ИСКЛЮЧЕНИЯ

Механизмы нелокальной обработки ошибок. Гарантии безопасности.
Проектирование с учётом исключений

К. Владимиров, Intel, 2021
mail-to: konstantin.vladimirov@gmail.com

- Ошибки и исключения
- Гарантии безопасности
- Детали работы с памятью
- Проектирование с исключениями

Обработка ошибок в стиле C

- Определяется область целочисленных кодов ошибок:

```
enum error_t { E_OK = 0, E_NO_MEM, E_UNEXPECTED };
```

- Как функция сигнализирует, что результат её исполнения это E_OK?

Обработка ошибок в стиле C

- Определяется область целочисленных кодов ошибок:

```
enum error_t { E_OK = 0, E_NO_MEM, E_UNEXPECTED };
```

- Вернёт код ошибки

```
error_t open_file(const char *name, FILE **handle);
```

- Использует thread-local facility, например `errno`/`GetLastError`

```
FILE *open_file(const char *name);
```

- Вернёт `error_t*` в списке параметров

```
FILE *open_file(const char *name, error_t *errcode);
```

Проблемы уже в C

- Замечательно стандартная функция

```
int atoi(const char *nptr);
```

- В случае, если конвертировать невозможно, возвращает `0`
  - Действительно ли возвращать ноль хорошая идея?
- В случае, если число слишком большое, возвращает `HUGE_VAL` и устанавливает `errno = ERANGE`.
  - Часто ли вы проверяли возврат на `HUGE_VAL`?

Проблема в C++

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  MyVector(size_t sz): size_(sz) {
    arr_ = static_cast<T*>(malloc(sizeof(T) * sz));
  }

// .... тут всё остальное ....
```

- Вы видите в чём проблема в этом коде?

Проблема в C++

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  MyVector(size_t sz): size_(sz) {
    arr_ = static_cast<T*>(malloc(sizeof(T) * sz));
    // тут должна быть обработка случая arr_ == nullptr
  }

// .... тут всё остальное ....
```

- Не обработана ситуация когда `malloc` вовращает `nullptr`

Чем нам грозит эта ситуация?

```
MyVector v(100);
// тут объект v может оказаться в несогласованном состоянии
// v.arr_ = 0 т.к. память кончилась
// v.size_ = 100 т.к. конструктор никак не обработал ошибку
```

- Хуже всего то, что объект в несогласованном состоянии никак не отличается от нормального объекта
- Несогласованность может проявиться через тысячи строк кода
- Это даже не UB. Несогласованное состояние вполне корректно

Попытка решения: iostream style

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;
  bool valid_ = true;

public:
  MyVector(size_t sz): size_(sz) {
    arr_ = static_cast<T*>(malloc(sizeof(T) * sz));
    if (!arr_) valid_ = false;
  }

  bool is_valid() const { return valid_; }

// .... и так далее ....
```

Обсуждение

- Покритикуйте решение в стиле потоков ввода-вывода.

```
MyVector v(1000);

if (!v.is_valid())
  return -1;

// здесь используем v
```

- Кому оно нравится?

Копирование и присваивание

- Похоже такой вектор тяжело использовать

```
MyVector v(1000); assert(v.is_valid());
MyVector v2(v); assert(v2.is_valid());
v2.push_back(3); assert(v2.is_valid());
v = v2; assert(v.is_valid());
```

- Есть ли идеи получше?

Перегрузка операторов

- Делает вещи ещё хуже

```
Matrix operator+(Matrix a, Matrix b);
```

- Здесь неоткуда вернуть код возврата
- И поскольку это отдельная функция, здесь негде сохранить goodbit
- Конечно мы всё ещё можем вернуть errno. Кому нравится идея его проверять в таких случаях?

Основная идея решения

- Выйти из вызванной функции в вызывающий код в обход обычных механизмов возврата управления
- Аннотировать этот нелокальный выход информацией о случившемся
- Но что вообще мы знаем о нелокальных переходах?

Типы передачи управления

- Локальная передача управления
  - условные операторы
  - циклы
  - локальный goto
  - прямой вызов функций и возврат из них
- Нелокальная передача управления
  - косвенный вызов функций (напр. по указателю)
  - возобновление/приостановка сопрограммы
  - исключения
  - переключение контекста потоков
  - нелокальный longjmp и вычисляемый goto

Исключения

- Исключительные ситуации уровня аппаратуры (например undefined instruction exception)
- Исключительные ситуации уровня операционной системы (например data page fault)
- Исключения C++ (только они и будут нас далее интересовать)

Исключительные ситуации

- Ошибки (исключительными ситуациями не являются)
  - рантайм ошибки, после которых состояние не восстановимо (например segmentation fault)
  - ошибки контракта функции (assertion failure из-за неверных аргументов, невыполненные предусловия вызова)
- Исключительные ситуации
  - Состояние программы должно быть восстановимо (например: исчерпание памяти или отсутствие файла на диске)
  - Исключительная ситуация не может быть обработана на том уровне, на котором возникла (программа сортировки не обязана знать что делать при нехватке памяти на временный буфер)

Порождение ошибки

```
struct UnwShow{
  UnwShow() { cout << "ctor\n"; }
  ~UnwShow() { cout << "dtor\n"; }
};

int foo(int n) {
  UnwShow s;
  if (n == 0) abort(); // abort это убийство
  foo(n - 1);
}

foo(4); // что на экране?
```

Порождение ошибки

```
struct UnwShow{
  UnwShow() { cout << "ctor\n"; }
  ~UnwShow() { cout << "dtor\n"; }
};

int foo(int n) {
  UnwShow s;
  if (n == 0) abort();
  foo(n - 1);
}

foo(4); // что на экране?
```

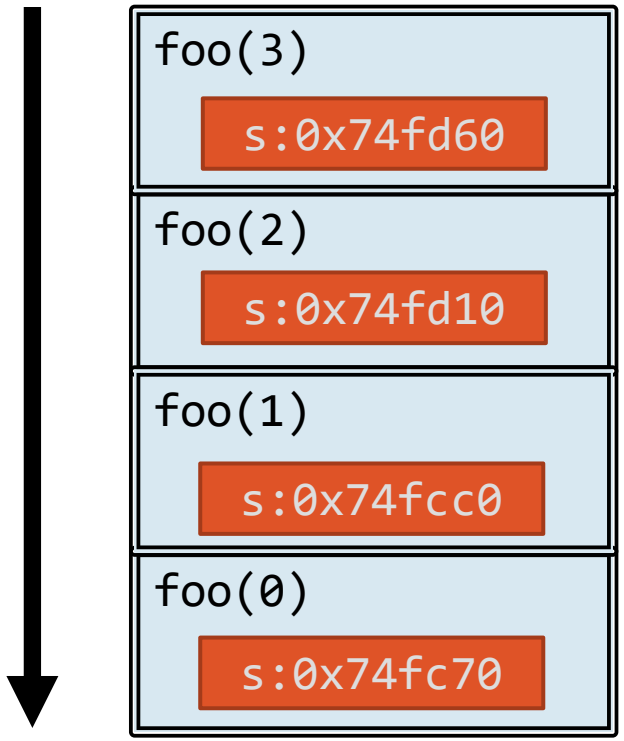
ctor
ctor
ctor
ctor
ctor
тут программа прерывается

Порождение исключения

```
struct UnwShow{
  UnwShow() { cout << "ctor\n"; }
  ~UnwShow() { cout << "dtor\n"; }
};

int foo(int n) {
  UnwShow s;
  if (n == 0) throw 1;
  foo(n - 1);
}

// вызов внутри try-блока

foo(4); // что на экране?
```

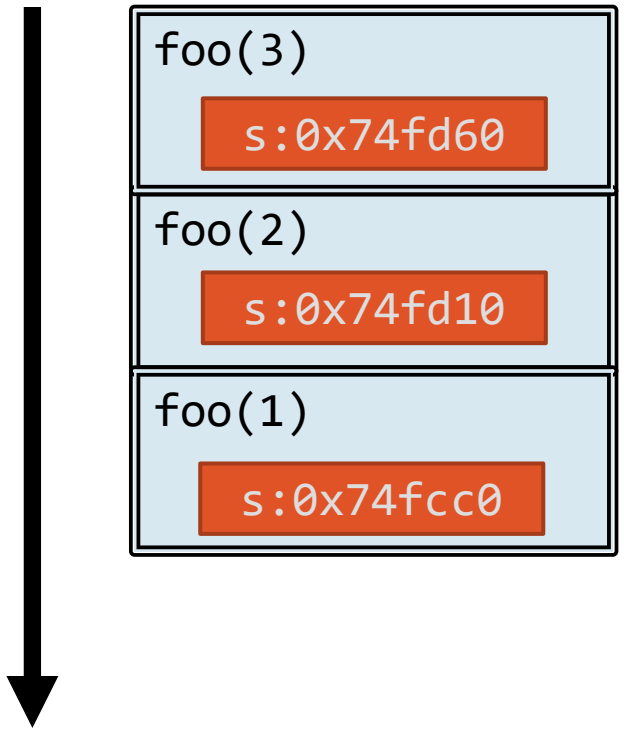
```
ctor
ctor
ctor
ctor
ctor
dtor
dtor
dtor
dtor
dtor
dtor
тут программа входит в try блок
```

Раскрутка стека




```
#0  UnwShow::~UnwShow(this=0x74fc70) at 01a-exception.cc:10
#1  0x0000000000401627 in foo(n=0) at 01a-exception.cc:15
#2  0x0000000000401627 in foo(n=1) at 01a-exception.cc:21
#3  0x0000000000401627 in foo(n=2) at 01a-exception.cc:21
#4  0x0000000000401627 in foo(n=3) at 01a-exception.cc:21
```

Раскрутка стека




```
#0  UnwShow::~UnwShow (this=0x74fc70) at 01a-exception.cc:10
#1  0x0000000000401627 in foo (n=1) at 01a-exception.cc:21
#2  0x0000000000401627 in foo (n=2) at 01a-exception.cc:21
#3  0x0000000000401627 in foo (n=3) at 01a-exception.cc:21
```

Больше про throw

- Конструкция `throw <expression>` означает следующее
  - Создать объект исключения
  - Начать размотку стека
- Примеры

```
throw 1;

throw new int(1);

throw MyClass(1, 1);
```

- Исключения отличаются от ошибок тем, что их нужно ловить.

Ловля исключений

- Производится внутри `try` блока

```
int divide (int x, int y) {
  if (y == 0) throw OVF_ERROR; // это так себе идея
  return x / y;
}

// где-то далее:

try {
  c = divide (a, b);
} catch (int x) {
  if (x == OVF_ERROR) std::cout << "Overflow" << std::endl;
}
```

Некоторые правила

- Ловля происходит по точному типу

```
try { throw 1; } catch(long l) {} // не поймали
```

- Или по ссылке на точный тип

```
try { throw 1; } catch(const int &ci) {} // поймали
```

- Или по указателю на точный тип

```
try { throw new int(1); } catch(int *pi) {} // поймали
```

- Или по ссылке или указателю на базовый класс

```
try { throw Derived(); } catch(Base &b) {} // поймали
```

Некоторые правила

- Catch-блоки пробуются в порядке перечисления

```
try { throw 1; }
catch(long l) {} // не поймали
catch(const int &ci) {} // поймали
```

- Пойманную переменную можно менять или удалять

```
try { throw new Derived(); } catch(Base *b) { delete b; } // ok
```

- Пойманное исключение можно перевыбросить

```
try { throw Derived(); } catch(Base &b) { throw; } // ok
```

Обсуждение

- Чуть раньше был приведён следующий код для обработки ошибки переполнения

```
enum class errs_t { OVF_ERROR, UDF_ERROR, и так далее };

int divide (int x, int y) {
  if (y == 0) throw errs_t::OVF_ERROR; // это так себе идея
  return x / y;
}
```

- Покритикуйте, что тут плохо?
- Как можно улучшить этот код?

Обсуждение

- Очевидное улучшение: переход к классам исключений

```
class MathErr { информация об ошибке  };

class DivByZero : public MathErr { расширение };

int divide (int x, int y) {
  if (y == 0) throw DivByZero("Division by zero occured");
  return x / y;
}

// где-то дальше

catch (MathErr &e) { std::cout << e.what() << std::endl; }
```

Некоторые неприятности

- Какие проблемы вы видите в этом коде?

```
class MathErr { информация об ошибке  };
class Overflow : public MathErr { расширение };

// где-то дальше

try {
  // тут много опасного кода
}
catch (MathErr e) { обработка всех ошибок }
catch (Overflow o) { обработка переполнения }
```

Некоторые неприятности

- Очевидная проблема здесь это срезка (уже рассматривалась ранее)

```
class MathErr { информация об ошибке  };
class Overflow : public MathErr { расширение };

// где-то дальше

try {
  // тут много опасного кода
}
catch (MathErr e) { обработка всех ошибок } // slicing!
catch (Overflow o) { обработка переполнения }
```

Избегаем неприятностей

- Обсуждение: какие ещё проблемы вы видите в этом коде?

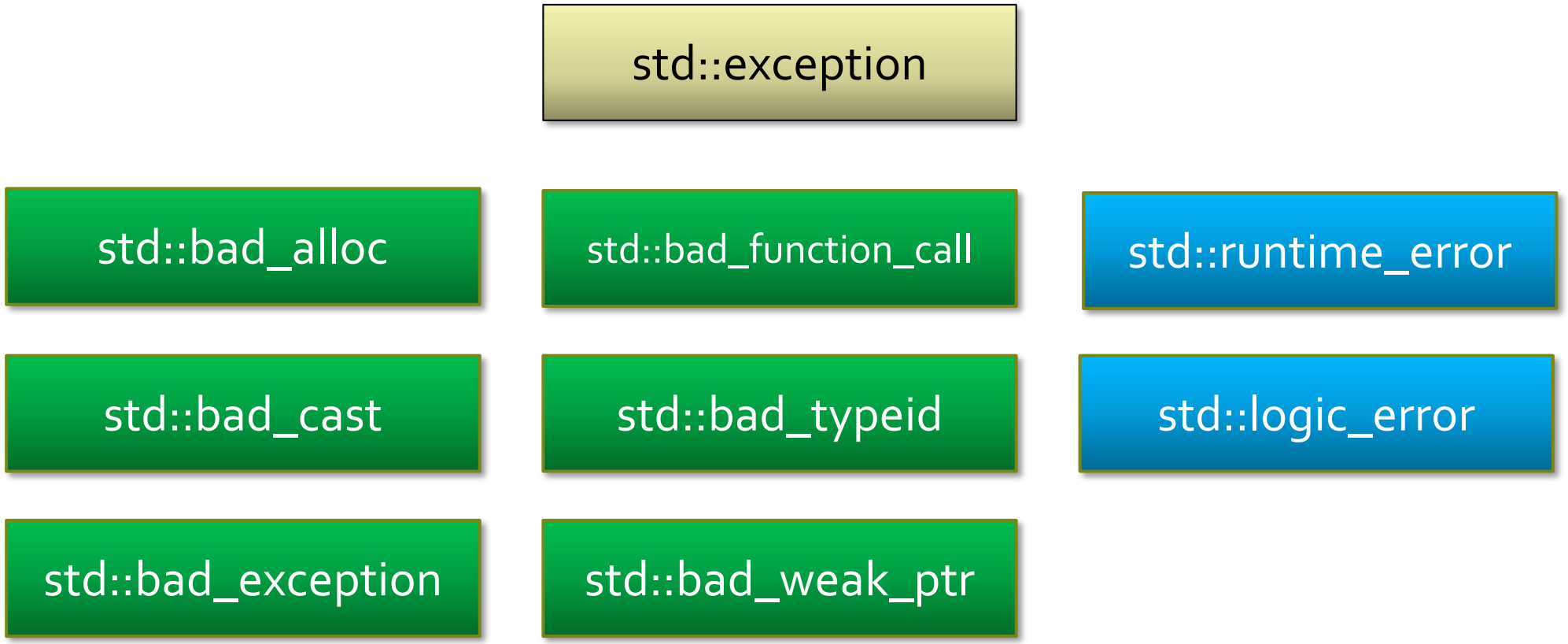
```
class MathErr { информация об ошибке };
class Overflow : public MathErr { расширение };

// где-то дальше

try {
  // тут много опасного кода
}
// 1. Правильный порядок: от частных к общим
// 2. Ловим строго по косвенности
catch (Overflow& o) { обработка переполнения }
catch (MathErr& e) { обработка всех ошибок }
```

Но как избежать самобытности?

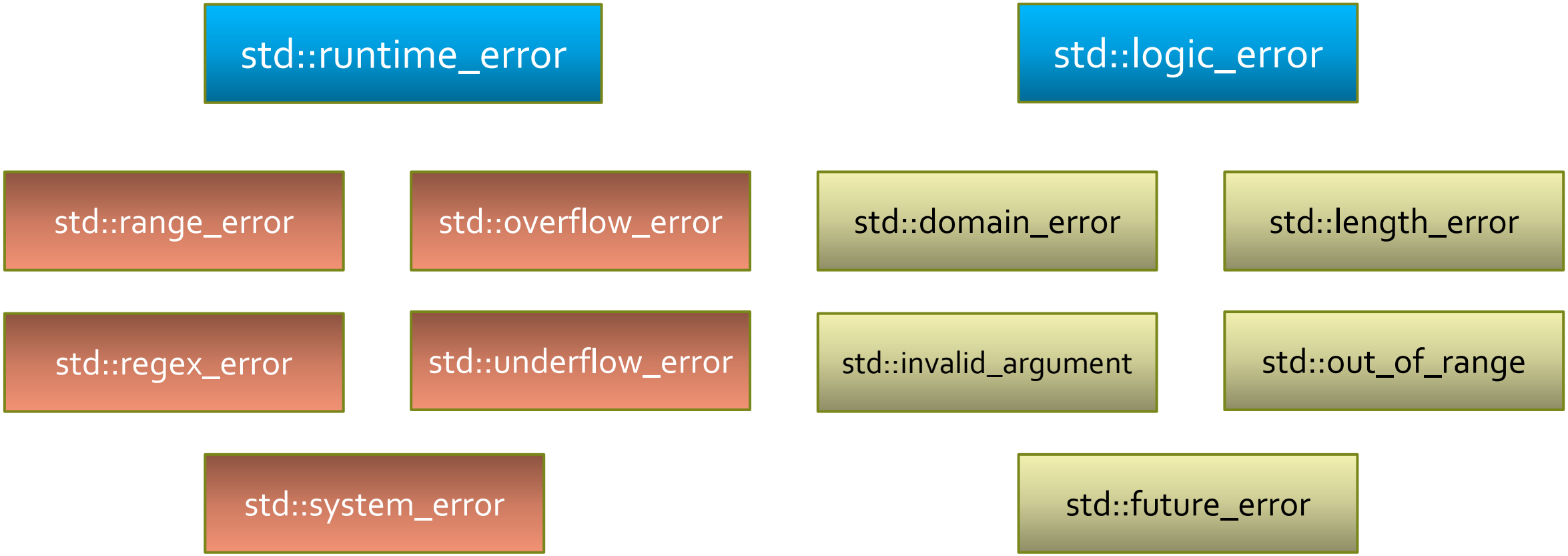
- Тут всё неплохо но хм… неужели я первый кто наткнулся на такие ошибки?

```
class MathErr { информация об ошибке };
class Overflow : public MathErr { расширение };

// где-то дальше

try {
  // тут много опасного кода
}
// 1. Правильный порядок: от частных к общим
// 2. Ловим строго по косвенности
catch (Overflow& o) { обработка переполнения }
catch (MathErr& e) { обработка всех ошибок }
```

Стандартные классы исключений



Стандартные классы исключений



Обсуждение

- Какой интерфейс вы бы сделали у `std::exception`?

Обсуждение

- Какой интерфейс вы бы сделали у `std::exception`?

```
struct exception {
  exception() noexcept;
  exception(const exception&) noexcept;
  exception& operator=(const exception&) noexcept;
  virtual ~exception();
  virtual const char* what() const noexcept;
};
```

- Аннотация noexcept означает обещание что эта функция не выбросит исключений
- Она распространяется на переопределения виртуальных функций

Используем стандартные классы

- Наследование от стандартного класса вводит расширение в иерархию

```
class MathErr : public std::runtime_error { информация };
class Overflow : public MathErr { расширение };

// где-то дальше

try {
  // тут много опасного кода
}
catch (Overflow& o) { обработка переполнения }
catch (MathErr& e) { обработка всех ошибок }
```

- Впрочем, у наследования есть и тёмные стороны…

Множественное наследование

```
struct my_exc1 : std::exception {
  char const* what() const noexcept override;
};

struct my_exc2 : std::exception {
  char const* what() const noexcept override;
};

struct your_exc3 : my_exc1, my_exc2 {};

int main(){
  try { throw your_exc3(); }
  catch(std::exception const& e) { std::cout << e.what() << "\n"; }
  catch(...) { std::cerr << "whoops!\n"; }
}
```

Перехват всех исключений

- Используется троеточие (как в printf)

```
try {
// тут много опасного кода
}  catch (...) {
// тут обрабатываются все исключения
}
```

- Сама идея, что можно как-то осмысленно обработать любое исключение очень сомнительна

Нейтральность

- Функция называется нейтральной относительно исключений, если она не ловит чужих исключений
- Хорошо написанная функция в хорошо спроектированном коде как минимум нейтральна

У меня проблема!

```
throw MyException()
```

А я испорчу вам праздник

```
try { что-то }
catch(...) { }
```

Я знаю как решить проблему!

```
try { что-то }
catch (MyException& e) { обработка }
```

Перевыброс

- Единственное разумное применение catch-all это очистка критического ресурса и перевыброс исключения
- На самом деле даже разумность этого варианта под сомнением

```
int *critical = new int[10000]();
try {
  // тут много опасного кода
}
catch (...) {
  delete [] critical;
  throw;
}
```

- Кто нибудь предложит лучше?

Обсуждение

- Кажется есть одно место где мы не можем поймать исключение

```
template <typename T> struct Foo {
  T x_, y_;
  Foo(int x, int y): x_(x), y_(y) { // <-- exception in x_(x)
    try {
      // some actions
    }
    catch(std::exception& e) {
      // some processing
    }
```

- С одной стороны вроде и не нужно ловить. Или может быть нужно?

Try-блоки уровня функций

- Мы можем завернуть всю функцию в try-block

```
int foo() try { bar(); }
catch(std::exception& e) { throw; }
```

- В том числе и конструктор

```
Foo::Foo(int x, int y) try : x_(x), y_(y) {
  // some actions
}
catch(std::exception& e) {
  // some processing
}
```

- Техника скорее экзотическая, но лучше знать чем не знать

Catch уровня функций

- На уровне функций, catch входит в scope функции

```
int foo(int x) try {
  bar();
}
catch(std::exception& e) {
  std::cout << x << ": " << e.what() << std::endl; // ok
}
```

- Увы, try-block на main не ловит исключения в конструкторах глобальных объектов

Исключения для лучшего кода?

- Преимущества
- Текст не замусоривается обработкой кодов возврата или errno, вся обработка ошибок отделена от логики приложения
- Ошибки не игнорируются по умолчанию. Собственно они не могут быть проигнорированы
- Недостатки
- Code path disruption – появление в коде неожиданных выходных дуг
- Некоторый оверхед на исключения

- Ошибки и исключения
  - Гарантии безопасности
- Детали работы с памятью
- Проектирование с исключениями

Вернёмся к исходной проблеме

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;
public:
  explicit MyVector(size_t sz): size_(sz) {
    arr_ = static_cast<T*>(malloc(sizeof(T) * sz));
    if (!arr_) {
      // и что здесь делать?
    }
  }

// .... тут всё остальное ....
```

- Теперь вполне ясно как эта ошибка вообще может быть обработана

Вернёмся к исходной проблеме

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;
public:
  explicit MyVector(size_t sz): size_(sz) {
    arr_ = static_cast<T*>(malloc(sizeof(T) * sz));
    if (!arr_)
      throw std::bad_alloc();
  }

// .... тут всё остальное ....
```

- Этот код можно упростить, так как по сути тут написан оператор new

Вернёмся к исходной проблеме

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  // бросает bad_alloc
  explicit MyVector(size_t sz): arr_(new T[sz]), size_(sz) {}

// .... тут всё остальное ....
```

- Задача: написать копирующий конструктор

Пример Каргилла

- Все ли понимают что тут плохо?

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  MyVector(const MyVector &rhs) {
    arr_ = new T[rhs.size_];
    size_ = rhs.size_; used_ = rhs.used_;
    for (size_t i = 0; i != rhs.size_; ++i)
      arr_[i] = rhs.arr_[i];
  }
```

Пример Каргилла

- Все ли понимают что тут плохо?

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  MyVector(const MyVector &rhs) {
    arr_ = new T[rhs.size_]; // здесь утечка памяти
    size_ = rhs.size_; used_ = rhs.used_;
    for (size_t i = 0; i != rhs.size_; ++i)
      arr_[i] = rhs.arr_[i]; // если здесь исключение
  }
```

Безопасность относительно исключений

- Код, в котором при исключении могут утечь ресурсы, оказаться в несогласованном состоянии объекты и прочее, называется небезопасным относительно исключений
- Каргилл писал: "*I suspect that most members of the C++ community vastly underestimate the skills needed to program with exceptions and therefore underestimate the true costs of their use*" [3]
- И в общем это до сих пор так, хотя прекрасные книги Саттера [5] и [6] сильно улучшили общую грамотность

Гарантии безопасности

- Базовая гарантия: исключение при выполнении операции может изменить состояние программы, но не вызывает утечек и оставляет все объекты в согласованном (но не обязательно предсказуемом) состоянии
- Строгая гарантия: при исключении гарантируется неизменность состояния программы относительно задействованных в операции объектов (commit/rollback)
- Гарантия бессбойности: функция не генерирует исключений (noexcept)

Безопасное копирование

```
template <typename T>
T *safe_copy(const T* src, size_t srcsize) {
  T *dest = new T[srcsize];
  try {
    for (size_t idx = 0; idx != srcsize, ++idx)
      dest[idx] = src[idx];
  }
  catch (...) {
    delete [] dest;
    throw;
  }
  return dest;
}
```

Теперь конструктор копирования

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  MyVector(const MyVector &rhs) :
    arr_(safe_copy(rhs.arr_, rhs.size_)),
    size_(rhs.size_), used_(rhs.used_) {}
```

- Следующий шаг: оператор присваивания
- Вероятно теперь, когда у нас есть safe_copy, нам будет совсем просто?

Оператор присваивания

- Вы видите проблемы в этой реализации?

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  MyVector& operator= (const MyVector &rhs) {
    if (this == &rhs) return *this;
    delete [] arr_;
    arr_ = safe_copy(rhs.arr_, rhs.size_);
    size_ = rhs.size_; used_ = rhs.used_;
    return *this;
  }
```

Оператор присваивания

- Вы видите проблемы в этой реализации?

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  MyVector& operator= (const MyVector &rhs) {
    if (this == &rhs) return *this;
    delete [] arr_; // уже стёрли
    arr_ = safe_copy(rhs.arr_, rhs.size_); // исключение
    size_ = rhs.size_; used_ = rhs.used_;
    return *this;
  } // объект в неконсистентном состоянии
```

Оператор присваивания v2

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  MyVector& operator= (const MyVector &rhs) {
    if (this == &rhs) return *this;
    T *narr = safe_copy(rhs.arr_, rhs.size_);
    delete [] arr_;
    arr_ = narr; size_ = rhs.size_; used_ = rhs.used_;
    return *this;
  }
```

- Теперь ok, но это как-то хрупко и подвержено случайным проблемам

Внезапно swap

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  void swap(MyVector& rhs) {
    std::swap(arr_, rhs.arr_);
    std::swap(size_, rhs.size_);
    std::swap(used_, rhs.used_);
  }
```

- Вроде бы этот оператор не бросает исключений и это хочется задокументировать

Интерлюдия: noexcept

- Специальное ключевое слово noexcept документирует гарантию бессбойности для кода

```
void swap(MyVector& rhs) noexcept {
  std::swap(arr_, rhs.arr_);
  std::swap(size_, rhs.size_);
  std::swap(used_, rhs.used_);
}
```

- При оптимизациях компилятор будет уверен что исключений не будет
- Если они всё-таки вылетят, то это сразу `std::terminate`
- Вы не должны употреблять noexcept там где исключения всё же возможны

Оператор присваивания: линия Калба

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  void swap(MyVector& rhs) noexcept;

  MyVector& operator= (const MyVector &rhs) {
    MyVector tmp(rhs); // тут мы можем бросить исключение

    swap(tmp); // тут мы меняем состояние класса
    return *this;
  }
```

- Это даёт строгую гарантию по присваиванию

Подумаем про push?

- Подумайте про `push`

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;
public:
  void push(T new_elem);
```

- Может потребоваться реаллокация если `size_ == used_`

Kalb line

- При проектировании очень полезно провести в уме эту линию

```
void push(const T& t) {
  if (used_ == size_) {
    MyVector tmp(size_*2 + 1);
    while (tmp.size() < used_)
      tmp.push(arr_[tmp.size()]);
    tmp.push(t);
    swap(*this, tmp); // операция noexcept
    return;
  }
// и так далее
```

Выше этой линии инварианты класса неизменны

Ниже этой линии операции не кидают исключений

Условный noexcept

- Некоторые функции непонятно аннотировать noexcept или нет?

```
template <class T>
T copy(T const& orig) /* noexcept? */ {
  return orig;
}
```

Условный noexcept

- Некоторые функции непонятно аннотировать noexcept или нет?

```
template <class T>
T copy(T const& orig) /* noexcept? */ {
  return orig;
}
```

- Эта функция noexcept для int, но не для vector

Условный noexcept

- Некоторые функции можно различить простыми определителями

```
template <class T>
T copy(T const& orig) noexcept(is_fundamental<T>::value) {
  return orig;
}
```

- `noexcept(true)` это всё равно что просто `noexcept`
- `noexcept(false)` это его отсутствие а не обещание что функция точно что-то бросит
- Решение рабочее, но недостаточно точное. Даже у типов, не являющихся фундаментальными, копирующий конструктор может не бросать исключений

Оператор noexcept

- Для более тонкой настройки служит оператор noexcept

```
template <class T>
T copy(T const& orig) noexcept(noexcept(T(orig))) {
  return orig;
}
```

- Оператор `noexcept` возвращает `true` или `false` в зависимости от вычисления выражения под ним на этапе компиляции.
- Разумеется выражение `T(orig)` выглядит так себе.

Оператор noexcept: альтернативы

- Очень часто, если хочется спросить, лучше спросить явно

```
template <class T>
T copy(T const& orig) noexcept(
                  std::is_nothrow_copy_constructible<T>::value) {
  return orig;
}
```

- Внутри этот определитель реализован через оператор noexcept и настоящее место этого оператора именно там в библиотечном коде.
- Тем не менее, какие-то детали о нём знать полезно.

Оператор noexcept: детали

- Оценивает каждую функцию, задействованную в выражении, но не вычисляет выражение

```
struct ThrowingCtor { ThrowingCtor(){} };

void foo(ThrowingCtor) noexcept;
void foo(int) noexcept;

assert(noexcept(foo(1)) == true);
assert(noexcept(foo(ThrowingCtor{})) == false);
```

- Возвращает false для constant expressions
- Интересно, что разыменование nullptr это вариант нормы для noexcept

Обсуждение: noexcept(false)

- Любой деструктор по умолчанию noexcept
- Одним из способов позволить исключениям покидать деструктор является его пометка как `noexcept(false)`
- Вы должны быть осторожны, помечая так деструкторы потому что деструктор сам по себе используется в процессе размотки (см. пример)
- Вы можете проверить внутри деструктора идёт ли размотка посредством вызова `std::uncaught_exceptions()`

noexc-false.cc

Извлечение из массива

- Безопасен ли этот код относительно исключений?

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  T pop() {
    if (used_ <= 0) throw underflow{};
    T result = arr_[used_ - 1];
    used_ -= 1;
    return result;
  }
```

Внезапная проблема

- Кажется, что всё хорошо
- Но что произойдёт в точке использования?

```
MyVector<SomeType> v;
// тут много кода
SomeType s = v.pop(); // исключение при копировании в s
```

- Тогда окажется, что объект уже удалён, но по месту назначения не пришёл и навсегда потерян

Извлечение из массива v2

- Тут правильное проектирование страхует от проблем

```
template <typename T> class MyVector {
  T *arr_ = nullptr;
  size_t size_, used_ = 0;

public:
  T top() const {
    if (used_ <= 0) throw outofbounds{};
    return arr_[used_ - 1];
  }

  void pop() {
    if (used_ <= 1) throw underflow{}; used_ -= 1;
  }
```

Обсуждение

- Оказывается безопасность относительно исключений влияет на проектирование!
- Если это так, то почему бы сразу не спроектировать нечто, что нам удобно будет делать безопасным?
- Удивительно, но для этого нам надо будет посмотреть на тонкости работы с памятью

- Ошибки и исключения
- Гарантии безопасности
- Детали работы с памятью
- Проектирование с исключениями

Глобальные операторы

- В языке C для выделения памяти служат функции malloc и free

```
void *p = malloc(10);
free(p);
```

- В языке C++ этим занимаются операторы new и delete
- При этом в отличии, от, скажем, оператора +, у них есть **глобальные формы**
- Когда вы пишете new-expression для встроенного типа, он будет истолкован именно как вызов глобального оператора

```
int *n = new int(5); // выделение + конструирование
n = (int *) ::operator new(sizeof(int)); // только выделение
```

Глобальные операторы

- Вы можете переопределить глобальные операторы и изменить поведение всех классов, которые ими пользуются

```
void *operator new(std::size_t n) {
  void *p = malloc(n); if (!p) throw std::bad_alloc{};
  printf("Alloc: %p, size is %zu\n", p, n);
  return p;
}
```

- Теперь что мы ожидаем увидеть на экране при создании списка из одного элемента?

```
std::list<int> l;
l.push_back(42);
```

Обсуждение

- Мы отделяем вызов конструкторов от выделения памяти, но что если конструктор выбросит исключение?

```
struct S {
  S(); // десятый конструктор кинет исключение
  ~S();
};

S *sarr = new S[20];
```

- Сколько тут будет конструкторов и деструкторов, если мы знаем, что `new[]` даёт строгую гарантию?

https://godbolt.org/z/1ExY38PaP

Формы глобальных операторов

- Основные формы все в чём-то похожи на `malloc`

```
void *operator new(std::size_t);
void operator delete(void*) noexcept;
void *operator new[](std::size_t);
void operator delete[](void*) noexcept;
```

- Предусмотрены также дополнительные варианты с семантикой `noexcept`

```
void *operator new(std::size_t, const std::nothrow_t&) noexcept;
void *operator new[](std::size_t, const std::nothrow_t&) noexcept;
```

- Пока что должно быть не слишком понятно как их использовать.

Небросающий new

- Если для new-expression не передано аргументов, она раскрывается просто

```
p = new int{42};
p = (int *) ::operator new(sizeof(int)); *p = 42;
```

- Если аргументы переданы, они ставятся в конец глобального оператора

```
p = new (nothrow) int{42};
p = (int *) ::operator new(sizeof(int), nothrow); *p = 42;
```

- Специальный аргумент `std::nothrow` типа `std::nothrow_t` показывает, что мы не хотим бросать исключение
- Тогда нам надо возвращать нулевой указатель при неудаче

Размещающий new

- Поскольку аллокация/деаллокация это операторы, они могут быть переопределены
- Но есть непереопределяемый глобальный оператор

```
void* operator new(std::size_t size, void* ptr) noexcept;
void* operator new[](std::size_t size, void* ptr) noexcept;
```

- Он называется размещающим new и ему не соответствует никакого delete, потому что всё что он делает это размещает объект в сырой памяти

Работа с размещающим new

- Работа с памятью отделена от работы с объектом в памяти

```
void *raw = ::operator new(sizeof(Widget), std::nothrow);
if (!raw) { обработка }

Widget *w = new (raw) Widget;

// .... тут использование w ....

w->~Widget();

::operator delete(raw);
```

- Обсуждение: может ли это помочь проектированию безопасных контейнеров?

Переопределение new и delete

- Замечательным свойством new и delete является возможность переопределить их не глобально, а на уровне своего класса

```
struct Widget {
  static void *operator new(std::size_t n);
  static void operator delete(void *mem) noexcept;
};
```

- Теперь для класса Widget будут использоваться его собственные операторы, а не глобальные
- При этом, в отличии от глобального, размещающий new тоже может быть переопределён

Работа с пользовательским классом

- new с исключением при исчерпании памяти

```
Widget *w = new Widget; // возможно bad_alloc
```

- new с возвратом нулевого указателя

```
Widget *w = new (std::nothrow) Widget;
if (!w) { обработка }
```

- размещающий new

```
void *raw = ::operator new(sizeof(Widget)); // возможно bad_alloc

// только конструирование в готовой памяти
Widget *w = new (raw) Widget;
```

Обсуждение

- Что вы думаете о таком операторе присваивания?

```
T& T::operator=(T const& x) {
  if (this != &x) {
    this->~T();
    new (this) T(x);

  }
  return *this;
}
```

Обсуждение (Stepanov assignment)

- Что вы думаете о таком операторе присваивания?

```
T& T::operator=(T const& x) {
  if (this != &x) {
    this->~T();
    new (this) T(x); // исключение тут
                     // и дальше dtor при размотке
  }
  return *this;
}
```

- Алекс Степанов написал его в одной из первых реализаций `std::vector` и эта ошибка там была незамеченной 6 лет.

- Ошибки и исключения
- Гарантии безопасности
- Детали работы с памятью
- Проектирование с исключениями

Отделённая реализация

- Идея для проектирования ваших классов с учётом исключений это разделить функциональность:
  - Класс, работающий с сырой памятью
  - Использующий объекты этого класса внешний класс, работающий с типизированным содержимым
- Для этого часто используется управление памятью вручную через нестандартные формы new и delete

Полезные хелперы

- Создание копии объекта в сырой памяти

```
template <typename T> void copy_construct(T *p, const T& val) {
  new (p) T(val);
}
```

- Разрушение такого объекта без освобождения памяти

```
template <typename T> void destroy(T* p){
  p->~T();
}
```

Обсуждение

- Что можно сказать о возможных исключениях в следующем коде, деконструирующем содержимое forward-итерируемого контейнера?

```
template <typename FwdIter>
void destroy(FwdIter first, FwdIter last) {
   while (first != last)
     destroy(&*first++);
}
```

Обсуждение

- Возможна критика: что если деструктор выбросит исключение. Попробуем от этого защититься…

```
template <typename FwdIter>
void destroy(FwdIter first, FwdIter last) {
   while (first++ != last)
     try {
       destroy(&*first);
     }
     catch(...) {
       и что здесь делать?
     }
}
```

Правило для деструкторов

- Исключения не должны покидать деструктор
- По стандарту исключение, покинувшее деструктор, если при этом остались необработанные исключения, приводит к вызову `std::terminate` и завершению программы

Буфер для вектора

- Ключевой момент: конструктор и деструктор

```
MyVectorBuf(size_t sz = 0) :
  arr_((sz == 0) ?
       nullptr :
       static_cast<T*>(::operator new(sizeof(T) * sz))),
  size_(sz), used_(0) {}

~MyVectorBuf() /* noexcept */ {
  destroy(arr_, arr_ + used_);
  ::operator delete(arr_);
}
```

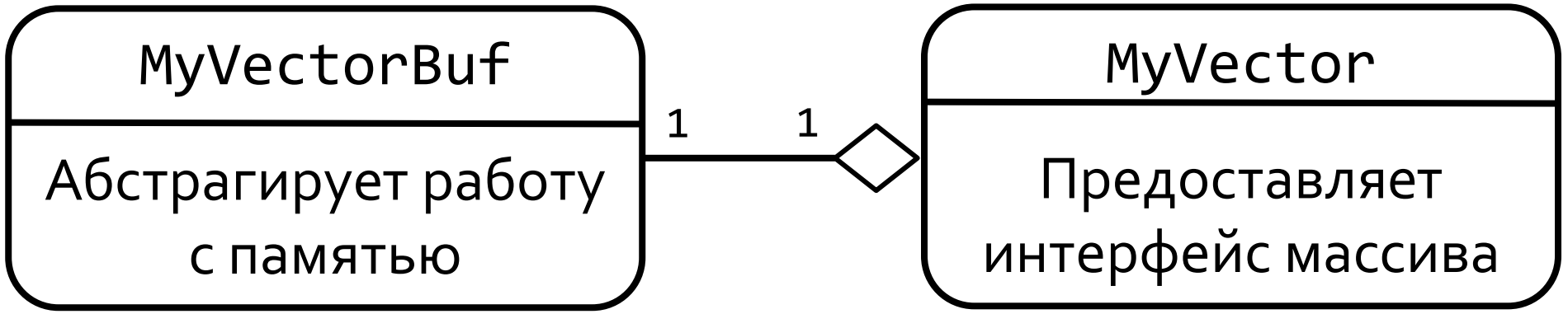
Собственно вектор

- Тут демонстрация MyVector

myvec-demo

Общий вывод и картинка

- Проектирование с использованием исключений в итоге позволяет упростить и улучшить код, структурируя его с чётким распределением ответственности



- В реальной libstdc++ вектор тоже будет устроен по такому принципу

Обсуждение

- Приведенный ранее метод push не очень эффективен

```
void MyVector::push(const T& t) {
  if (used_ == size_) {
    MyVector tmp (size_*2 + 1);
    while (tmp.size() < used_)
      tmp.push(arr_[tmp.size()]); // копирование
    tmp.push(t);
```

- Можем ли мы вместо этого использовать перемещение?

Первая проблема: константность

- Нам придётся немного дублировать чтобы не снимать константность

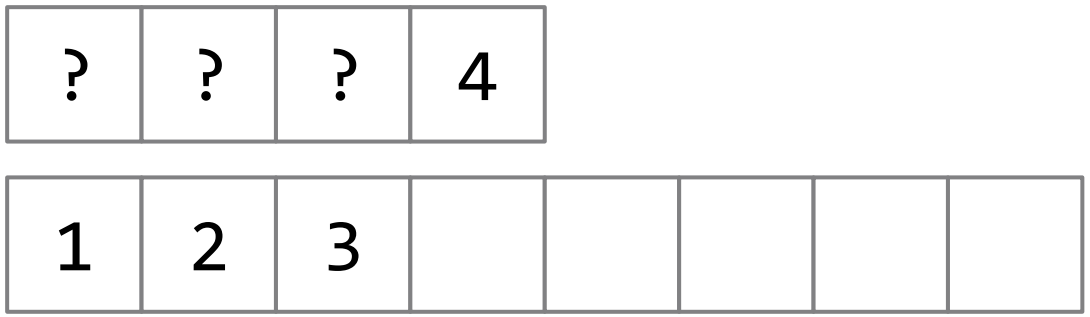
```
void MyVector::push(const T& t) { T t2(t); push(move(t2)); }

void MyVector::push(T&& t) {
  if (used_ == size_) {
    MyVector tmp (size_*2 + 1);
    while (tmp.size() < used_)
      tmp.push(std::move(arr_[tmp.size()])); // перемещение
    tmp.push(std::move(t));
```

- Тут всё хорошо?

Вторая проблема: линия Калба

- Идея сделать его более эффективным использует move
- Но это порождает проблемы: мы портим состояние arr

```
void MyVector::push(T&& t) {
  if (used_ == size_) {
    MyVector tmp (size_*2 + 1);
    while (tmp.size() < used_)
      tmp.push(std::move(arr_[tmp.size()])); // если тут throw?
    tmp.push(std::move(t));
    swap(*this, tmp);
  }
  // всё остальное
```



Решение

- Перемещающие конструктор и присваивание не должны бросать исключений

```
MyVector(MyVector &&rhs) noexcept = default;
MyVector& operator=(MyVector &&rhs) noexcept = default;
```

- При этом если они неправильные или их нет, помещение в контейнер становится менее эффективным

```
void MyVector::push (const T& t) {
  if (std::is_nothrow_move_assignable<T>::value)
    push_move(t);
  else
    push_copy(t);
}
```

Смещение линии Калба

- Случай с копированием

```
MyVector tmp(size_*2 + 1);
while (tmp.size() < used_) tmp.push(arr_[tmp.size()]);
tmp.push(t);
```

```
swap(*this, tmp);
```

- Случай с перемещением

```
MyVector tmp(size_*2 + 1);
```

```
while (tmp.size() < used_) tmp.push(move(arr_[tmp.size()]));
tmp.push(move(t));
swap(*this, tmp);
```

Обсуждение

- Исключения влияют на проектирование
- Использование перемещающих конструкторов влияет на проектирование
- Кажется приходит время обсудить проектирование

Литература

1. ISO/IEC, "Information technology – Programming languages – C++", ISO/IEC 14882:2017
2. The C++ Programming Language (4th Edition)
3. Tom Cargill, Exception handling: a false sense of security, C++Report '1994
4. David Abrahams, Exception-safety in generic components '1998
5. Herb Sutter, Exceptional C++: 47 engineering puzzles, programming problems, and solutions, Addison-Wesley, 2000
6. Herb Sutter, More exceptional C++: 40 new engineering puzzles, programming problems, and solutions, Addison-Wesley, 2002
7. Jon Kalb, Exception Safe code (3 parts), CppCon'2014
8. Arne Mertz, Modern C++ features – keyword `noexcept`, blog post, Jan'2016
9. Niall Douglas, Mongrel Monads, ACCU'2017
10. Nico Brailovsky, Exception handling internals