ВЕКТОРА И SFINAE

На долгом пути к std::vector – проектирование реалистичного шаблонного контейнера

К. Владимиров, Syntacore, 2023
mail-to: konstantin.vladimirov@gmail.com

- Вектора
- SFINAE
- Вариабельные шаблоны
- Графы

От ручного выделения к векторам

```
int *n = new int[10];

n[5] = 5;

// тут много кода

// какой сейчас размер у n?

// стереть крайний элемент?

// пуст ли теперь n?

// не забыть delete[]
```

```
vector<int> v(10);

v[5] = 5;

// тут много кода

size_t vsize = v.size();

v.pop_back();

if (v.empty()) { что-то }

// ресурсы будут освобождены
```

Два непростых вопроса

- Допустим я хочу завести в своей программе вектор из константных ссылок.

```
std::vector<const int &> v;
```

- Что скажете?
- Допустим я не знаю тип переменной x, но знаю, что это контейнер.

```
template<typename Cont> void foo(const Cont& x) {
  if(x.empty()) return;
  // do something
}
```

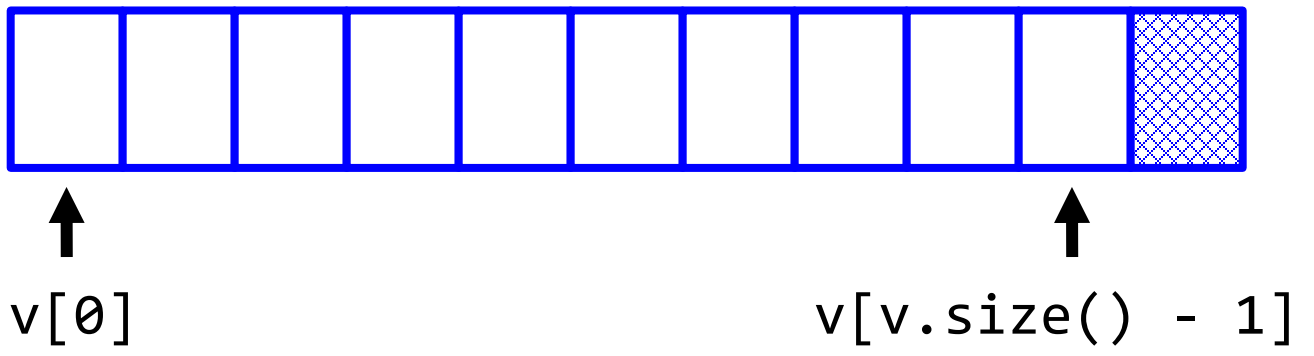
- Могу ли я бы уверенным, что это будет работать для всех контейнеров?

Требования к элементам контейнеров

- Общие для всех контейнеров методы [container.requirements.general]
  - empty — проверка пустоты контейнера.
  - swap — обмен контейнерных переменных содержимым.
  - size (кроме array) — действительный размер контейнера.
  - clear (кроме array) — очистка контейнера.
  - begin, end, cbegin, cend — получение итераторов (см. далее).
- Требования к элементам зависят от конкретной операции, но чаще всего
  - DefaultConstructible — требование к наличию конструктора по умолчанию.
  - MoveConstructible — требование к наличию конструктора перемещения или копирования.

Гарантии непрерывности памяти

```
// функция init написана в старом стиле
template <typename T> void init (T* arr, size_t size);

// но её можно использовать с векторами
vector<T> t(n);
T *start = &t[0];
init_t(start, n);
assert(t[1] == start[1]);
```



When choosing a container, remember vector is best. Leave a comment to explain if you choose from the rest

(c) Tony van Eerd

Неприятное исключение: vector<bool>

```
vector<bool> t(n);
bool *start = &t[0]; // это не скомпилируется, но представим
assert (t[1] == start[1]); // oops!
```

Важно запомнить две вещи:

- `vector<bool>` не удовлетворяет соглашениям контейнера vector
- `vector<bool>` не содержит элементов типа bool
- Не используйте `vector<bool>` для обобщённого программирования.

```
using vector_bool = vector<bool>;

vector_bool x(10); // условно ок, но тут лучше std::bitset
```

Задача: что можно здесь улучшить?

```
vector<int> v;

for (int i = 0; i != N; ++i)
  v.push_back(i);
```

Ответ: вектор не терпит халатности

```
vector<int> v;
v.reserve(N);

for (int i = 0; i != N; ++i)
  v.push_back(i); // теперь здесь не будет перевыделений
```

- При вставке в конец вектору могут потребоваться реаллокации памяти.
- Это означает, что всегда полезно думать о памяти вектора не меньше, чем о памяти динамического массива.

Ещё про size и capacity

- `size` это сколько элементов у вектора уже есть.
- `capacity` это сколько элементов в нём может быть до первого перевыделения.

```
vector<int> v(10000);

assert (v.size() == 10000);
assert (v.capacity() >= 10000);
```

Размер это что-то чем можно в явном виде управлять в отличии от ёмкости.

```
v.resize(100);
assert (v.size() == 100);
assert (v.capacity() >= 10000);
```

Амортизация

- При написании метода push, вам предлагалось оценить его алгоритмическую сложность.
- Проблема в том, что она очевидно O(1) если не надо реаллоцировать и O(n) если надо.
- То есть мы платим иногда. Это примерно как купить машину и платить только за бензин пока машина не износится, а потом купить новую.
- В экономике распределение стоимости товара по стоимости его периода эксплуатации называется амортизацией товара.
- Амортизированное O(n) обозначается O(n)+

Амортизированная стоимость

- По определению амортизированная стоимость операции это стоимость N операций, отнесённая к N.
- Для динамического массива $c_i = 1 + [realloc] * (i - 1)$
- Амортизированная стоимость одной вставки будет $\frac{\sum_i c_i}{N}$ для N вставок.
- Допустим, мы, если реаллокация нужна, растим массив на 10 элементов.

$\sum_i c_i = ?$

Амортизированная стоимость

- По определению амортизированная стоимость операции это стоимость N операций, отнесённая к N.
- Для динамического массива $c_i = 1 + [realloc] * (i - 1)$
- Амортизированная стоимость одной вставки будет $\frac{\sum_i c_i}{N}$ для N вставок.
- Допустим, мы, если реаллокация нужна, растим массив на 10 элементов.

$$\sum_i c_i = N + \sum_{k=1}^{N/10} 10 \cdot k = O(N^2)$$

- Заметим, что это очень плохая стратегия. Амортизированная сложность push будет $\frac{O(N^2)}{N} = O(N)$+. Можем ли мы придумать и доказать нечто лучшее?

Лучшая стратегия

- Прирост вдвое.

$$\frac{\sum c_i}{N} = \frac{N+\sum_{j=1}^{\lg(N)} 2^j}{N} = \frac{O(N)}{N} = O(1)+$$

- Видно, что разница есть: при одной стратегии у нас в среднем линейное а при другой в среднем постоянное время вставки.
- Увы, взять сумму $\sum_{j=1}^{\lg(N)} 2^j$ в общем уже не так просто, а при более сложных стратегиях, это становится мучительно.
- Можем ли мы упростить себе жизнь?

Дополнение: метод потенциала

- Выберем функцию потенциала $\Phi(n)$ так, чтобы $\Phi(0) = 0, \Phi(n) \geq 0$
- Здесь n это номер шага.
- Амортизированная стоимость это стоимость плюс изменение потенциальной функции $c_n + \Phi(n) - \Phi(n-1)$
- Выбор потенциальной функции облегчает вычисления потому что…

$$\sum_i \left(c_i + \Phi(i) - \Phi(i-1)\right) = \Phi(n) - \Phi(0) + \sum_i c_i \geq \sum_i c_i$$

- Удачный выбор сделает выражение $\sum_i \left(c_i + \Phi(i) - \Phi(i-1)\right)$ проще, чем $\sum_i c_i$
- Обсуждение: как выбрать для массива?

Дополнение: метод потенциала

- Для массива поскольку при реаллокации вдвое $2 * s_n \geq c_n$

$\Phi(n) = 2 * s_n - c_n$

- Без реаллокации:

$c_i + \Phi(i) - \Phi(i-1) = 1 + (2 * s_i - C) - (2 * s_{i-1} - C) = 1 + 2(s_i - s_{i-1}) = 3$

- С реаллокацией $\Phi(i-1) = 2k - k = k$, $\Phi(i) = 2(k+1) - 2k = 2$

$c_i + \Phi(i) - \Phi(i-1) = (k+1) + 2 - k = 3$

- В итоге в любом случае $\sum c_i \leq 3N$ и мы доказали асимптотику $O(1)$
- В качестве упражнения проанализируйте стратегию роста в $\log(N)$ раз.

Обсуждение

- Выбор простого роста вдвое не всегда лучшая стратегия.
- Реальная стратегия из libstdc++ несколько сложнее и обладает рядом приятных теоретических свойств.

```
const size_type __len = size() + std::max(size(), __n);
```

- Попробуйте дома проанализировать эту стратегию и обосновать почему она выбрана в качестве основной.

Два механизма инициализации

- Расширенный синтаксис.
- Явный конструктор из списка инициализации.

```
class B {
  int a_;
public:
  B (int a) : a_(a) {}
  B (std::initializer_list<int> il);
};

B b(1), c{1}; // теперь они вызывают разные конструкторы
```

Списочная инициализация: вектора

```
// это вектор [14, 14, 14]
vector<int> v1 (3, 14);
// а это вектор [3, 14]
vector<int> v2 {3, 14};
```

- Это связано с наличием у вектора **нескольких** конструкторов.

```
➢ v(10); // размер 10, инициализация по умолчанию
➢ v(10, 1); // размер 10, инициализировать единицами
➢ v {10, 1}; // размер = размеру списка, инициализация списком
```

То же для ваших контейнеров

- Хорошая новость: initializer_list это тоже разновидность последовательного контейнера и его можно обходить итераторами.

```
template <typename T> class Tree {
  // тут какая-то специфика дерева
  bool add_node (T& data);

public:
  Tree(std::initializer_list<T> il) {
    for (auto ili = il.begin(); ili != il.end(); ++ili)
      add_node(*ili);
```

- Плохая новость: вам теперь надо следить есть ли он в классе.

Простое правило для { }

- Если в классе совсем нет конструкторов, это агрегат как в C

```
struct S { int x, y; }; S s = {1, 2}; // aggregate
```

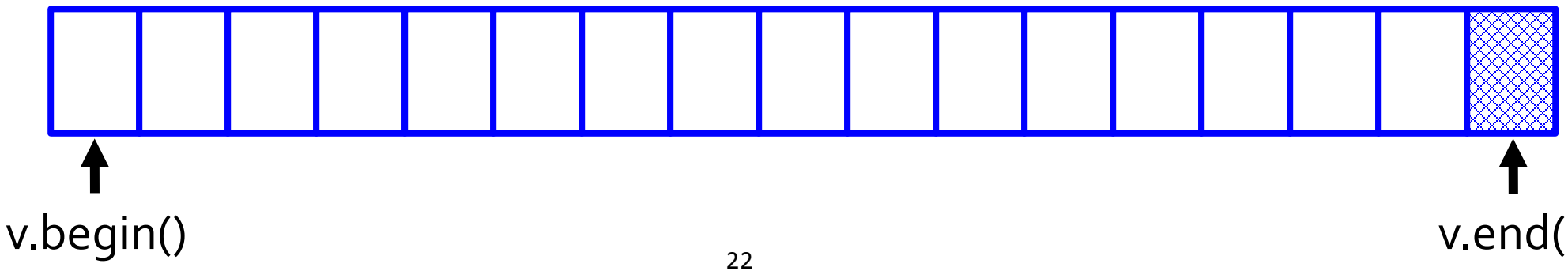
- Иначе, если есть конструктор из initializer_list, возьмётся он.
- Иначе, если есть любой другой конструктор, возьмётся он.

```
struct S {
  int x, y;
  S(int n) : x(n), y(n) {}
};

S s = {3}; // ctor
```

Первое представление об итераторах

```
vector<int> v(10);

// pi это указатель
auto pi = &v[0];
pi += 3;
assert (*pi == v[4])

// как узнать, что pi в конце?
```

```
vector<int> v(10);

// vi это итератор
auto vi = v.begin();
vi += 3;
assert (*vi == v[4]);

if (vi == v.end()) { что-то }
```



Абстракция указателя

- Важно, что итераторы не являются указателями, они абстрагируют их.
- В итоге любой контейнер может быть сконструирован из любого диапазона.

```
std::list<int> l {1, 2, 3};
std::vector<int> v(l.begin(), l.end());
```

- Это потрясающе удобно чтобы перекидывать один контейнер в другой
- Как бы вы написали конструктор из пары итераторов?

Конструирование из итераторов

- Наивная попытка вызывает у нас небольшую проблему.

```
template <typename T> class MyVector {
  // ....
public:
  MyVector (size_t nelts, T value); // 1
  template <typename Iter> MyVector (Iter fst, Iter lst); // 2
  // ....
MyVector<int> mvec (2, 2); // ошибка, выбран 2
```


https://godbolt.org/z/j1ohxWW8h

- Вектора
- SFINAE
- Вариабельные шаблоны
- Графы

Обсуждение: провал подстановки

- Что если подстановка в некотором контексте не может быть выполнена?

```
template<typename T>
typename T::ElementT at(T const& a, int i);

int *p = new int[30];

auto a = at<int*>(p, i); // Substitution failure
```

- Что если вывод типов в некотором контексте провален?

```
template <typename T> T max(T a, T b);

int g = max(1, 1.0); // Deduction failure
```

SFINAE

- **Substitution Failure Is Not An Error** (провал подстановки не является ошибкой).

```
template <typename T> T max(T a, T b);
template <typename T, typename U> auto max(T a, U b);

int g = max(1, 1.0); // подстановка в 1 провалена
                     // подстановка в 2 успешна
```

- Если в результате подстановки в непосредственном контексте класса (функции, алиаса, переменной) возникает невалидная конструкция, эта подстановка неуспешна, но не ошибочна.
- В этом случае второй фазы поиска имён просто не выполняется.

SFINAE и ошибки

- Не любая ошибочная конструкция это SFINAE. Важен контекст подстановки.

```
int negate (int i) { return -i; }

template <typename T> T negate(const T& t) {
  typename T::value_type n = -t();
  // тут используем n
}

negate(2.0); // ошибка второй фазы
```

- Здесь в контексте сигнатуры и шаблонных параметров нет никакой невалидности.

SFINAE и ошибки

- Не любая ошибочная конструкция это SFINAE. Важен контекст подстановки.

```
int negate (int i) { return -i; }

template <typename T> T::value_type negate(const T& t) {
  typename T::value_type n = -t();
  // тут используем n
}

negate(2.0); // substitution failure
```

- Здесь в контексте сигнатуры и шаблонных параметров выводится `T` → `double` и разумеется `T::value_type` невалидно.

Обсуждение

- Техника SFINAE кажется очень простой, но вообще-то её приложения многочисленны и часто очень нетривиальны.
- Рассмотрим задачу: у вас есть два типа и вам нужно определить равны ли они.

```
template <typename T, typename U> int foo() {
  // как вернуть 1 если T == U и 0 если нет?
}
```

- Обратим внимание, что это задача отображения из типов на числа.
- Прежде чем её решать, решим обратную задачу.

Интегральные константы

- Отображение из целых чисел на типы называется интегральной константной.

```
template <typename T, T v> struct integral_constant {
  static const T value = v;
  typedef T value_type;
  typedef integral_constant type;
  operator value_type() const { return value; }
};
```

- Возможна даже арифметика.

```
using ic6 = integral_constant<int, 6>;
auto n = 7 * ic6{};
```

Истина и ложь для типов

- Самые полезные из интегральных констант – самые простые.

```
using true_type = integral_constant<bool, true>;
```

```
using false_type = integral_constant<bool, false>;
```

- Всё это есть в стандарте: `std::integral_constant` и т.д.
- Попробуем написать простой определитель, чтобы проверить одинаковые ли два типа.

```
template<typename T, typename U>
struct is_same : std::false_type {};
```

- По умолчанию разные. Что дальше?

Равенство типов

- Теперь можно решить задачу определения равенства типов.

```
template<typename T, typename U>
struct is_same : std::false_type {};

template<typename T>
struct is_same<T, T> : std::true_type {}; // для T == T

template<typename T, typename U>
using is_same_t = typename is_same<T, U>::type;
```

- Благодаря SFINAE, будет работать.

```
assert(is_same<int, int>::value && !is_same<char, int>::value);
```


https://godbolt.org/z/6GdndGKzM

Определители и модификаторы

- Определитель: является ли тип ссылкой.

```
template <typename T> struct is_reference : false_type {};
template <typename T> struct is_reference<T&> : true_type {};
template <typename T> struct is_reference<T&&> : true_type {};
```

- Модификатор: убираем ссылку с типа, если ссылки не было, то оставляем тип.

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

- Для модификатора полезен алиас.

```
template <typename T>
using remove_reference_t = typename remove_reference<T>::type;
```

Четырнадцать категорий

- Любой тип в языке C++ попадает хотя бы под одну из перечисленных ниже категорий.

```
is_void
is_null_pointer
is_integral, is_floating_point // для T и для cv T& транзитивно
is_array; // только встроенные, не std::array
is_pointer; // включая указатели на обычные функции
is_lvalue_reference, is_rvalue_reference
is_member_object_pointer, is_member_function_pointer
is_enum, is_union, is_class
is_function // обычные функции
```

- Использование довольно тривиально.

```
std::cout << std::boolalpha << std::is_void<T>::value << '\n';
```

Свойства типов

- Также очень полезны определители свойств типов.

```
is_trivially_copyable // побайтово копируемый, memcpy
is_standard_layout // можно адресовать поля указателем
is_aggregate // доступна агрегатная инициализация как в C
is_default_constructible // есть default ctor
is_copy_constructible, is_copy_assignable
is_move_constructible, is_nothrow_move_constructible
is_move_assignable
is_base_of // B является базой (транзитивно, включая сам тип)
is_convertible // есть преобразование из A к B
```

- И многие другие (их реально десятки).

Обсуждение: std::copy

- Рассмотрим наивное копирование, чем-то похожее на алгоритм `std::copy`

```
template <typename InpIter, typename OutIter>
OutIter cross_copy(InpIter fst, InpIter lst, OutIter dst) {
  while (fst != lst) { *dst = *fst; ++fst; ++dst; }
  return dst;
}
```

- Увы, по сравнению с настоящим `std::copy` у него есть проблемы
- Можем ли мы их решить с помощью SFINAE?

benchcopy.cc

Решение проблемы std::copy

- Заведём хелпер и его специализацию для true

```
template<bool Triv, typename In, typename Out> struct CpSel {
  static Out select(In begin, In end, Out out)
    { return CopyNormal(begin, end, out); }
};

template<typename In, typename Out>
struct CpSel<true, In, Out> {
  static Out select(In begin, In end, Out out)
    { return CopyFast(begin, end, out); } // для простых типов
};
```

- Теперь сам алгоритм копирования будет просто решать кого он вызывает

Решение проблемы std::copy

- Также тривиально мы решаем проблему с копированием

```
template<typename In, typename Out>
Out realistic_copy(In begin, In end, Out out) {
  using in_type = pointee type (In); // как это написать?
  using out_type = pointee type (Out);

  enum { Sel = std::is_trivially_copyable<in_type>::value &&
               std::is_trivially_copyable<out_type>::value &&
               std::is_same<in_type, out_type>::value };

  return CpSel<Sel, In, Out>::select(begin, end, out);
}
```


benchcopy-2.cc

Обсуждение

- Теперь единственным облачком на горизонте остался emplace

```
struct S {
  S();
  S(int, double, int);
};

std::vector<S> v;

v.emplace_back(1, 1.0, 2); // создали на месте
```

- Но как это может работать для любого типа, если мы в общем случае не знаем количество аргументов конструктора?

- Вектора
- SFINAE
- Вариабельные шаблоны
- Графы

Вариабельные шаблоны

- Пример вариабельно шаблонной функции

```
template<typename ... Args> void f(Args ... args);
```

- Способы вызова:

```
f(); // OK, пачка не содержит аргументов
f(1); // OK, пачка содержит один аргумент: int
f(2, 1.0); // OK, пачка состоит из: int, double
```

- Специальная конструкция `sizeof...(Args)` либо `sizeof...(args)` возвращает размер пачки в штуках

Паттерны раскрытия

- Говорят, что пачка параметров "раскрывается" в теле функции или класса

```
template<typename ... Types> void f(Types ... args);

template<typename ... Types> void g(Types ... args) {
  f(args ...);    // → f(x, y);
  f(&args ...);   // → f(&x, &y);
  f(h(args) ...); // → f(h(x), h(y));
  f(const_cast<const Types*>(&args)...);
                  // → f(const_cast<const int*>(&x),
                        const_cast<const double*>(&y));
}

g(1, 1.0); // → g(int x, double y);
```

Задача: раскрытие пачек

- Допустим `args` это пачка параметров `x`, `y`, `z`
- Тогда во что раскроется следующее выражение?

```
f(h(args...) + h(args)...);
```

- Также интересно во что раскроется следующее

```
f(h(args, args...)...);
```

Решение

- Допустим `args` это пачка параметров `x`, `y`, `z`
- Тогда следующее выражение имеет сложный паттерн раскрытия пачки

```
f(h(args...) + h(args)...); // → f(h(x, y, z) + h(x),
                                  h(x, y, z) + h(y),
                                  h(x, y, z) + h(z));
```

- Аналогично (если чувствовать технологию, эти задачи однообразны)

```
f(h(args, args...)...); // → f(h(x, x, y, z),
                               h(y, x, y, z),
                               h(z, x, y, z));
```

Снова прозрачная оболочка

- На лекции по rvalue refs была написана почти идеальная прозрачная оболочка для одного аргумента

```
template<typename Fun, typename Arg>
decltype(auto) transparent(Fun fun, Arg&& arg) {
  return fun(forward<Arg>(arg));
}
```

- Можно ли использовать вариабельный шаблон и переписать её для произвольного количества аргументов?

Снова прозрачная оболочка

- На лекции по rvalue refs была написана почти идеальная прозрачная оболочка для одного аргумента

```
template<typename Fun, typename... Args>
decltype(auto) transparent(Fun fun, Args&&... args) {
  return fun(forward<Args>(args)...);
}
```

- Это очень простое и чисто техническое изменение
- Следует обратить особое внимание на паттерн совместного раскрытия при пробросе

Обсуждение: пробросим функцию?

- В функцие-подобном объекте оператор вызова может быть && аннотирован

```
template<typename Fun, typename... Args>
decltype(auto) transparent(Fun&& fun, Args&&... args) {
  return std::forward<Fun>(fun)(std::forward<Args>(args)...);
}
```

- Теперь функции тоже не требуется быть обязательно копируемой
- Выглядит это чуть страшнее, зато теперь тут не к чему особо придраться

Контейнеры тяжёлых классов

- Мы уже говорили о хранении тяжелых классах в контейнерах

```
template <typename T> class Stack {
  struct StackNode {
    T elem; StackNode *next;
    StackNode(T e, StackNode *nxt) : elem (e), next (nxt) {}
  };
public:
  void push(const T& elem) { top_ = new StackNode (elem, top_); }
  // .... и так далее ....
```

- Подумаем о следующем коде:

```
s.push(Heavy(100, 200, 300)); // всё очень плохо
```

Emplace

- Обычно метод контейнера, который размещает объект, а не пробрасывает его называют emplace

```
template <typename T> class Stack {
  // детали реализации
public:
  void push(const T& elem) { top_ = new StackNode (top_, elem); }

  template <typename U> void emplace(U&& ... args) {
    top_ = new StackNode(top_, forward<U>(args)...);
  }
```

- В стандартной библиотеке размещение поддерживают все последовательные контейнеры

empl-bench-eff.cc

Интерлюдия: шаблонные методы

- Шаблонный метод вне класса определяется с двумя наборами парамтеров: своими и своего класса

```
template <typename T>
template <typename... Args>
void Stack<T>::emplace_back(Args &&... args) {
  top_ = new StackElem(top_, std::forward<Args>(args)...);
}
```

- Это не опечатка. Каждый набор идёт отдельно.
- Все наборы совокупно участвуют в template-id метода и это важно для специализации.

Специализация шаблонных методов

- При специализации шаблонных методов, важно понимать: вы должны специализировать их по всем аргументам

```
template <typename T> struct Foo {
  template <typename U> void foo() { .... }
};

template <>
template <>
void Foo<int>::foo<int>() { .... }
```

- Иначе это будет частичная специализация

https://godbolt.org/z/403q8PTs4

Шаблонные методы против ООП

- Вы должны понимать, что любой открытый шаблонный метод в вашем классе обнуляет инкапсуляцию.

```
class Foo {
  int donottouch_ = 42;

public:
  template <typename U> void foo() { .... }
};

struct MyTag {};

template <> void Foo::foo<MyTag>() { donottouch_ = 14; }
```


https://godbolt.org/z/dbsPj593f

Обсуждение

- Тем не менее пока что мы не очень понимаем как использовать SFINAE, пусть даже с вариабельными шаблонами, для решения проблемы с конструктором из пары итераторов.
- Настало время этим заняться.

void_t

- Появился в C++17 как `std::void_t` но вообще-то довольно прост

```
template <typename...> using void_t = void;
```

- Интуитивно `void_t <T, U, V>` означает `void` если все типы легальны и нелегален если нелегален хоть один
- Думайте о нём как о логической коньюнкции SFINAE характеристик

Задача: зависимый тип

- С ранних пор была замечена полезность техники SFINAE для трюков и хаков. Классический пример: определить наличие зависимого типа в классе.

```
struct foo { typedef float foobar; };
struct bar { };

std::cout << std::boolalpha << ??? foo << " " << ??? bar;
```

- Это снова отображение из типов в целые и без SFINAE, задача опять выглядит не решаемой.

Решение: void_t

- Решение использует SFINAE и void_t

```
template <typename, typename = void>
struct has_typedef_foobar: std::false_type { };

template <typename T>
struct has_typedef_foobar<T,
  std::void_t<typename T::foobar>>: std::true_type{};
```

- Теперь мы можем определить вещи на этапе компиляции

```
struct foo { typedef float foobar; };
std::cout << std::boolalpha << has_typedef_foobar<foo>{};
```


https://godbolt.org/z/jP4fezEbe

Конструирование из итераторов

- Можно попытаться решить задачу с итераторами вот так

```
MyVector(size_t nelts, T value);

template <typename Iter,
          typename = void_t<decltype(*Iter{}),
                            decltype(++Iter{})>
         >
MyVector(Iter fst, Iter lst);
```

- Увы это не слишком изящно. Дело в том, что инкремент требует lvalue.
- Но его-то мы как раз пока и не можем создать. Хотя иногда везет.

https://godbolt.org/z/cx9vhz1b3

Абстракция значения

- В некоторых случаях (например для использование внутри `decltype`) хочется получить значение некоего типа.
- Часто для этого используется конструктор по умолчанию

```
template <typename T> struct Tricky {
  Tricky() = delete;
  const volatile T foo ();
};

decltype(Tricky<int>().foo()) t; // ошибка
```

- Но что делать, если его нет? Что такое "значение вообще" для такого типа?

Абстракция значения: declval

- Интересный способ решить эти проблемы это ввести шаблон функции (который выводит типы) без тела (чтобы его нельзя было по ошибке вызвать).

```
template <typename T> add_rvalue_reference_t<T> declval();
```

- Теперь всё просто

```
template <typename T> struct Tricky {
  Tricky() = delete;
  const volatile T foo ();
};

decltype(declval<Tricky<int>>().foo()) t; // ok
```

- Но какова природа этого значения?

Обсуждение

- Пожалуй есть всего три функции, для которых имеет смысл возвращать правую ссылку (то есть производить xvalue)
  - `std::move`
  - `std::forward`
  - `std::declval`
- Если вы хотите написать свою функцию, которая будет возвращать && это значит, что
  - Вы что-то делаете не так
  - Вы хотите ещё раз написать одну из упомянутых выше функций
  - Вы пишете функцию, аннотированную как &&

Конструирование из итераторов

- Теперь мы видим совсем изящное решение

```
MyVector(size_t nelts, T value);

template <typename Iter,
          typename = void_t<decltype(*std::declval<Iter&>()),
                            decltype(++std::declval<Iter&>())>
         >
MyVector(Iter fst, Iter lst);

....

MyVector v1(10, 3); // 1, поскольку 2 провалилось
MyVector v2(v1.begin(), v1.end()); // 2
```

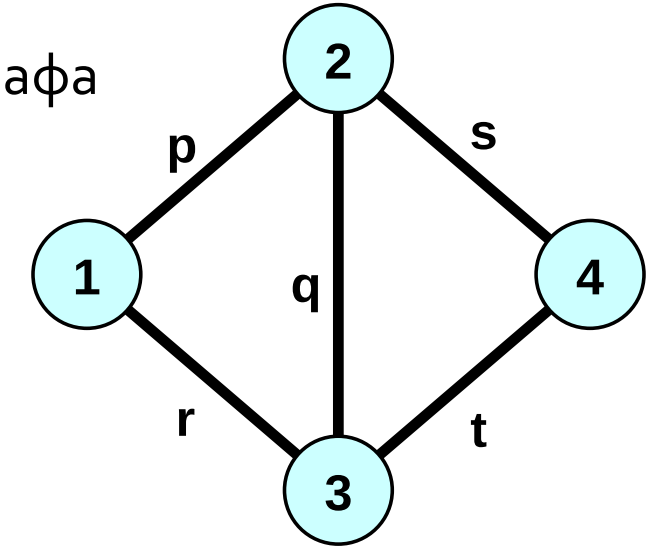

https://godbolt.org/z/35YneP3za

- Вектора
- SFINAE
- Вариабельные шаблоны
- Графы

Представление графа

- У Кнута в TAOCP приведено следующее представление графа

a	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
t	0	0	0	0	1	2	1	3	2	3	2	4	3	4
n	4	5	7	11	6	8	0	9	10	12	1	13	2	3
p	6	10	12	13	0	1	4	2	5	7	8	3	9	11



- Понятно ли почему эта таблица представляет этот граф?
- Важное свойство (заявлено в TAOCP 7.1.2.6.S): если a это ребро от vi к vj, а b это ребро от vj к vi с тем же именем, то $a = b \wedge 1$ и $b = a \wedge 1$
- Похоже такой граф можно построить не используя ничего кроме std::vector

HWCG: представление графа

- Необходимо написать класс графа, представленного как в TAOCP 7.1.2.6.S и написать для этого представления
  - списочную инициализацию из списка пар вершина-вершина

```
KGraph g {{1,2},{1,3},{2,3},{2,4},{3,4}}
```

  - обход в ширину
  - обход в глубину
- Допустим также, что с каждым ребром нужно связать дополнительную информацию EL, а с каждой вершиной дополнительную информацию VL.
- Можно ли сделать это вне самого графа?
- Можно ли дать возможность добавить эти данные как параметры графа?

HWCG: формальная постановка

- На стандартном вводе граф в обычном представлении v_1 -- v_2, w_e:

```
1 -- 2, 4
2 -- 3, 5
3 -- 4, 6
4 -- 1, 1
```

- Необходимо считать его в эффективное представление выше.
- Далее если граф не является двудольным, вывести ошибку. Если граф является двудольным, покрасить вершины первой доли в синий цвет (цвет это атрибут вершины), второй доли в красный цвет. Цвет вершины 1 всегда синий.
- В итоге вывести на стандартный вывод все вершины и цвет каждой

```
1 b 2 r 3 b 4 r
```

Литература

- [CC11] ISO/IEC 14882 – "Information technology – Programming languages – C++", 2011
- [BS] Bjarne Stroustrup – The C++ Programming Language (4th Edition) , 2013
- [EM] Scott Meyers, "Effective Modern C++: 42 Specific Ways to Improve Your Use of C++11 and C++14"
- [SM] Scott Meyers "Type Deduction and Why You Care", CppCon, 2014
- [VJ] Davide Vandevoorde, Nicolai M. Josuttis – C++ Templates. The Complete Guide, 2nd edition, Addison-Wesley Professional, 2017

СЕКРЕТНЫЙ УРОВЕНЬ

Массивы

Обсуждение

- Количество вещей, которые нужно знать, чтобы спроектировать свой собственный вектор впечатляет.
- Нет ли в векторе тем не менее проблем?

```
int s_array[10]; // на стеке, фиксированный размер

vector<int> vec(10); // в куче, произвольный размер
```

От встроенных массивов к array

```
int s_array[10]; // на стеке, фиксированный размер
int s_varray[n]; // ошибка если n не константа (VLA запрещены)

int *d_array = new int[n]; // в куче, произвольный размер
vector<int> vec(n); // в куче, произвольный размер

array<int, 10> arr; // на стеке, фиксированный размер
```

- Использование `std::array` так же эффективно как использование встроенного массива
- В то же время `std::vector` — плохая замена встроенному массиву, так как требует работы с динамической памятью.