
    {
        if (primes[i])
        {
            for (size_t j = i * i; j <= N; j += i)
                primes[j] = false;
        }
    }
    return primes;
}

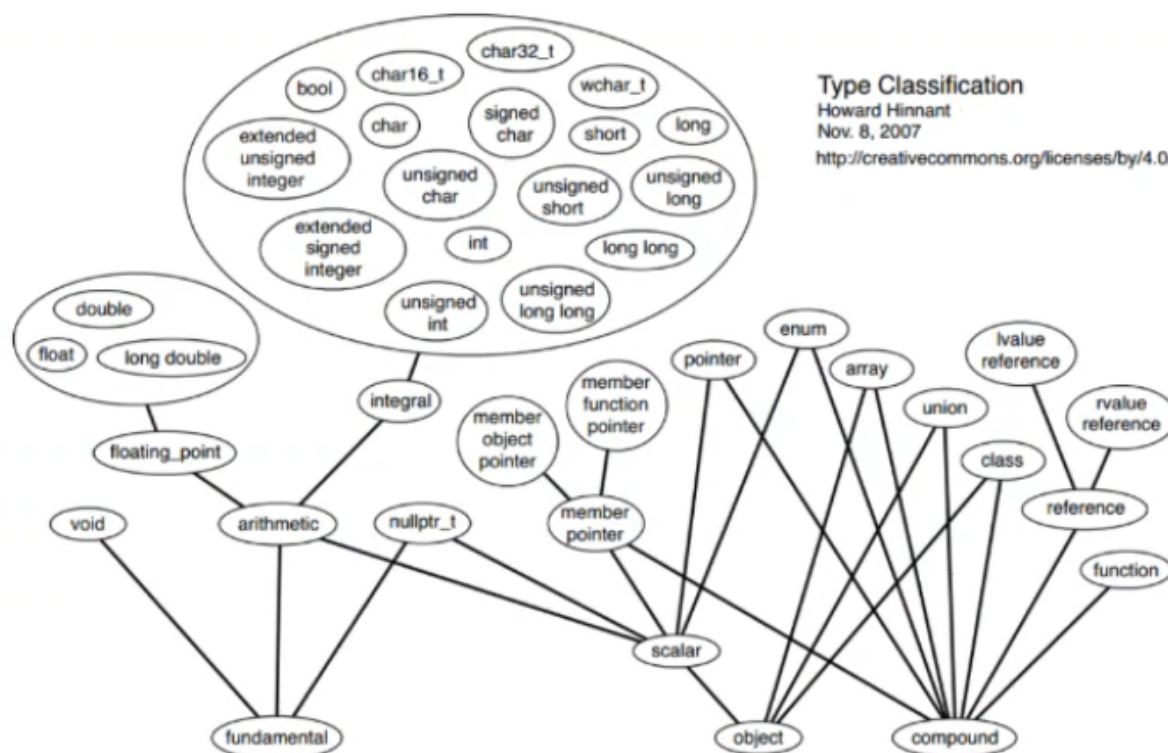
template <uint64_t N, typename Idx = std::make_index_sequence<N + 1>>
constexpr std::array<bool, N + 1> sieve() noexcept
{
    return sieve_impl<N>(Idx {});
}

constexpr auto primes = sieve<5>();
// 0, 1, 4 == false
// 2, 3, 5 == true

//Вывод в поток:
std::copy(primes.begin(), primes.end(),
    std::ostream_iterator<bool> {std::cout, " " });
//0 0 1 1 0 1
```

Compile-time type manipulation (Преобразование с типами)

C++ типы:



Чтобы проверить является ли тип ссылкой - определим метафункцию:

```
template<class T>
struct is_reference
{
    static constexpr bool value = false;
};

template<class T>
struct is_reference<T&>
{
    static constexpr bool value = true;
};

template<class T>
struct is_reference<T&&>
{
    static constexpr bool value = true;
};
```

Может потребоваться вытянуть это значение иначе. Например через вызов функции и cast is_reference в bool.

Чтобы не писать вручную такой код - применяют шаблонную магию integral_constant:


```

template<class T, T v>
struct integral_constant
{
    using value_type = T;
    using type = std::integral_constant<T, v>;

    static constexpr value_type value = v;

    constexpr operator value_type() { return v; } const noexcept
    constexpr value_type operator()() { return v; } const noexcept
};

using true_type = integral_constant<bool, true>;
using false_type = integral_constant<bool, false>;

//Теперь перепишем прошлый код:
template <class T>
struct is_reference : false_type {};

template <class T>
struct is_reference<T&> : true_type {};

template <class T>
struct is_reference<T&&> : true_type {};
//Теперь у нас будет не только ::value
//Но и все необходимые перегрузки в каждом варианте

```

В C++17 ввели шаблонные переменные, в данной ситуации они могут помочь, чтобы каждый раз не писать `is_reference::value`.

```

template<class T>
inline constexpr bool is_reference_v = is_reference<T>::value;

```

Рассмотрим функции, которые есть в стандартной библиотеке:

Primary type categories

- `is_void`
- `is_null_pointer`
- `is_integral`
- `is_floating_point`
- `is_array`
- `is_enum`
- `is_union`
- `is_class`
- `is_function`
- `is_pointer`

- `is_lvalue_reference`
- `is_rvalue_reference`
- `is_member_object_pointer`
- `is_member_function_pointer`

И так же шаблонные переменные с постфиксом `_v`.

Composite type categories

- `is_fundamental`
- `is_arithmetic`
- `is_scalar`
- `is_object`
- `is_compound`
- `is_reference`
- `is_member_pointer`

И так же шаблонные переменные с постфиксом `_v`.

Type properties

- `is_const`
- `is_volatile`
- `is_trivial`
- `is_trivial_copyable`
- `is_standard_layout`
- `is_pod`
- `is_literal_type`
- `has_unique_object_representations`
- `is_empty`
- `is_polymorphic`
- `is_abstract`
- `is_final`
- `is_aggregate`
- `is_signed`
- `is_unsigned`
- `is_bounded_array`
- `is_unbounded_array`

И так же шаблонные переменные с постфиксом `_v`.

Supported operations properties

- `is_constructible`
- `is_trivially_constructible`
- `is_nothrow_constructible`

- `is_default_constructible`
- `is_trivially_default_constructible`
- `is_nothrow_default_constructible`
- `is_copy_constructible`
- `is_trivially_copy_constructible`
- `is_nothrow_copy_constructible`
- `is_move_constructible`
- `is_trivially_move_constructible`
- `is_nothrow_move_constructible`
- `is_assignable`
- `is_trivially_assignable`
- `is_nothrow_assignable`
- `is_copy_assignable`
- `is_trivially_copy_assignable`
- `is_nothrow_copy_assignable`
- `is_move_assignable`
- `is_trivially_move_assignable`
- `is_nothrow_move_assignable`
- `is_destructible`
- `is_trivially_destructible`
- `is_nothrow_destructible`
- `is_default_destructible`
- `has_virtual_destructor`
- `is_swappable_with`
- `is_swappable`
- `is_nothrow_swappable_with`
- `is_nothrow_swappable`

И так же шаблонные переменные с постфиксом `_v`.

Type relationships

- `is_same`
- `is_base_of`
- `is_convertible`
- `is_nothrow_convertible`
- `is_invocable`
- `is_invocable_r`
- `is_nothrow_invocable`

И так же шаблонные переменные с постфиксом `_v`.

Property queries

- `alignment_of` - работает как `alignof`
- `rank` - число элементов массива

- extent - сколько размерностей внутри массива

И так же шаблонные переменные с постфиксом _v.

Type transformations

Другой вариант использования - это преобразование типа:

```
template <class T>
struct remove_reference
{
    using type = T;
};

template <class T>
struct remove_reference<T&>
{
    using type = T;
};

template <class T>
struct remove_reference<T&&>
{
    using type = T;
};

//Начиная с C++14
template <class T>
using remove_reference_t = typename remove_reference<T>::type;
```

Наподобии с неявным правилом constexpr value, здесь так же есть неявное правило using type.

Список метафункций из стандартной библиотеки:

- remove_const
- remove_volatile
- remove_cv
- add_const
- add_volatile
- add_cv
- remove_reference
- add_lvalue_reference
- add_rvalue_reference
- remove_cvref
- remove_pointer
- add_pointer
- make_signed
- make_unsigned

- remove_extent
- remove_all_extents
- decay
- conditional
- underlying_type
- common_type
- result_of
- invoke_result

И так же есть специальные перегрузки с постфиксом `_t`.

Для чего это может быть нужно:

```
template <class T, class Alloc = std::allocator<T>>
class vector
{
public:
    template <class ...Args>
    T& emplace_back(Args ...args);
};

template <class ...Args>
T& vector::emplace_back(Args ...args)
{
    if (size() == capacity())
    {
        const auto oldCap = capacity();
        const auto newCap = computeGrowth(oldCap + 1);
        auto *newVec = allocator_traits<Alloc>::allocate(al, newCap);
        allocator_traits<Alloc>::construct(al, newVec, oldCap + 1,
                                           forward<Args>(args)...);

        if constexpr (is_nothrow_move_constructible_v<T>
                      || !is_copy_constructible_v<T>)
        {
            uninitialized_move(begin(), end(), ptr);
        }
        else
        {
            uninitialized_copy(begin(), end(), ptr);
        }

        //Освобождение старых объектов и региона памяти
        change_array(newVec, size() + 1, newCap);
    }
}
```

Curiously recurring template pattern : CRTP

```
template <class T>
struct Base
{
};

struct Derived : Base<Derived>
{
};
```

Проблемная ситуация, для которой нужна такая странная композиция:

```
template <class T = intmax_t>
class Rational
{
    T m_num = T(0), m_denom = T(1);

public:
    Rational() = default;

    explicit Rational(T num, T denom = T(1))
        : m_num { num }
        , m_denom { denom }
    { ... }

    friend bool operator<(const Rational<T>& l, const Rational<T>& r) noexcept
    {
        const auto lcm = std::lcm(l.m_denom, r.m_denom);
        return l.m_num * (lcm / l.m_denom)
            < r.m_num * (lcm / r.m_denom);
    }
}

//Однако возникает сложность, если требуется оператор >
```

Пример из boost:

```
template <class T>
struct less_than_comparable
{
    friend bool operator>(const T& l, const T& r) noexcept
    {
        return r < l;
    }
    friend bool operator<=(const T& l, const T& r) noexcept
    {
        return !(r < l);
    }
    friend bool operator>=(const T& l, const T& r) noexcept
    {
        return !(l < r);
    }
};
```

```

    }

    template <class T = uint64_t>
    class Rational : less_than_comparable<Rational<T>>
    { //Класс объявлен выше с операцией <
    };

    //Обобщенная задача решена!
}

```

Так же эта идеома применима при статическом полиморфизме, но это не даёт большого прироста производительности.

SFINAE (Subsituation Failure Is Not An Error)

```

template <class Container>
void printContainer(const Container& cont)
{
    if (!cont.empty())
    {
        std::cout << "(";

        for (const auto& value: cont)
        {
            std::cout << " " << value;
        }

        std::cout << ")";
    }
}

```

Примитивные типы элементов из листа\вектора\дека - работают из коробки.

Для своего класса потребуется только определить оператор <<.

Для set\unordered всё работает из коробки.

Для map\unordered потребуется определить оператор << для пары.

Однако если попробовать использовать std::stack в качестве контейнера - возникнет ошибка компиляции. Это произойдёт потому что у него нет функций begin\end.

Нужно сделать защиту, чтобы нельзя был использовать не итерируемый тип Container:

```

template <class Container,
          class It = typename Container::const_iterator>
void printContainer(const Container& cont)
{

```

```

    if (!cont.empty())
    {
        std::cout << "(";

        for (const auto& value: cont)
        {
            std::cout << " " << value;
        }

        std::cout << ")";
    }
}

//Использование It не даст собраться нежелательным вызовам:
void printContainer(1);
void printContainer(std::stack<int>{1});
//И будут выведены понятные сообщения об ошибке

```

Альтернативный метод реализации SFINAE через std::enable_if:

```

template <bool Cond, class T = void>
struct enable_if {};

template <class T>
struct enable_if<true, T>
{
    using type = T;
};

template <bool Cond, class T = void>
using enable_if_t = typename enable_if<Cond, T>::type;

```

Где это необходимо:

```

template <typename It>
using ItTag = typename std::iterator_traits<It>::iterator_category;

// Не будет работать с итераторами не random access
template <class It, class Diff,
         std::enable_if_t<std::is_base_of_v<
            std::random_access_iterator_tag, ItTag<It>>,
            int> = 0>
It next(It it, Diff n) noexcept
{
    return it + n;
}

// Данный экземпляр будет вызван например для list

```



```

template <class It, class Diff,
          std::enable_if_t<std::is_same_v<
            std::bidirectional_iterator_tag, ItTag<It>>,
            int> = 0>

It next(It it, Diff n) noexcept
{
    for (; n > Diff(0); --n)
        ++it;

    for (; n < Diff(0); ++n)
        --it;

    return it;
}

// input или forward итераторы
template <class It, class Diff,
          std::enable_if_t<std::is_same_v<std::input_iterator_tag, ItTag<It>>
            || std::is_same_v<std::forward_iterator_tag,
            ItTag<It>>>,
            int> = 0>

It next(It it, Diff n) noexcept
{
    assert(n >= 0);
    for (; n != Diff(0); --n)
        ++it;

    return it;
}

```

Tag dispatch

Был придуман, чтобы выглядеть удобнее.

Подготовка функций:

```

template <typename It, class Diff>
It next_impl(It it, Diff n, std::input_iterator_tag)
{
}

template <typename It, class Diff>
It next_impl(It it, Diff n, std::bidirectional_iterator_tag)
{
}

template <typename It, class Diff>

```

```
It next_impl(It it, Diff n, std::random_access_iterator_tag)
{
}
```

Основная функция:

```
template<typename It>
using ItTag = typename std::iterator_traits<It>::iterator_category;

template <typename It, class Diff>
It next(It it, Diff n)
{
    return (it, n, ItTag<It>{});
}
```

Вариант реализации, с использованием if constexpr:

```
template<typename It>
using ItTag = typename std::iterator_traits<It>::iterator_category;

template <typename It, class Diff>
It next(It it, Diff n)
{
    if constexpr(std::is_base_of_v<std::random_access_iterator_tag, ItTag<It>>)
    {} //Для random access итераторов
    else if constexpr(std::is_same_v<std::bidirectional_iterator_tag, ItTag<It>>)
    {} //Для bidirectional итераторов
    else
    {} //Для input and forward итераторов
}
```

Практический пример основанный на SFINAE

Ленивые вычисления. У нас функтор инициализатор, и есть optional - в котором значение либо уже проинициализированно, либо ещё нет. Есть потребность проверить, является возвращаемый результат void или ссылкой, т.е. optional не умеет работать со ссылками, для этого используем reference_wrapper. Всё это реализуется кодом ниже:

```
#include <optional>
#include <functional>

template <class T>
using OptRefType =
std::optional<std::reference_wrapper<std::remove_reference_t<T>>>;

template <class Func>
```

```

class Lazy
{
    using ResultType = std::invoke_result_t<Func>;
    using OptionalType = std::conditional_t<std::is_void_v<ResultType>, bool,
        std::conditional_t<std::is_reference_v<ResultType>,
        OptRefType<ResultType>, std::optional<ResultType>>>;

    Func m_initializer;
    OptionalType m_value;

public:

    Lazy(Func&& init) : m_initializer { std::forward<Func>(init) }
    {}

};

```

Теперь, как возвращать значение: оно может быть результирующим типом или void. Для этого используем SFINAE

```

template <class Func>
class Lazy
{
public:

    template <class T = ResultType, std::enable_if_t<!std::is_void_v<T>, int> = 0>
    ResultType operator()()
    {
        if (m_value)
            return *m_value;

        return m_value.emplace(m_initializer());
    }

    template <class T = ResultType, std::enable_if_t<std::is_void_v<T>, int> = 0>
    void operator()()
    {
        if (m_value)
            return;

        m_value = true;
        m_initializer();
    }

};

```

Пример использования:

```
// C++ 14: Не удастся автоматически deduce типа Func
// Потому необходим CreateLazy + auto idx = CreateLazy([]{});
template <class Func>
Lazy<Func> CreateLaxy(Func&& f)
{
    return { std::forward<Func>(f); };
}

auto idx = CreateLazy([] {auto i = 0; return i;});

// C++ 17: может вывести всё без templatre CreateLazy
Lazy idx { []{...} };

// Использование: (оба стандарта языка)
if (.... & idx())
{
    ....
}
```

Special metafunctions

В примерах выше была реализованна функция equalsAny, которая сравнивала произвольное количество, произвольных типов.

Теперь реализуем её вариант, когда необходимо чтобы все типы были идентичными:

```
template <class T1, class T2, class ...TN,
         class = std::enable_if_t< (std::is_same_v<T1, T2>
                                     && ... && std::is_same<T1, TN>)>>

bool equalsAny(const T1& t1, const T2& t2, const TN&... tN) noexcept
{
}
```

Проблема такого метода в раскрутке свертки, она может быть дорого стоит компилятору.

Решаются подобные задачи с помощью функций из C++17:

- std::conjunction_v - конъюнкция (соединение через логическое И)
- std::disjunction - дизъюнкция (соединение через логическое ИЛИ)
- std::negation - отрицание

Метод исправить этот недостаток:

```
template <class T1, class T2, class ...TN,
         class = std::enable_if_t< std::conjunction_v<std::is_same<T1,T2>,
                                     std::is_same<T1, TN>...>>>
```

```
bool equalsAny(const T1& t1, const T2& t2, const TN&... tN) noexcept
{
}
```

void_t

```
//Не именованный шаблон pack
template <class ...>
using void_t = void;

//Если в него протолкнуть что угодно, он вернёт void:
void_t<int, unsigned long long, float,
        double, SomeClass, std::vector<int>,
        std::stack<bool>>; //void
```

Проблема:

```
int* pi = nullptr;
float* pf = nullptr;

std::vector<int*> vi;
std::vector<float*> vf;

// Допустим нам нужна перегрузка, чтобы вектор мог сравниваться
// с нижележащим типом: Некоторая реализация std::all_of
bool result = equalsAny(nullptr, pi, pf, vi, vf);
//Из коробки, это не будет работать
```

Чтобы защититься от проблем, нужно применить SFINAE, который позволит получать лаконичные сообщения об ошибке:

```
template <class T1, class T2, class... TN,
        class = void_t<decltype(std::declval<T1&>() == std::declval<T2&>()),
                        decltype(std::declval<T1&>() == std::declval<T2&>())...>

bool equalsAny(const T1& t1, const T2& t2, const TN&... tN) noexcept
{
    //Начиная с C++17 можно обрмить выражение в скобки ( )
    return ( (t1 == t2) || ... || (t1 == tN) );
}
```

declval это шаблонная функция без тела. Рассмотрим применение declval. Допустим у нас есть две структуры Default и NonDefault:

```

template <class T>
std::add_rvalue_reference<T>_t declval();

struct Default { int foo() const { return 1; } };

struct NonDefault {
    NonDefault(const NonDefault&) {}
    int foo() const { return 1; }
}

decltype(Default.foo()) i1 = 1; // type = int
decltype(NonDefault().foo()) i2 = i1; // Compile error

decltype(std::declval<NonDefault>().foo()) i2 = i1; // type = int

```

Важно! declval работает только внутри:

- decltype
- sizeof
- typeid
- noexcept

Т.е. в тех операторах, где выражение не вычисляется.

Detectors

Проверка на то, что контейнер может итерироваться:

```

template <class T, typename = void>
struct is_iterable: std::false_value
{
};

template <class T>
struct is_iterable<T, std::void_t<
    decltype(std::begin(std::declval<T>())),
    decltype(std::end(std::declval<T>()))>>
    : std::true_type
{
};

template <class T>
inline constexpr auto is_iterable = is_iterable<T>::value;

static_assert(is_iterable<std::vector<int>>); // ok
static_assert(is_iterable<std::list<int>>); // ok
static_assert(is_iterable<std::map<int, int>>); // ok
static_assert(is_iterable<std::stack<int>>); // compile time error

```

Если требуется так же проверять есть ли возможность `rbegin\rend`:

```
template <class T, typename = void>
struct is_reverse_iterable: std::false_value
{
};

template <class T>
struct is_reverse_iterable<T, std::void_t<
    decltype(std::begin(std::declval<T>())),
    decltype(std::end(std::declval<T>())),
    decltype(std::rbegin(std::declval<T>())),
    decltype(std::rend(std::declval<T>()))>>
    : std::true_type
{
};

template <class T>
inline constexpr auto is_reverse_iterable_v = is_reverse_iterable<T>::value;

static_assert(is_iterable<std::vector<int>>); // ok
static_assert(is_iterable<std::list<int>>); // ok
static_assert(is_iterable<std::map<int, int>>); // ok
static_assert(is_iterable<std::forward_list<int>>); // compile time error
```

Для того чтобы сделать обобщенный вариант, когда не нужно будет определять 2 структуры каждый раз, придумали детекторы:

```
template <class Default, class AlwaysVoid, template <class...> class Op, class
...Args>
struct detector
{
    using value_t = std::false_type;
    using type = Default;
}

template <class Default, template<class ...>, class Op, class... Args>
struct detector<Default, std::void_t<Op<Args...>>, Op, Args>
{
    using value_t = std::true_type;
    using type = Op<Args...>;
}

struct nonesuch
{
    nonesuch() = delete;
    nonsuch(const nonesuch&) = delete;
    nonsuch(nonesuch&&) = delete;
    nonesuch& operator=(const nonesuch&) = delete;
```

```
nonesuch& operator=(nonesuch&&) = delete;
};
```

Где Op - это метафункция, например `std::is_same`, а Args - это наши типы, например T1\T2.

Далее:

```
template <template <class ...> class Op, class... Args>
using is_detected = typename detector<nonesuch, void, Op, Args...>::value_t;

template <template<class...> class Op, class... Args>
inline constexpr bool is_detected_v = is_detected<Op, Args...>::value;

template<template<class...> class Op, class.. Args>
using detected_t = typename detector<nonesuch, void, Op, Args...>::type;

template <class Default, template<class...> class Op, class... Args>
using detected_or = detector<Default, void, Op, Args...>;

template <class Default, template<class ...> class Op, class... Args>
using detected_or_t = typename detected_or<Default, Op, Args...>::type;
```

Как это использовать:

```
template <class T>
using free_begin = decltype(std::begin(std::declval<T>()));

template <class T>
using free_end = decltype(std::end(std::declval<T>()));

template <class T>
using free_rbegin = decltype(std::rbegin(std::declval<T>()));

template <class T>
using free_rend = decltype(std::rend(std::declval<T>()));

template <class T>
inline constexpr auto is_iterable_v = is_detected_v<free_begin, T>
&& is_detected_v<free_end, T>;

template <class T>
inline constexpr auto is_reverse_iterable_v = is_detected_v<free_rbegin, T>
&& is_detected_v<free_rend, T>;
```

Для того чтобы проверить, что в нашем классе есть функция foo:


```
template <class T>
using v_foo_v = decltype(std::declval<T&>().foo());

template <class T>
using v_foo_i = decltype(std::declval<T&>().foo(std::declval<int>()));

template <class T>
inline constexpr bool has_foo = is_detected_v<v_foo_v, T>
                                && is_detected_v<v_foo_i, T>;
```

Детекторы позволяют делать проверку, что наши объекты соответствуют нашим ожиданиям. В C++20 появятся концепты, которые так же позволяют решать данные задачи.

STL

Базовая структура STL

- Контейнеры
- Итераторы
- Алгоритмы
- Адаптеры
- Функциональные объекты

Контейнеры

- Последовательные
- Упорядоченные ассоциативные
- Неупорядоченные ассоциативные
- Адаптеры

std::allocator

Изначально алокаторы появились для того чтобы проще было работать со старой моделью памяти, в которой существовали ближние и дальние указатели. Но на текущий момент у них другие задачи.

Рассмотрим пример реализации:

```
template <class T>
struct allocator { ... };

template <class Alloc>
struct allocator_traits
{
    using allocator_type = Alloc;
    using value_type = Alloc::value_type;
```

```

using pointer = Alloc::pointer;
using const_pointer = Alloc::const_pointer;
using difference_type = Alloc::difference_type;
using size_type = Alloc::size_type;

[[nodiscard]] static pointer allocate(Alloc& a, size_type n);

static void deallocate(Alloc& a, pointer p, size_type n);

template <class T, class... Args>
static void construct(Alloc& a, T* p, Args&&... args);

template<class T>
static void destroy(Alloc& a, T* p);
}

```

Allocator умеет:

- Аллоцировать кусок памяти через функцию `allocate`
- Очищать аллоцированную память через `deallocate`
- Через функцию `construct` формируется объект (placement new)
- Разрушать объект, через функцию `destroy`

Начиная с C++11 эти функции были перенесены в `allocator_traits`, а так же были добавлены `using`'и для шаблонной магии.

Пример использования:

```

#include <memory>

std::allocator<int> a1; //Стандартный алокатор для int
int* p = a1.allocate(1); //алокация памяти для 1 элемента
a1.construct(p, 7); //Конструирование и инициализация

std::cout << *p; // 7

using prev_alloc = decltype(a1);
std::allocator<std::allocator_traits<prev_alloc>::value_type> a2;

a2.deallocate(p, 1); //Этот код корректен, алокаторы не хранят состояния

```

Контейнеры используют алокаторы как второй шаблонный параметер.

Последовательные контейнеры

`std::vector`

Вектор хранит объекты типа `T` в динамически выделенной памяти.

```
template <class T, class Alloc = std::allocator<T>>
class vector
{
    using value_type = T;
    using allocator_type = Alloc;
    using size_type = std::size_t;
    using difference_type = std::ptrdiff_t;
    using reference = value_type&;
    using const_reference = const value_type&;
    using pointer = std::allocator_traits<Alloc>::pointer;
    using const_pointer = std::allocator_traits<Alloc>::const_pointer;

    //+ итераторы (о них позже)
};
```

Функции класса вектор можно разбить на 4 типа.

Доступ к элементам:

- at, operator[] - асимптотическая сложность $O(1)$
- data - асимптотическая сложность $O(1)$
- front, back - асимптотическая сложность $O(1)$

Функция at может бросить исключение, если вышли за границы, operator[] - нет.

Размеры (capacity):

- empty - асимптотическая сложность $O(1)$
- size, max_size, capacity - асимптотическая сложность $O(1)$
- resize, reserve, shrink_to_fit - асимптотическая сложность $O(n)$

При инициализации вектора при помощи std::initializer_list или {} - capacity равно его размеру.

При resize происходит изменение размера вектора, новые элементы (выше прошлого size()) заполняются дефолтным значением.

При reserve происходит увеличение capacity, но не size.

Функция shrink_to_fit делает capacity = size, т.е. обрезает лишнюю память.

Модификаторы (modifiers):

- clear, erase - асимптотическая сложность $O(n)$
- insert, emplace, push_back - асимптотическая сложность $O(1)$ или $O(n)$
- emplace_back, pop_back - асимптотическая сложность $O(1)$
- swap - асимптотическая сложность $O(1)$

Разница в асимптотической сложности push_back итд связана с тем нужна ли реаллокация, или нет. Если требуется сделать вставку не в конец, insert\emplace тоже работают за $O(n)$, иначе $O(1)$.

Emplace и emplace_back формируют объект при помощи perfect forwarding.

Аллокатор:

- `get_allocator` - асимптотическая сложность $O(1)$

`std::array`

Отличается от вектора тем, что хранит элементы на стеке, а не в динамически выделенной памяти.

```
template <class T, size_t N>
struct array
{
    using value_type = T;
    using size_type = std::size_t;
    using difference_type = std::ptrdiff_t;
    using reference = value_type&;
    using const_reference = const value_type&;
    using pointer = T*;
    using const_pointer = const T*;

    //+ итераторы (о них позже)
};
```

В отличие от сырых массивов его можно передавать как по значению, так и по ссылке, и в первом случае он будет копироваться.

`std::array` содержит 3 группы функций.

Доступ к элементам:

- `at`, `operator[]` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `data` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `front`, `back` - асимптотическая сложность $O(1)$

Размер (capacity):

- `empty` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `size`, `max_size` - асимптотическая сложность $O(1)$

Модификаторы:

- `swap` - асимптотическая сложность $O(n)$

`std::forward_list`

Представляет однонаправленный список. Так же использует аллокатор как вектор и содержит все те же `using`'и, для метапрограммирования.

У него есть 5 групп функций.

Доступ к элементам:

- front - асимптотическая сложность $O(1)$

Размер:

- empty - асимптотическая сложность $O(1)$
- max_size - асимптотическая сложность $O(1)$
- resize - асимптотическая сложность $O(n)$

Модификаторы:

- clear - асимптотическая сложность $O(n)$
- erase_after - асимптотическая сложность $O(1)-O(n)$
- insert_after - асимптотическая сложность $O(1)-O(n)$
- push_front, emplace_after, emplace_front - асимптотическая сложность $O(1)$
- pop_front - асимптотическая сложность $O(1)$
- swap - асимптотическая сложность $O(1)$
- merge - асимптотическая сложность $O(n)$

Merge переносит все элементы из листа переданного в качестве аргумента функции, второй лист становится пустым.

Встроенные алгоритмы:

- splice_after - асимптотическая сложность $O(1)-O(n)$
- remove, remove_if - асимптотическая сложность $O(n)$
- reverse - асимптотическая сложность $O(n)$
- sort - асимптотическая сложность $O(n \log n)$
- unique - асимптотическая сложность $O(n)$

Функция splice_after работает схоже с merge, но можно задать позицию для вставки.

Функции remove\remove_if - удаление диапазона.

Функция unique - оставляет только уникальные значения, однако перед тем как её вызвать нужно обязательно отсортировать элементы, функцией sort.

Аллокатор:

- get_allocator - асимптотическая сложность $O(1)$

std::list

Похож на std::forward_list - но умеет двигаться в обоих направлениях. Это приводит к тому что он занимает больше места в памяти, но у него появляются новые функции.

У него тоже есть 5 групп функций.

Доступ к элементам:

- front, back - асимптотическая сложность $O(1)$

Размер:

- `empty` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `max_size` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `resize` - асимптотическая сложность $O(n)$

Модификаторы:

- `clear` - асимптотическая сложность $O(n)$
- `erase` - асимптотическая сложность $O(n)$
- `insert` - асимптотическая сложность $O(1)$ - $O(n)$
- `push_front`, `push_back`, `emplace`, `emplace_front`, `emplace_back` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `pop_front`, `pop_back` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `swap` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `merge` - асимптотическая сложность $O(n)$

Встроенные алгоритмы:

- `splice_after` - асимптотическая сложность $O(1)$ - $O(n)$
- `remove`, `remove_if` - асимптотическая сложность $O(n)$
- `reverse` - асимптотическая сложность $O(n)$
- `sort` - асимптотическая сложность $O(n \log n)$
- `unique` - асимптотическая сложность $O(n)$

Аллокатор:

- `get_allocator` - асимптотическая сложность $O(1)$

`std::deque`

Дек - двусторонняя очередь (стек + очередь). Саму структуру возможно реализовать через `std::list`, однако последний не дружелюбен к кэшированию, т.к. элементы не хранятся блоком памяти.

Другой возможный способ - это реализация через массив указателей на chunk'и.

Содержит 4 группы функций:

Доступ:

- `at`, `operator[]` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `front`, `back` - асимптотическая сложность $O(1)$

Размер:

- `empty` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `size`, `max_size` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `resize`, `shrink_to_fit` - асимптотическая сложность $O(n)$

Модификаторы:

- `clear`, `erase` - асимптотическая сложность $O(n)$
- `insert`, `emplace`, `push_front`, `push_back`, $O(1)$, $O(n)$
- `emplace_front`, `emplace_back`, `pop_front`, `pop_back` - асимптотическая сложность $O(n)$
- `swap` - асимптотическая сложность $O(1)$

Аллокатор:

- `get_allocator`

Упорядоченные ассоциативные контейнеры

Поиск в последовательных контейнерах достаточно тяжелая операция, более эффективная структура для поиска элементов - дерево.

`std::set` / `std::multiset`

```
template <class Key, class Compare = std::less<Key>,  
          class Alloc = std::allocator<T>>  
  
class set  
{  
    using key_type = Key;  
    using value_type = Key;  
    using key_compare = Compare;  
    using value_compare = Compare;  
    //И все остальные using'и, которые были в std::vector  
}
```

Реализация сета это красно-черное дерево даёт сбалансированное бинарное дерево поиска, благодаря этом средняя скорость поиска имеет логарифмическую сложность.

Содержит 5 групп функций:

Размер:

- `empty` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `size`, `max_size` - асимптотическая сложность $O(1)$

Модификаторы:

- `clear` - асимптотическая сложность $O(n)$
- `erase` - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(\log n)$, $O(n)$
- `insert`, `emplace` - асимптотическая сложность $O(\log n)$
- `emplace_hint` - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(\log n)$
- `swap` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `merge` - асимптотическая сложность $O(n \log n)$
- `extract` - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(\log n)$

Удаление при помощи `erase` по итератору работает за константное время, если удаление по ключу - то логарифмическое, и если последний случай с `multiset` тогда за линейное время.

Так же определяется асимптотическая сложность `extract`.

Функция `emplace_hint` может быть использована, чтобы "подсказать" куда вставить элемент - если позиция будет верная - тогда вставка будет за константное время, иначе - логарифмическое.

Важное замечание: `extract\insert` можно использовать только между контейнерами с одинаковыми алокаторами, иначе это `undefined behavior`.

Поиск \ нахождение элементов по условиям (Lookup):

- `count`, `find`, `contains`, `equal_range` - асимптотическая сложность $O(\log n)$
- `lower_bound`, `upper_bound` - асимптотическая сложность $O(\log n)$

`Contains` появилась в C++20 и возвращает `bool`, в остальном работая как `count`.

Функция `lower_bound` для ключа возвращает итератор на элемент, который не меньше по компаратору с переданным.

Функция `upper_bound` для ключа возвращает итератор на элемент, который больше чем заданный.

Наблюдатели (Observers):

- `key_comp`, `value_comp` - асимптотическая сложность $O(1)$

Алокатор:

- `get_allocator` - асимптотическая сложность $O(1)$

`std::map` / `std::multimap`

```
template <class Key, class T, class Compare = std::less<Key>,
          class Alloc = std::allocator<std::pair<const Key, T>>>

class map
{
    using key_type = Key;
    using mapped_type = T;
    using value_type = std::pair<const Key, T>;
    using key_compare = Compare;
    using value_compare = Compare;
    //И все остальные using'и, которые были в std::vector
}
```

Есть 6 групп функций `std::map`.

Доступ к элементам:

- `at`, `operator[]` - асимптотическая сложность $O(\log n)$

`operator[]` может использоваться для добавления нового элемента, не только для получения существующего.

Размер\длина:

- `empty` - асимптотическая сложность $O(1)$
- `size`, `max_size` - асимптотическая сложность $O(1)$

Модификаторы:

- clear - асимптотическая сложность $O(n)$
- erase - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(\log n)$, $O(n)$
- insert, insert_or_assign, emplace, try_emplace - $O(\log n)$
- emplace_hint - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(\log n)$
- swap - асимптотическая сложность $O(1)$
- merge - асимптотическая сложность $O(n \log n)$
- extract - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(\log n)$

Почти всё действует как в `std::set`.

Функция `insert_or_assign` работает как оператор `[]`, отличие в том что возвращается пара - итератор на вставленный элемент и `bool` определяющий был ли вставлен элемент.

Функция `try_emplace` - пытается создать объект на месте, но если он уже создан - не будет делать ничего

Поиск:

- count, find, contains, equal_range - асимптотическая сложность $O(\log n)$
- lower_bound, upper_bound - асимптотическая сложность $O(\log n)$

Наблюдатели (observers):

- key_comp, value_comp - асимптотическая сложность $O(1)$

Аллокатор:

- get_allocator - асимптотическая сложность $O(1)$

Неупорядоченные ассоциативные контейнеры

Особенность неупорядоченных ассоциативных контейнеров заключается в том, что они используют хэш-функцию, для хранения ключей. Это позволяет добиться более быстрого доступа к элементам, в среднем за константное время.

`std::unordered_set**`**

```
template <class Key, class Hash = std::hash<Key>,
         class KeyEqual = std::equal_to<Key>,
         class Allocator = std::allocator<Key>>
class unordered_set
{
    //Те же самые using что и в std::set
}
```

Содержит те же 5 групп функций, что и `std::set`:

Размер:

- empty - асимптотическая сложность $O(1)$

- size, max_size - асимптотическая сложность $O(1)$

Модификаторы:

- clear - асимптотическая сложность $O(1)$
- erase - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(\log n)$, $O(n)$
- insert, emplace - асимптотическая сложность $O(1)$
- emplace_hint - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(\log n)$
- swap - асимптотическая сложность $O(1)$
- merge - асимптотическая сложность $O(n)$
- extract - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(n)$

Поиск \ нахождение элементов по условиям (Lookup):

- count, find, contains, equal_range - асимптотическая сложность $O(\log n)$
- lower_bound, upper_bound - асимптотическая сложность $O(\log n)$

Наблюдатели (Observers):

- key_eq, hash_function - асимптотическая сложность $O(1)$

Аллокатор:

- get_allocator - асимптотическая сложность $O(1)$

****std::unordered_map ****

```
template <class Key, class Hash = std::hash<Key>,
          class KeyEqual = std::equal_to<Key>,
          class Allocator = std::allocator<Key>>
class unordered_map
{
    //Те же самые using что и в std::map

    using hasher = Hash;
    using key_equal = KeyEqual;
}
```

Присутствуют те же 6 групп функций как и в std::map.

Доступ к элементам:

- at, operator[] - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(n)$

Размер\длина:

- empty - асимптотическая сложность $O(1)$
- size, max_size - асимптотическая сложность $O(1)$
- reserve - асимптотическая сложность $O(n)$, $O(n^2)$

Модификаторы:

- clear - асимптотическая сложность $O(n)$
- erase - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(n)$
- insert, insert_or_assign, emplace, try_emplace - $O(\log n)$
- emplace_hint - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(\log n)$
- swap - асимптотическая сложность $O(1)$
- merge - асимптотическая сложность $O(n)$
- extract - асимптотическая сложность $O(1)$, $O(\log n)$

Поиск:

- count, find, contains, equal_range - асимптотическая сложность $O(\log n)$
- lower_bound, upper_bound - асимптотическая сложность $O(\log n)$

Наблюдатели (observers):

- key_eq, hash_function - асимптотическая сложность $O(1)$

Аллокатор:

- get_allocator - асимптотическая сложность $O(1)$

Функции load factor, max load factor позволяют регулировать количество элементов на bucket'е. По умолчанию это 1.0. Значение больше - создаст больше коллизий, но потребует меньше памяти, значение меньше - наоборот.

Адаптеры

Это разновидность контейнеров, которые могут использовать для своей реализации другой класс контейнера.

std::stack

```
template <class T,
          class Container = std::deque<T>>

class stack
{
    using container_type = Container;
    //value_type, size_type, reference, const_reference

    Container c;
}
```

Функции:

- top - $O(1)$

Элемент на вершине стека.

- empty - $O(1)$

- size - $O(1)$
- swap - как в контейнере ниже
- push, emplace - как в контейнере ниже push_back, emplace_back
- pop - как в контейнере pop_back

Условиям функций соответствуют помимо `std::deque`, `std::vector` и `std::list`.

std::queue

Функции:

- front, back - $O(1)$
- empty - $O(1)$
- size - $O(1)$
- swap - как в контейнере ниже
- push, emplace - сложность как в контейнере ниже у функций push_back, emplace_back
- pop - сложность как в контейнере ниже у pop_front

Типы доступных контейнеров: deque, list. std::vector нельзя, у него нет pop_front.

std::priority_queue

Очередь с приоритетом. По умолчанию нижележащий контейнер это std::vector.

```
template <....
    class Compare = std::less<typename Container::value_type>>
class priority_queue
{
}; // Остальные using схожие
```

Функции:

- top - $O(1)$
- empty - $O(1)$
- size - $O(1)$
- swap - как в контейнере ниже
- push, emplace - как в контейнере ниже push_back, emplace_back
- pop - как в контейнере pop_back

Помимо `std::vector` могут быть использованы `std::list`, `std::deque`. Очередь с приоритетом реализуется через кучу, она похожа на дерево. На вершине находится максимальный элемент, слева максимальный наследник, справа минимальный наследник.

Итераторы

Итераторы это обобщенные указатели, которые используются для унифицированного доступа к контейнерам (и не только).

InputIterator:

- `std::istream`

ForwardIterator:

- `std::forward_list`
- `std::unordered_set`
- `std::unordered_map`
- `std::unordered_multiset`
- `std::unordered_multimap`

BidirectionalIterator:

- `std::list`
- `std::set`
- `std::multiset`
- `std::map`
- `std::multimap`

RandomAccess \ ContinuesIterator (C++17):

- `std::array`
- `std::vector`
- `std::string`
- `std::string_view`
- `std::valarray`

OutputIterator:

- `std::ostream`

Последовательность первых 5 итераторов иерархична, и каждая следующая группа имеет больше возможностей, чем предшествующая.

InputIterator

```
//std::istream& is;

std::istreambuf_iterator it {is};
std::istreambuf_iterator<char> end;

//size_t count = std::distance(it, end); //O(n)
//Если строчку выше раскомментировать, то buf окажется пустой, т.к. it смещён!

std::string buf {it, end};
```

```
std::vector<int> v { std::istreambuf_iterator<int> { is },
                  std::istreambuf_iterator<int> {}};
```

ForwardIterator

У него есть перегруженная функция ++, но отсутствует --.

Оператор += не перегружен, но его эффекта можно достичь при помощи std::next \ std::advance.

Любой контейнер можно сконструировать используя итераторы, таким образом можно из std::forward_list или std::unordered_map создать вектор, с соответствующей нижележащей структурой.

BidirectionalIterator

В дополнение имеет перегрузку --. Для смещения на несколько элементов можно использовать std::prev // std::advance.

Контейнеры имеют реверсированные итераторы rbegin \ rend.

RandomAccessIterator

В дополнение перегружены операторы +=, -=. Но prev\next\advance - работают так же.

OutputIterator

```
std::string buf { "text" };

std::ostream& os;

std::copy(buf.begin(), buf.end(), os); //Копирует строку в поток
```

std::iterator_trait

Структуры для метапрограммирования, позволяющие узнать тип итератора.

```
template <class Iter>
struct iterator_traits
{
    using difference_type = typename Iter::difference_type;
    using value_type = typename Iter::value_type;
    using pointer = typename Iter::pointer;
    using reference = typename Iter::reference;
    using iterator_category = typename Iter::iterator_category;
};

template <class T>
struct iterator_traits<T*>
{
    using difference_type = ptrdiff_t;
    using value_type = T;
    using pointer = T*;
    using reference = T&;
};
```

```
using iterator_category = random_access_iterator_tag;
}
```

Существует 6 типов итератор тэгов:

- input_iterator_tag
- forward_iterator_tag - наследует предшествующий
- bidirectional_iterator_tag - наследует предшествующий
- random_access_iterator_tag - наследует предшествующий
- continues_iterator_tag - наследует предшествующий
- output_iterator_tag

```
template <typename It>
using it_cat = typename std::iterator_traits<It>::iterator_category;

template <typename It>
using it_diff = typename std::iterator_traits<It>::difference_type;

template <class It>
auto distance(It first, It last, std::input_iterator_tag)
{
    it_diff<It> dist = 0;
    for (; first != last; ++first, ++dist);

    return dist;
}

template <class It>
auto distance(It first, It last, std::random_access_iterator_tag)
{
    return first < last ? (last - first) : -(first - last);
}

template <class It>
auto distance(It first, It last)
{
    return distance(first, last, it_cat<It>{});
}
```

TODO

++ Forwarding reference дополнить и изучить внимательней

++ inline namespaces тоже в 11 фитчи

++std::invoke

++ Searcher function objects

++ общие фитчи языка вроде const\volatile итд - из конспектов курсеры

+++ Идеомы

+++ шпоры filesystem +?

++ advanced constexpr?

++ TODO скользкие места C++ в UB

// TODO placement new

++ std::true_type пометить о существовании этих функций, где есть пример их реализации

++ Изучить мелкие фитчи, например

int* pArr = new int[N]{}; - создаёт массив с дефолтными значениями (+ массивы на умных указателях)

++ узнать больше о multiset \ multimap

TODO при описании контейнеров выводить только разницу между ними (не дублировать море лишнего кода и названий полей) А может лучше всего даже сделать сводную таблицу, чтобы видеть сразу разницу между всеми контейнерами