C++

Fall 2020

compscicenter.ru

Башарин Егор, t.me/egorbasharin

Филипп Грабовой, t.me/phil_grab

Лекция XI

Value Categories, Move Semantics, Perfect Forwarding

Section 1

категории значений `glvalue` и `prvalue`

Motivation

Наличие категорий значений выражений позволяет создавать быстрые программы:

- за счет переиспользования ресурсов временных или перемещаемых объектов
- за счет оптимизаций компилятора (например, copy elision)

Expression & value category

В C++ у выражений есть свойство `value category`.

Любое выражение имеет либо категорию `glvalue`, либо `prvalue`.

`glvalue` & `prvalue`

Результат `glvalue` выражения — **ссылка на объект**[1].

Результат `prvalue` выражения — **значение**[2], либо имеет тип `void`.

```
(1) Раз есть ссылка, значит и участок памяти, где располагается объект, фиксирован.
(2) Значение можно представить как объект, память для которого не фиксирована
    и представляет некое временное хранилище для него.
```

объекты и значения

Создание объекта подразумевает выделение памяти для него.

Если эта память фиксирована ("связана с объектом"), то можно использовать ссылки и указатели на этот объект.

объекты и значения

Если результат выражения это "новый объект", то нет необходимости фиксировать для него память, так как он может быть промежуточным вычислением более обширного выражения[1].

Мы называем такой объект **значением**, так как работаем с памятью, в которой он находится, а не с объектом как таковым. Например, если мы инициализируем переменную **значением**, то выделяем место для объекта, а потом переносим байты из **значения**. (Copy Elision)

---

(1) Если бы память фиксировалась, то для некоторых типов перемещение объекта из одного участка памяти в другой мог бы потребовать честный вызов конструктора копирования и деструктора, но для временного объекта, достаточно просто скопировать байты

объекты и значения

Пример

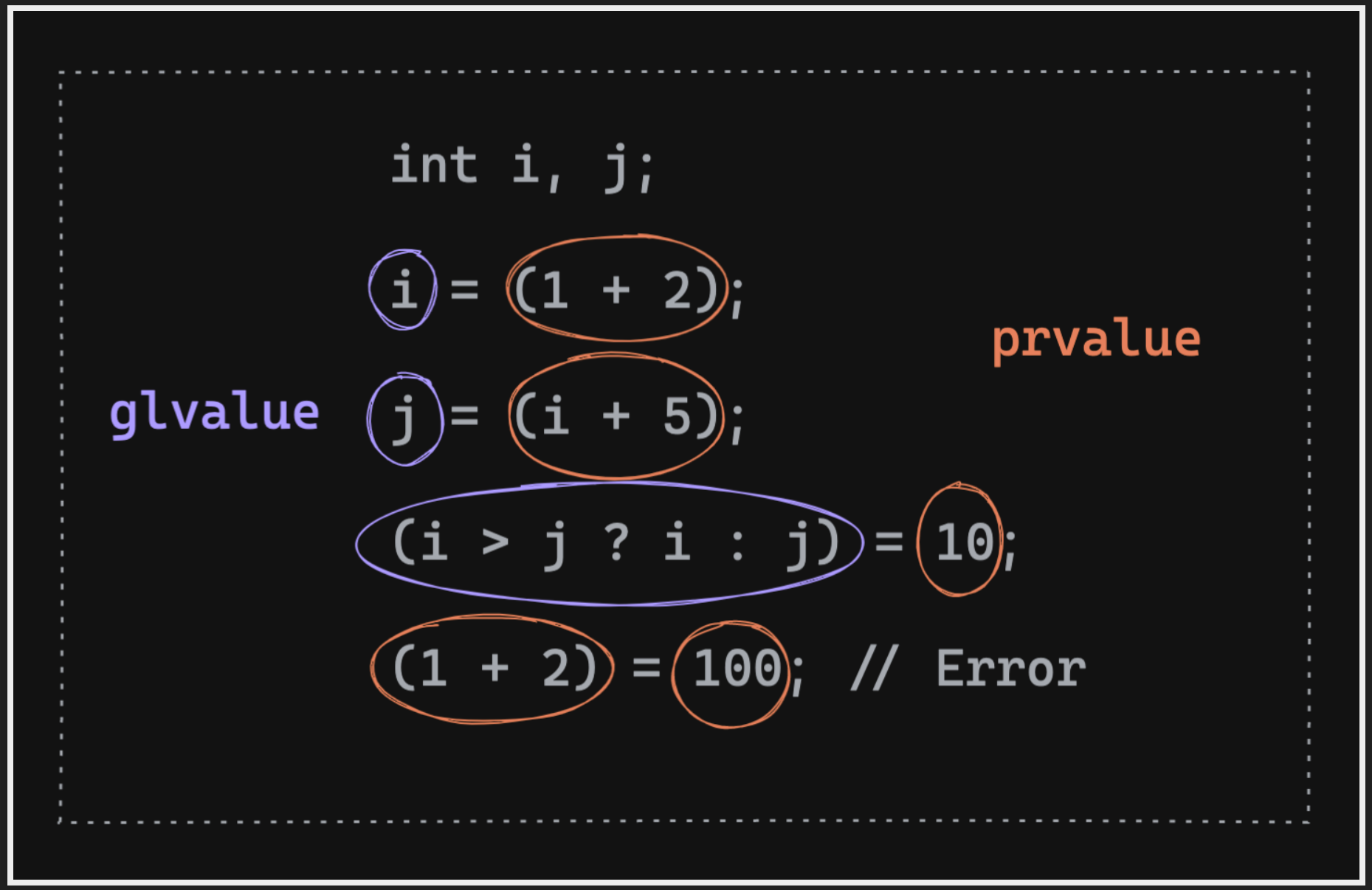
```
int i = 2;
```

Создание переменной выделяет память и "связывает" ее с **объектом** типа `int`.

Для доступа к **объекту**, используется имя `i`.

Литерал 2 — это **значение**, используемое для инициализации объекта, на который ссылается `i`.

glvalue & prvalue



glvalue & prvalue

```
struct T { int i; };
T makeT() { return T{1}; }

T t{2};
T& globalT() { return t; }

int main() {
    T t{10};
    t = makeT();
    t = globalT();
}
```

Section 2

lvalue, xvalue, rvalue, rvalue-references

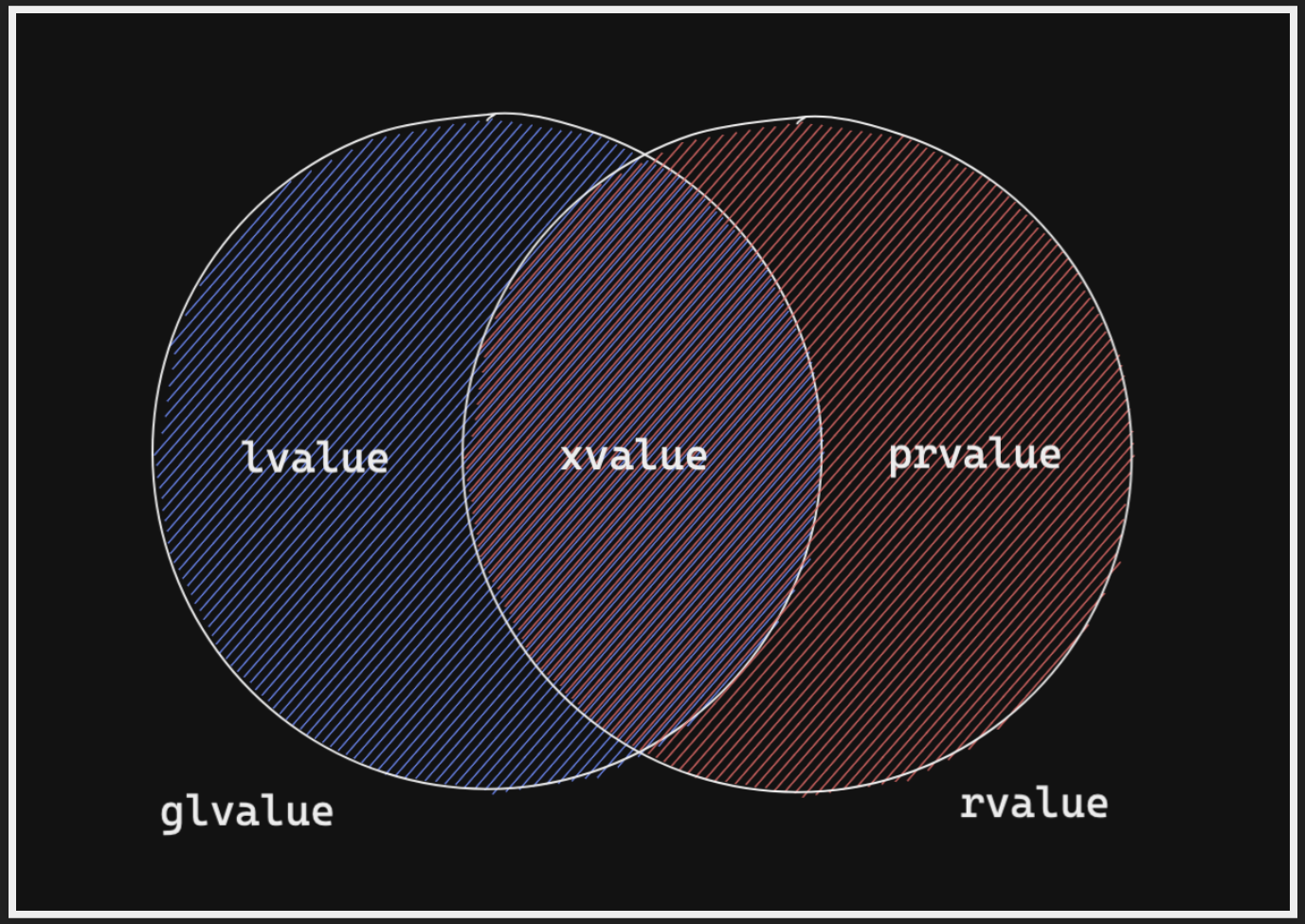
Value Categories

`xvalue`-выражение — это `glvalue`-выражение, чей результат ссылается на объект, у которого можно переиспользовать ресурсы

`lvalue` — это `glvalue` за исключением `xvalue`

`rvalue` — это объединение `xvalue` и `prvalue`

Value Categories



Этимология

`rvalue` & `lvalue`

Так исторически сложилось, что `r` и `l` указывают на то, с какой стороны от оператора присваивания могут быть использованы эти выражения.

Но, это не всегда так, поэтому возникает путаница:

Этимология

`glvalue`, `prvalue`, `xvalue`

- `glvalue` — "generalized" lvalue
- `prvalue` — "pure" rvalue
- `xvalue` — expiring value

rvalue-references

Пример lvalue-ссылок:

```
int main() {
    int i = 1;
    int& lvalueRef1 = i;
    const int& lvalueRef2 = i;
    const int& lvalueRef3 = 10; // extends lifetime
}
```

Для rvalue-сслылок используется двойной амперсанд, а инициализаторами могут быть только rvalue-выражения[1]:

```
int main() {
    int i = 1;
    int&& rvalueRef1 = i;   // compile-time error
    int&& rvalueRef2 = 10;  // OK, extends lifetime
}
```

Здесь и далее в секции будем рассматривать rvalue-ссылки на `int` только для того, чтобы показать синтаксис и примеры работы, полезный случай использования разберем в следующей секции.
(1) Не все `rvalue`-выражения подходят. Пример: вызов функции, которая возвращает void.

rvalue-references

```
int&& rvalueRef = 10;  // OK, extends lifetime
```

`10` — это `prvalue`-выражение, а значит и `rvalue`-выражение.

`rvalueRef` может ссылаться на объект, который "связан" с памятью: поэтому создается временный объект типа `int` и инициализируется значением `10`.

rvalue-references

Выражение `rvalueRef` — это `lvalue`-выражение

```
int&& rvalueRef = 10;  // OK, extends lifetime
int&& rvalueRef2 = rvalueRef; // Error
```

Можно использовать `static_cast`:

```
int&& rvalueRef2 = static_cast<int&&>(rvalueRef);
```

Инициализатор — **`xvalue`-выражение**

xvalue

Для получения xvalue-выражения можно привести lvalue-выражение к rvalue-ссылке:

```
int i = 10;
int&& rvalueRef3 = static_cast<int&&>(i);
```

rvalue-references & functions

```
int f(const int&) { return 1; }
int f(int&&) { return 2; }
int&& g(int&& x) { return static_cast<int&&>(x); }

int main() {
    int i = 10;
    assert(f(i) == 1); // pass lvalue-expr as arg
    assert(f(1) == 2); // pass prvalue-expr as arg

    // pass xvalue-expr as arg
    assert(f(static_cast<int&&>(i)) == 2);
    assert(f(g(1)) == 2);
}
```

Перегрузка функции выбирается в зависимости от категории значения аргумента.

Вызов функции, возвращающей `rvalue`-ссылку[1] — еще один способ получить `xvalue`-выражение.

---

(1) Не возвращайте ссылки на объекты, созданные в теле функции (dangling reference)!!!

rvalue-references & functions

```
int&& g(int&& x) {
    return static_cast<int&&>(x);
}
```

Тип параметра функции требует, чтобы аргументом было `rvalue`-выражение.

Выражение `x` внутри функции — это **`lvalue`-выражение**, чтобы получить `rvalue`, следует воспользоваться `static_cast`.

Section 3

move-semantics

Пример 1

```
template <class T> struct Vector {
    Vector() = default;
    Vector& operator=(const Vector& o);
private:
    value_type* buf_ = nullptr;
    size_type size_ = 0;
    size_type cap_ = 0;
};

Vector<T> createAnyVector();

int main() {
    Vector<T> v;
    v = createAnyVector();
}
```

Какие здесь проблемы?

Пример 1

Пусть результат функции `createAnyVector` это вектор `TMP`.

После выполнения этого утверждения:

```
v = createAnyVector();
```

вектор `TMP` будет уничтожен: **вызов деструкторов у всех элементов вектора и деаллокация**.

Но `TMP` передается в `operator=` по константной ссылке, поэтому придется **аллоцировать** память `buf_` и **копировать** объекты из `o.buf_`.

Как хотелось бы: раз объект "временный", то он никому не нужен — заберем его ресурсы и избавимся от **лишней работы**.

Пример 1

Fix:

```
template <class T> struct Vector {
    Vector() = default;
    Vector& operator=(const Vector& o);
    Vector& operator=(Vector&& o);
private:
    value_type* buf_ = nullptr;
    size_type size_ = 0;
    size_type cap_ = 0;
};

Vector<T> createAnyVector();

int main() {
    Vector<T> v;
    v = createAnyVector();
}
```

Пример 1

Теперь будет выбран `operator=(Vector&& o)`, так как выражение `createAnyVector()` имеет категорию `rvalue`.

Если параметр функции является rvalue-ссылкой, то можно использовать (заимствовать) ресурсы аргумента, который соответствует этому параметру.

Source code: Click me

Пример 2

```
void someFunc(Vector<T>&& vec) {
    Vector<T> v;
    v = vec;
}
```

Пример синтетический. Можно было бы сразу инициализировать v вектором vec,
но мы рассматриваем работу с разными перегрузками оператора=

Пример 2

```
void someFunc(Vector<T>&& vec) {
    Vector<T> v;
    v = vec;
}
```

Выражение справа от знака = имеет категорию `lvalue`, поэтому вызовется `const ref` перегрузка оператора.

Но, нам известно, что `vec` "временный", так как параметр — это rvalue-ссылка.

Нужно явно указать, что справа от знака = `rvalue`-выражение:

```
v = static_cast<Vector<T>&&>(vec); // xvalue
```

Пример 2

std::move from <utility>

```cpp
#include <utility>

void someFunc(Vector<T>&& vec) {
    Vector<T> v;
    v = std::move(vec); // same as static_cast<Vector<T>
}
```

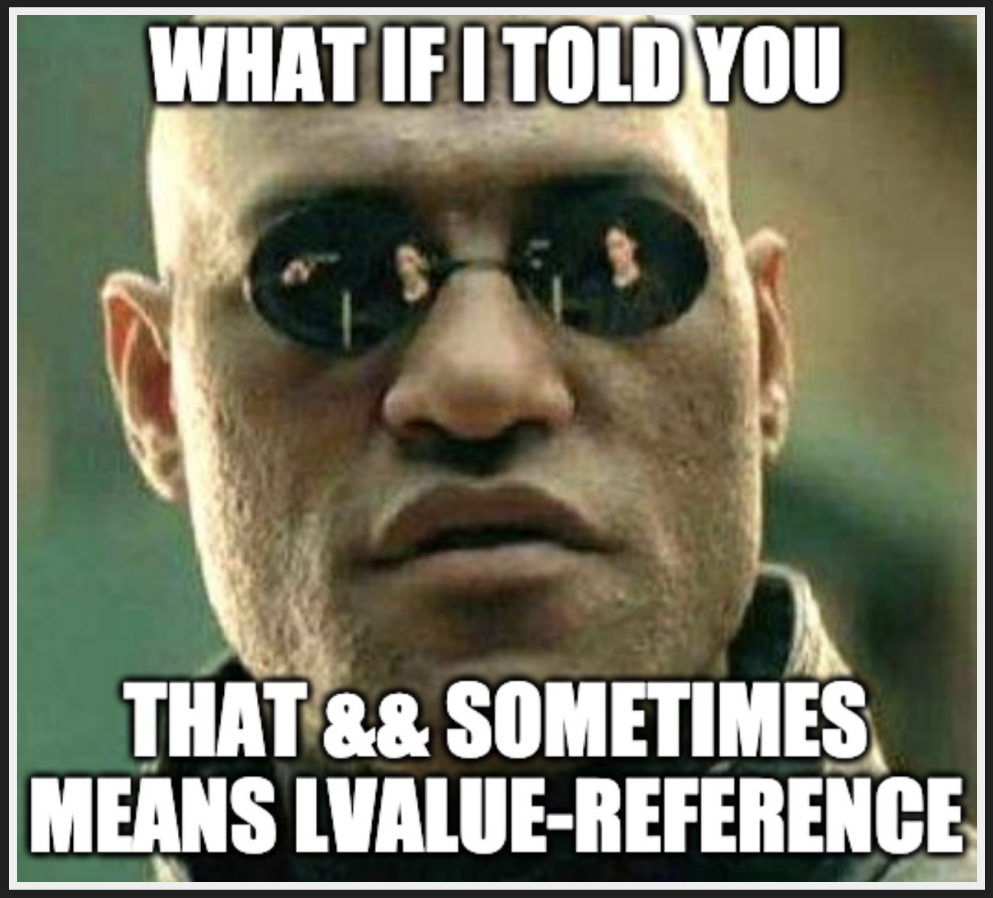
Чтобы понять как устроен std::move, нужно разобраться с темой универсальных ссылок

`move`-semantics

- `move`-семантика позволяет избежать ненужных вычислений, тем самым улучшает производительность программы
- пользуемся тем, что можем забрать ресурсы из "временных" объектов
- для того чтобы различать "временность" объекта, заводим две перегрузки функции: с lvalue ссылкой и rvalue ссылкой.
- rvalue ссылка лишь требует, чтобы ее инициализировали временным объектом, выражение состоящее из имени ссылки имеет категорию `lvalue`
- чтобы преобразовать `lvalue` в `rvalue` используем `std::move`

Section 4

universal references



defining universal references

```
template <class T>
void f(T&& t) { }       // t -- universal reference

struct S {
    template <class T>
    void g(T&& t) { }  // t -- universal reference
};
```

Параметр шаблонной функции, объявленный как `rvalue`-ссылка на параметр шаблона **этой функции**.

```
Для примера выше:
* `t` -- параметр шаблонной функции
* `T&& t` -- объявление параметра функции
* `T` -- параметр шаблона
* `T&&` -- rvalue-ссылка на параметр шаблона
```

usage example

```cpp
template <class T>
void f(T&& t) { }

// 1.
f(10);              // rvalue -> [T = int] -> [T&& = int&&

// 2.
int i = 10;
f(i);               // lvalue -> [T = int&] -> [T&& = int&

// 3.
f(std::move(i));  // rvalue -> [T = int] -> [T&& = int&&
```

https://cppinsights.io/s/e652eac4

Первая стрелка показывает результат вывода типа
Вторая стрелка показывает результат схлопывания ссылок

Reference collapsing

Схлопывание ссылок

Проблема ссылки на ссылку при использовании псевдонимов типов и параметров шаблона.

	`[T = U&]`	`[T = U&&]`
`T&`	`U&`	`U&`
`T&&`	`U&`	`U&&`

https://cppinsights.io/s/9814f738

Finding universal reference

```
void f(int&& r) {  }                  // (1)

template <class T>
void g(T&& t) { }                     // (2)


template <class T>
void h(const T&& t) { }               // (3)


template <class T>
void p(std::vector<T>&& v) { } // (4)
```

Finding universal reference

```
template <class T>
struct S {

    void f(T&& t) {}    // (1)

    template <class U>
    void g(U&& u) {}    // (2)

};
```

unveil `std::move`

Чтобы понять, как работает `std::move`, напишем свой:

Заготовка: Click me

Решение: Click me

Section 5

perfect-forwarding

Example

```
struct Object {};
int processImpl(const Object&) { return 1; }
int processImpl(Object&&) { return 2; }

template <class T>
int process(T&& t) {
    return processImpl(t);
}

int main() {
    Object obj;
    assert(process(obj) == 1);
    assert(process(std::move(obj)) == 2);
    assert(process(Object{}) == 2);
}
```

Example

```
...
template <class T>
int process(T&& t) {
    return processImpl(t);
}
...
```

Всегда будет выбираться перегрузка с параметром lvalue-ссылкой, так как выражение `t` имеет категорию `lvalue`

Как починить?

Fixing...

```
...
template <class T>
int process(T&& t) {
    return processImpl(t);
}
...
```

Что хотелось бы сделать:

- `T` — ссылка:
  - `lvalue`: `processImpl(t)`
  - `rvalue`: `processImpl(std::move(t))`
- `T` — не ссылка: `processImpl(std::move(t))`

Fixed

`std::forward` from `<utility>`

```
...
template <class T>
int process(T&& t) {
    return processImpl(std::forward<T>(t));
}
...
```

unveil `std::forward`

Чтобы понять, как работает `std::forward`, напишем свой:

Заготовка: Click me

Решение: Click me