Семинар #7: Move-семантика и умные указатели.

Копирование и перемешение

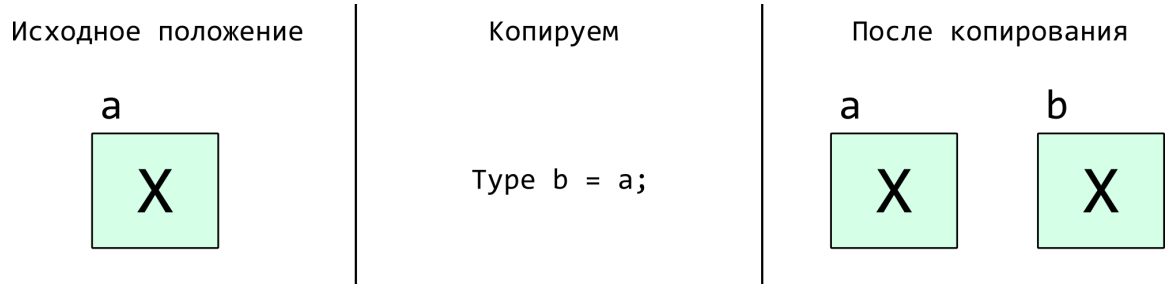
Помимо операции копирования в C++ есть ещё операция перемещения. Эту операцию можно применять к объектам большинства типов. Рассмотрим различие копирования и перемещения на следующем примере. Пусть у нас есть объект `a` некоторого типа `Type`, находящийся в состоянии `X`:

```
Type a = X;
```

Рассмотрим, что будет происходить при копировании и перемещении этого объекта.

Операция копирования

Копируем `a` в новый объект `b`:



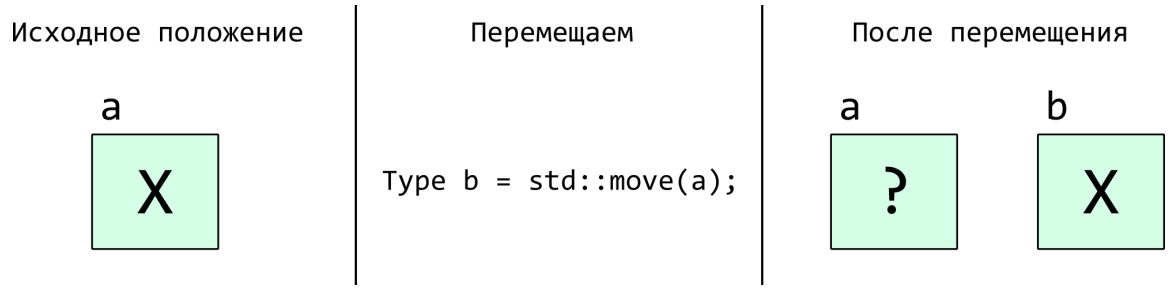
После копирования объект `b` будет находится в том же состоянии, что и `a`.

То, каким образом производится копирование, зависит от типа объекта:

- Если `Type` это скалярный тип, то происходит копирование байт из одного объекта в другой.
- Если `Type` это класс, то вызывается конструктор копирования.
- Если `Type` это агрегат, то операция копирования применяется к каждому элементу агрегата.

Операция перемещения

Перемещаем `a` в новый объект `b`. Для этого используется стандартная функция `std::move`:



После перемещения объект `b` будет находится в том состоянии, в котором объект `a` находился до перемещения. Но состояние объекта `a` может измениться на другое (на картинке это состояние отмечено значком вопроса). То, в каком состоянии окажется `a` после перемещения, различается для разных типов. Однако это состояние должно быть корректным. Это означает, что мы можем переиспользовать переменную `a` в дальнейшем.

То, каким образом производится перемещение, зависит от типа объекта:

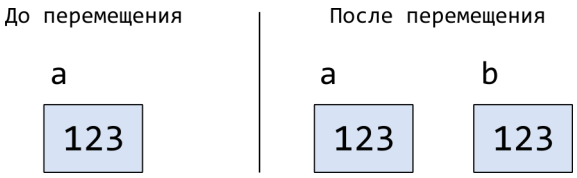
- Если `Type` это скалярный тип, то происходит копирование байт из одного объекта в другой.
- Если `Type` это класс, то вызывается конструктор перемещения (этот конструктор будет разобран позже). Конструктор перемещения может изменить объект из которого происходит перемещение. Если конструктора перемещения у этого класса нет, то вызывается конструктор копирования.
- Если `Type` это агрегат, то операция перемещения применяется к каждому элементу агрегата.

Перемещение объектов различных типов

Перемещение объектов скалярных типов

При перемещении объекта скалярного типа он копируется побайтово также как и при копировании. То есть, для скалярных типов нет никакой разницы между копированием и перемещением.

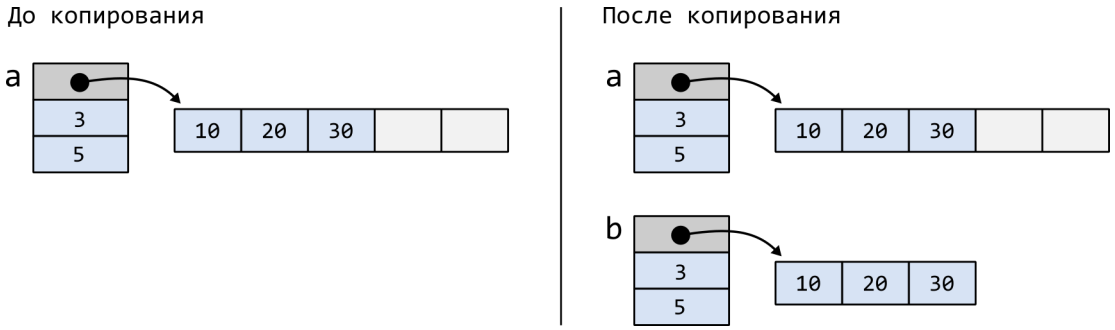
```
int a = 123;
int b = std::move(a);
```



Копирование вектора

Так как вектор является классом, то, что происходит при копировании, задаётся в конструкторе копирования вектора. Конструктор копирования класса `std::vector` написан таким образом, чтобы при копировании происходило глубокое копирование вектора.

```
std::vector<int> a {10, 20, 30};
a.reserve(5);
std::vector<int> b = a;
```

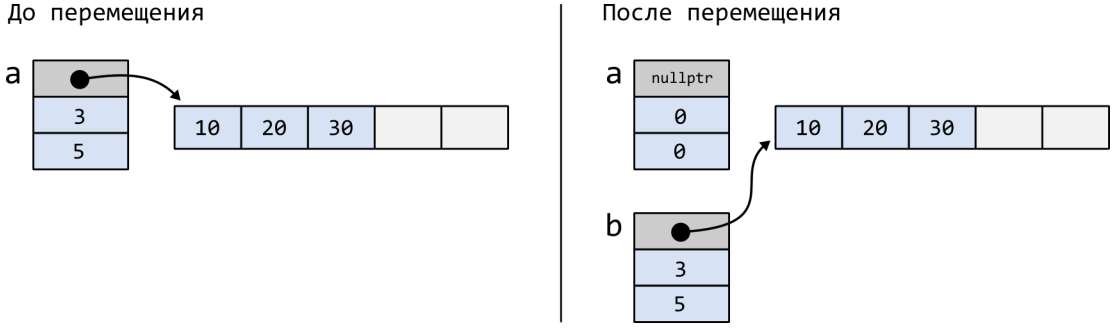


Перемещение вектора

Так как вектор является классом, то, что происходит при перемещении, задаётся в конструкторе перемещения. Конструктор перемещения вектора написан таким образом, чтобы при перемещении происходило следующее:

1. Поверхностное копирование (то есть копируется только сам объект вектора)
2. Зануление полей объекта, из которого производится перемещение.

```
std::vector<int> a {10, 20, 30};
a.reserve(5);
std::vector<int> b = std::move(a);
```

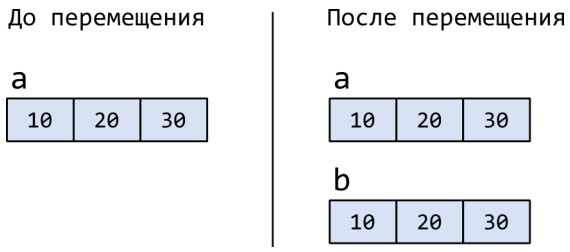


После перемещения вектор `a` становится пустым, но продолжает находиться в корректном состоянии. В него, например, можно скопировать или переместить другой вектор. Перемещение вектора намного более быстрая операция, чем его копирование, особенно для больших векторов.

Перемещение агрегатного типа `std::array<int>`

Так как массив `std::array` является агрегатным типом, то при перемещении объекта этого типа, операция перемещения применяется к каждому элементу `std::array`. В данном случае типом элемента является скалярный тип `int`. Поэтому перемещение такого массива не будет отличаться от копирования.

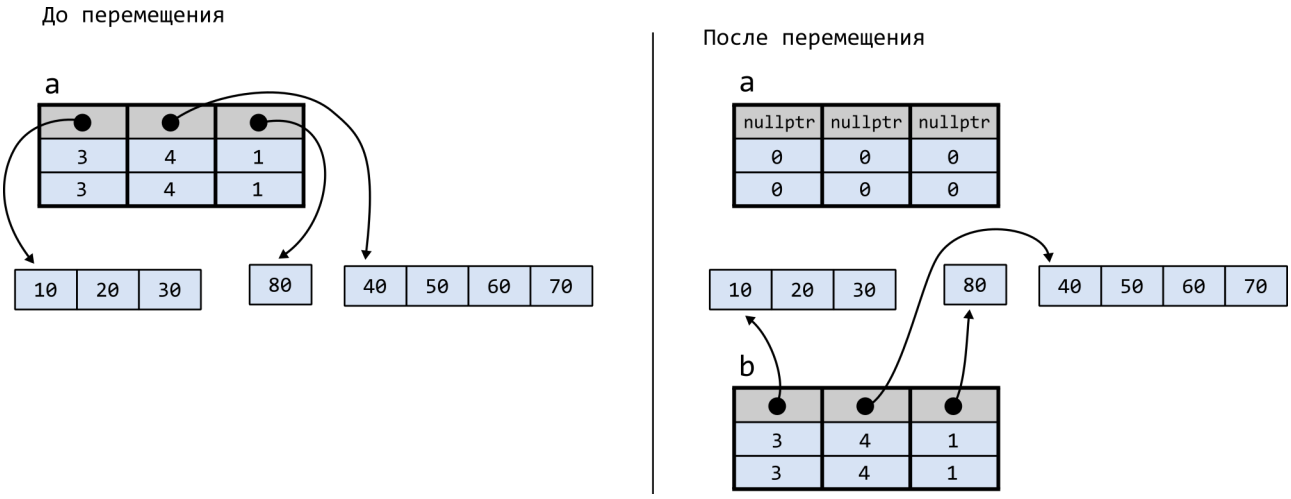
```
std::array<int, 3> a {10, 20, 30};
std::array<int, 3> b = std::move(a);
```



Перемещение агрегатного типа `std::array<std::vector<int>>`

В данном случае типом элемента агрегата является класс `std::vector<int>`. Поэтому перемещение объекта типа `std::array<std::vector<int>>` будет заключаться в перемещении каждого из векторов, находящихся в массиве.

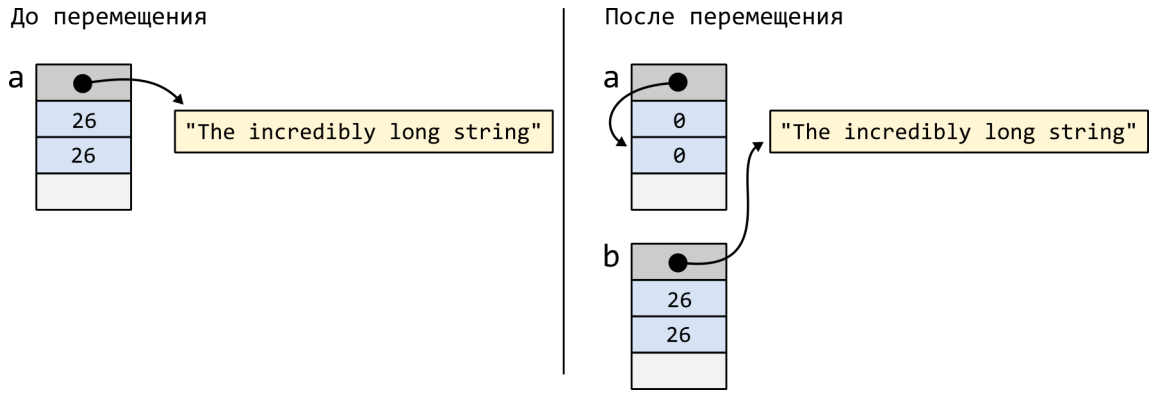
```
using std::vector;
std::array<vector<int>, 3> a {vector{10, 20, 30}, vector{40, 50, 60, 70}, vector{80}};
std::array<vector<int>, 3> b = std::move(a);
```



Перемещение длинной строки

Длинная строка перемещается почти также, как и вектор. Перемещение длинной строки гораздо более эффективная операция, чем её копирование.

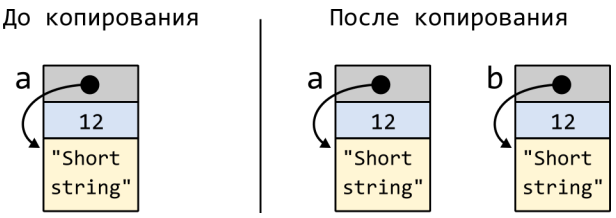
```
std::string a = "The incredibly long string";
std::string b = std::move(a);
```



Копирование короткой строки

Интересен случай короткой строки. Из-за оптимизации малой строки (*small string optimization*) строка в памяти имеет необычный вид – одно из её полей является указателем, который указывает на другое полей. Копирование такой строки не совсем тривиально, так как указатель нужно задать правильным образом.

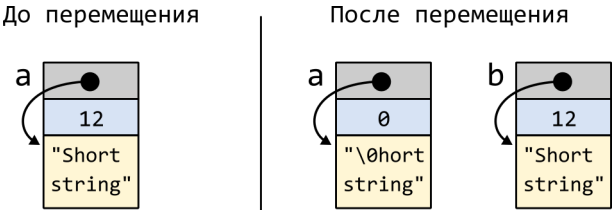
```
std::string a = "Short string";
std::string b = a;
```



Перемещение короткой строки

Перемещая короткую строку `a` мы создаём новую строку `b` тем же способом, что и при копировании. Однако после этого нам нужно ещё занулить начальную строку `a`, чтобы поведение короткой строки при перемещении было согласовано с поведением длинной строки. Таким образом получается необычная ситуация, когда перемещение для короткой строки работает немного медленней, чем копирование.

```
std::string a = "Short string";
std::string b = std::move(a);
```

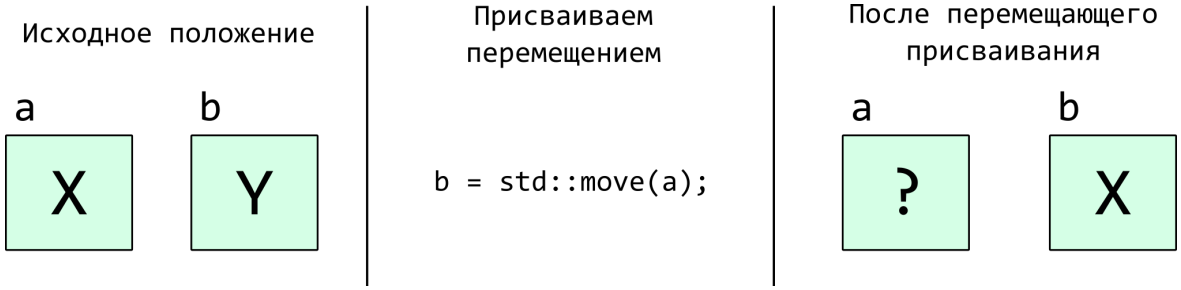


Операция перемещающего присваивания

Перемещение может происходить не только при создании нового объекта, но и при присваивании к уже существующему объекту. Это делается с помощью так называемой операции перемещающего присваивания. Пусть у нас есть объекты:

```
Type a = X;
Type b = Y;
```

Рассмотрим, что будет происходить при перемещающем присваивании одного объекта другому:



То, каким образом производится перемещающее присваивание, зависит от типа объекта:

- Если `Type` это скалярный тип, то происходит копирование байт из одного объекта в другой.
- Если `Type` это класс, то вызывается оператор присваивания перемещения (этот оператор будет разобран позже). Этот перегруженный оператор может изменить присваиваемый объект. Если оператора присваивания перемещения у этого класса нет, то вызывается оператор присваивания копирования (то есть обычнй оператор присваивания).
- Если `Type` это агрегат, то операция перемещающего присваивания применяется к каждому его элементу.

В каких случаях происходит перемещение

Важно понимать, что перемещение может происходить не только при использовании `std::move`, но и в других случаях. В этой главе мы рассмотрим такие случаи.

Определение понятия "выражение"

Выражение (англ. *expression*) – это последовательность операторов и их операндов, которая определяет некоторое вычисление. Учтите, что существуют такие операторы, как оператор вызова функции (также известный как оператор круглые скобочки `()`), а также оператор индексирования (`[]`), оператор точка и стрелочка. Поэтому, например, следующая последовательность является выражением:

```
f(2 * a[i + 1]) + c.x / p->call()
```

Простейшими выражениями, являются выражения, состоящие из одного имени переменной или литерала. Например, `a` или `10` являются примерами простейших выражений.

Категории выражений

Выражения можно поделить на две категории: lvalue и rvalue. Точное определение того что такое lvalue, а что такое rvalue тут пока не будет дано (так как это определение очень объёмно). Но можно думать о категории выражения следующим образом:

- *lvalue-выражения* или просто *lvalue* — это такие выражения, которые соответствуют какому-то объекту в памяти и у таких выражений можно получить адрес. Примеры таких выражений:

  ```
  a   arr[i]     *p     arr[1 + func(a / b + c)]
  ```

- *rvalue-выражения* или просто *rvalue* — все остальные выражения. Часто (но не всегда) это выражения можно охарактеризовать как временные. Примеры таких выражений:

  ```
  10       a + 1     a * b       abs(a)     -a
  ```

Таким образом, любое выражение характеризуется двумя независимыми свойствами:

1. Тип выражения
2. Категория выражения: lvalue или rvalue

Когда происходит перемещение

1. При инициализации объекта rvalue-выражением:

   ```
   Type a = rvalue-expression;
   Type b{rvalue-expression};
   Type c(rvalue-expression);
   ```

   Рассмотрим пример:

   ```
   #include <iostream>
   #include <string>
   int main()
   {
       std::string a{"Cat"};
       std::string b{"Mouse"};
       std::string c = a;      // Строка a скопируется в объект c, так как a это lvalue.

       std::string d = a + b;  // Сначала создастся временная строка a + b.
                               // Затем эта временная строка переместится в объект d.
                               // Компилятор поймёт, что в данном случае нужно перемещать,
                               // так как выражение a + b это rvalue.
   }
   ```

2. При присваивании, если справа находится rvalue-выражение

```
a = rvalue-expression;
```

Рассмотрим пример:

```
#include <iostream>
#include <string>
int main()
{
    std::string a{"Cat"};
    std::string b{"Mouse"};
    std::string c;
    std::string d;

    c = a;          // Строка a скопируется в объект c, так как a это lvalue.

    d = a + b;      // Сначала создастся временная строка a + b.
                    // Затем эта временная строка переместится в объект d,
                    // так как a + b это rvalue.
}
```

3. При передаче rvalue-выражения в функцию, принимающую по значению:

```
void func(Type x);
...
func(rvalue-expression);
```

Рассмотрим пример:

```
#include <iostream>
#include <string>
void func(std::string x)
{
    std::cout << x << std::endl;
}

int main()
{
    std::string a{"Cat"};
    std::string b{"Mouse"};

    func(a);     // Строка a скопируется в функцию func, так как a - это lvalue
    func(a + b); // Временная строка a + b переместится в func, так как a + b - это rvalue
}
```

Функция `std::move`

Стандартная функция `std::move` из библиотеки `utility` на самом деле сама ничего никуда не перемещает. Эта функция просто преобразует lvalue-выражение в rvalue-выражение. То есть, если есть переменная `a`, то выражение `std::move(a)` является rvalue.

```
void func(std::string x);
...
std::string a{"Cat"};
func(a);            // Строка a скопируется в функцию func, так как a - это lvalue
func(std::move(a)); // Строка a переместится в func, так как std::move(a) - это rvalue
                    // В данной ситуации мы перемещаем не временную строку, а именно строку a,
                    // поэтому после этой операции строка a станет пустой.
```

Польза перемещения

Перемещение очень полезно тогда, когда объект из которого производится перемещение перестаёт быть нужным после перемещения. В этих случаях перемещение позволяет существенно ускорить программу.

Перемещение временных объектов

Рассмотрим следующий пример. Есть две строки `a` и `b`, которые потенциально могут быть очень длинными. Мы хотим конкатенировать эти строки и сохранить результат в другой строке `s`.

```
s = a + b;
```

В этом случае будут произведены следующие операции:

1. Конкатенирование строки с помощью метода `operator+` строки. При этом создаётся некоторый временный объект (типа `std::string`), в котором будет хранится результат конкатенации.
2. Перемещение этого временного объекта в строку `s`.

Без перемещения, на втором шаге нам бы пришлось копировать временный объект в строку `s`, что могло было быть намного менее эффективно. Аналогично, перемещение ускоряет программу, когда мы передаём временные объект в функции по значению.

```
void func(std::string s) {...};
// ...
func(a + b); // Тут используется перемещение временного объекта a + b
```

Ускорение некоторых операций с помощью перемещения

Перемещение может быть полезно не только для временных объектов. Перемещая обычные невременные объекты можно ускорить многие алгоритмы. Рассмотрим, например, задачу обмена значений двух строк, которые потенциально могут быть очень длинными:

```
std::swap(a, b);
```

Функция `swap` просто перемещает объекты и реализована следующим образом:

```
template<typename T>
void swap(T& a, T& b)
{
    T temp = std::move(a);
    a = std::move(b);
    b = std::move(temp);
}
```

Без перемещения объекты пришлось бы многократно копировать внутри функции `swap`, что было бы очень неэффективно для объектов, владеющих памятью в куче. С перемещением `swap` работает намного быстрее для объектов, выделяющих память в куче. Соответственно, будут работать намного быстрее все алгоритмы, использующие `swap` (например, алгоритмы сортировки).

Возвращаемое значение функции

Перемещение может помочь при возврате объекта из функции. Но в этом случае обычно нет необходимости использовать `std::move`, так как перемещение происходит автоматически. Более того, использование `std::move` может не дать компилятору использовать RVO(Return Value Optimization), что может даже привести к более медленному коду.

Пример перемещения различных объектов в функций

```
#include <iostream>
#include <string>
#include <vector>
using std::cout, std::endl;
void func(int x)
{
    cout << "int inside func: " << x << endl;
}

void func(std::string x)
{
    cout << "string inside func: " << x << endl;
}

void printVector(const std::vector<int>& v)
{
    cout << "( ";
    for (auto el : v)
        cout << el << " ";
    cout << ")" << endl;
}

void func(std::vector<int> x)
{
    cout << "vector inside func: ";
    printVector(x);
}

int main()
{
    int a = 123;
    func(std::move(a));
    cout << "int after move: " << a << endl << endl;

    std::string b{"Cat"};
    func(std::move(b));
    cout << "string after move: " << b << endl << endl;

    std::vector<int> c{10, 20, 30};
    func(std::move(c));
    cout << "vector after move: ";
    printVector(c);
}
```

Данная программа напечатает:

```
int inside func: 123
int after move: 123

string inside func: Cat
string after move:

vector inside func: ( 10 20 30 )
vector after move: ( )
```

rvalue-ссылки

Инициализация rvalue-ссылок

Если функция принимает аргумент по значению, то при передаче в неё lvalue передаваемый объект копируется, а при передаче rvalue объект перемещается. Если же функция принимает аргумент по ссылке, то никакого копирования и перемещения не происходит, а в функции просто создаётся ссылка, на передаваемый объект.

Для того, чтобы можно было принимать временные объекты по ссылке и различать категорию принимаемого выражения при передаче по ссылке в язык были введены rvalue-ссылки. Тип rvalue-ссылки состоит из названия типа с двумя амперсандами на конце:

```
int& l;   -  это lvalue - ссылка на int
int&& r;  -  это rvalue - ссылка на int
```

rvalue-ссылки очень похожи на обычные ссылки (также известные как lvalue-ссылки). Одно из двух отличий rvalue-ссылок от lvalue-ссылок заключается в том, что первые инициализируются только `rvalue`-выражениями.

```
int a = 50;
int& l1 = a;        // OK, lvalue - ссылка инициализируется lvalue - выражением
int& l2 = a + 1;    // Error, lvalue - ссылка не может инициализироваться rvalue - выражением

int&& r1 = a;       // Error, rvalue - ссылка не может инициализироваться lvalue - выражением
int&& r2 = a + 1;   // OK, rvalue - ссылка инициализируется rvalue - выражением
int&& r3 = r2;      // Error, r2 - это lvalue выражение

r2 += 5;            // С rvalue - ссылками можно работать также, как и с обычными ссылками
cout << r2 << endl; // Напечатает 56
```

Перегрузка по категории выражения

С помощью `rvalue` ссылок и перегрузки можно различить категорию выражения, приходящую на вход функции. В примере вызовется соответствующий вариант перегрузки в зависимости от категории выражения.

```
#include <iostream>
#include <string>
void func(std::string& s)
{
    std::cout << "lvalue" << std::endl;
}

void func(std::string&& s)
{
    std::cout << "rvalue" << std::endl;
}

int main()
{
    std::string a = "Cat";
    std::string b = "Dog";
    func(a);                // Передадим по lvalue ссылке
    func(a + b);            // Передадим по rvalue ссылке
    func(std::move(a));     // Передадим по rvalue ссылке
    std::cout << "a = " << a << std::endl;  // Напечатает Cat, перемещения не было
    std::cout << "b = " << b << std::endl;  // Напечатает Dog
}
```

Обратите внимание, что в этом примере никакого копирования и перемещения происходить не будет вообще, так как обе функции принимают аргументы по ссылке.

Константные lvalue-ссылки и rvalue-выражения

Константные lvalue-ссылки обладают неочевидным свойством – они могут инициализироваться как lvalue так и rvalue выражениями. То есть можно написать так:

```
int a = 50;
const int& cl = a + 1;  // OK, может инициализироваться rvalue
```

Все возможные варианты инициализации ссылок представлены в следующем примере:

```
int a = 50;
const int b = 500;

int& l1 = a;            // OK
int& l2 = b;            // Error, так как b - это константа
int& l3 = a + 1;        // Error, так как a + 1 - это rvalue

const int& c1 = a;      // OK
const int& c2 = b;      // OK
const int& c3 = a + 1;  // OK

int&& r1 = a;           // Error, так как a - это lvalue
int&& r2 = b;           // Error, так как b - это константа и lvalue
int&& r3 = a + 1;       // OK
```

В языке также существуют константные rvalue-ссылки, но они используются редко.

Перегрузка между rvalue-ссылкой и константной lvalue-ссылкой

Удобно делать перегрузку между rvalue-ссылкой и константной lvalue-ссылкой. В этом случае, если мы передадим rvalue, подойдут обе функции, но по правилам перегрузки выберется перегрузка с rvalue-ссылкой. Удобство такой перегрузки заключается в том, что lvalue-выражения будут приниматься по константной ссылке (что хорошо, так как мы обычно не хотим менять существующий объект), в rvalue-выражения будут приниматься по неконстантной ссылке (что тоже хорошо, так как часто нужно изменить такой объект).

```
#include <iostream>
#include <string>

void func(const std::string& s)
{
    std::cout << "const lvalue ref" << std::endl;
}

void func(std::string&& s)
{
    std::cout << "rvalue ref" << std::endl;
}

int main()
{
    std::string a = "Cat";
    std::string b = "Dog";

    func(a);                // Подходит только const lvalue ref
    func(a + b);            // Подходят обе функции, но выберется rvalue ref
    func(std::move(a));     // Подходят обе функции, но выберется rvalue ref
}
```

Возврат rvalue-ссылок из функций

Второе и последнее отличие rvalue-ссылок от обычных lvalue-ссылок проявляется при возврате ссылок из функции или при приведении к типу ссылки.

- При возврате из функции lvalue-ссылки — выражение вызова функции будет lvalue-выражением.
- При возврате из функции rvalue-ссылки — выражение вызова функции будет rvalue-выражением.

Это различие виндно на следующем примере:

```
#include <iostream>
#include <string>

void printCategory(int& x)  {std::cout << "lvalue" << std::endl;}
void printCategory(int&& x) {std::cout << "rvalue" << std::endl;}

int a = 123;

int funcValue() {return a;}
int& funcLRef() {return a;}
int&& funcRRef(){return std::move(a);}

int main()
{
    printCategory(funcValue());  // Напечатает rvalue
    printCategory(funcLRef());   // Напечатает lvalue
    printCategory(funcRRef());   // Напечатает rvalue
}
```

Приведение к lvalue/rvalue ссылкам

Аналогичные правила приведению к типу ссылки:

```
#include <iostream>
#include <string>

void printCategory(int& x)  {std::cout << "lvalue" << std::endl;}
void printCategory(int&& x) {std::cout << "rvalue" << std::endl;}

int main()
{
    int a = 123;
    printCategory(static_cast<int&>(a));    // Напечатает lvalue
    printCategory(static_cast<int&&>(a));   // Напечатает rvalue

    int& l = a;
    printCategory(static_cast<int&&>(l));   // Напечатает rvalue
}
```

Используя это свойство можно написать простейшую реализацию функции `move`:

```
template <typename T>
T&& mymove(T& x)
{
    return static_cast<T&&>(x);
}
```

Эта реализация не совсем правильная, так как она не может принимать на вход `rvalue`, но она всё-равно может дать понимание как работает функция `std::move`.

Конструктор перемещения и оператор присваивания перемещения

Конструктор перемещения — это конструктор, который принимает rvalue-ссылку на объект того же типа. В этом конструкторе прописывается, что будет происходить с объектом при перемещении. Если конструктор перемещения не реализован, то для перемещения по правилам перегрузки используется конструктор копирования.

Конструктор перемещения для строки `String(String&& s)`

Реализуем простой класс строки с конструкторами копирования и перемещения:

```
#include <cstring>
#include <iostream>
class String
{
private:
    char* data;
    size_t size;
    size_t capacity;
public:
    String(const char* str)
    {
        std::cout << "Constructor from C string\n";
        size = std::strlen(str);
        capacity = size;
        data = new char[capacity + 1];
        std::memcpy(data, str, size);
        data[size] = '\0';
    }

    String(const String& s)
    {
        std::cout << "Copy Constructor\n";
        size = s.size;
        capacity = s.capacity;
        data = new char[capacity + 1];
        std::memcpy(data, s.data, size);
        data[size] = '\0';
    }

    String(String&& s) : data(s.data), size(s.size), capacity(s.capacity)
    {
        std::cout << "Move Constructor\n";
        s.data = nullptr;
        s.size = 0;
        s.capacity = 0;
    }
    ~String() {if (data) delete [] data;}
    friend std::ostream& operator<<(std::ostream& out, const String& s);
};

std::ostream& operator<<(std::ostream& out, const String& s)
{
    if (s.data) out << s.data;
    return out;
}
```

```
int main()
{
    String a = "Cat";
    String b = a;               // Наша строка копируется, используя String(const String& s)
    String c = std::move(a);    // Наша строка перемещается, используя String(String&& s)

    std::cout << "a: " << a << std::endl; // Напечатает пустую строку, так как a был занулён
    std::cout << "b: " << b << std::endl; // Напечатает Cat
    std::cout << "c: " << c << std::endl; // Напечатает Cat
}
```

Оператор присваивания перемещения для строки `String& operator=(String&& s)`

Оператор присваивания перемещения — это перегруженный оператор присваивания, который принимает rvalue-ссылку на объект того же типа. В этом перегруженном операторе прописывается, что будет происходить с объектом при операции перемещающего присваивания. Если оператор присваивания перемещения не реализован, то для перемещающего присваивания по правилам перегрузки используется оператор присваивания копирования.

```
// Оператор присваивания копирования
String& operator=(const String& s)
{
    std::cout << "Copy Assignment\n";
    if (this == &s)
        return *this;

    size = s.size;
    capacity = s.capacity;

    delete [] data;
    data = new char[capacity + 1];
    std::memcpy(data, s.data, size + 1);

    return *this;
}

// Оператор присваивания перемещения
String& operator=(String&& s)
{
    std::cout << "Move Assignment\n";
    if (this == &s)
        return *this;

    delete [] data;
    data = s.data;
    size = s.size;
    capacity = s.capacity;

    s.data = nullptr;
    s.size = 0;
    s.capacity = 0;
    return *this;
}
```

```
int main()
{
    String x = "Elephant";
    String y = "Dog";
    y = std::move(x);
    std::cout << "x: " << x << std::endl;  // Напечатает пустую строку
    std::cout << "y: " << y << std::endl;  // Напечатает Elephant
}
```

Особые методы класса

Как уже было пройдено раннее, особые методы класса – это методы класса, которые компилятор может сгенерировать автоматически. Всего существует шесть особых методов:

1. Конструктор по умолчанию

   ```
   Object()
   ```

2. Деструктор

   ```
   ~Object()
   ```

3. Конструктор копирования

   ```
   Object(const Object& other)
   ```

4. Оператор присваивания копирования

   ```
   Object& operator=(const Object& other)
   ```

5. Конструктор перемещения

   ```
   Object(Object&& other)
   ```

6. Оператор присваивания перемещения

   ```
   Object& operator=(Object&& other)
   ```

Таким образом компилятор может автоматически сгенерировать конструктор перемещения или оператор присваивания перемещения при некоторых условиях:

- **Автоматическая генерация конструктора перемещения**
  Компилятор автоматически генерирует конструктор перемещения при условии того, что у класса нет ни одного из следующих объявленных программистом методов:
  - Конструкторов копирования и перемещения
  - Операторов присваивания копирования и перемещения
  - Деструктора

  Сгенерированный конструктор перемещения будет просто перемещать все поля класса.

- **Автоматическая генерация оператора присваивания перемещения**
  Компилятор автоматически генерирует оператора присваивания перемещения при тех же условиях. Сгенерированный оператора присваивания перемещения будет просто применять операцию перемещающего присваивания к каждому полю класса.

Правило пяти

Правило пяти — это эмпирическое правило, которое гласит: *Если вы определяете любой из пяти следующих особых методов класса, связанных с управлением ресурсами, то скорее всего нужно определить все пять.*

1. Деструктор
2. Конструктор копирования
3. Оператор присваивания копирования
4. Конструктор перемещения
5. Оператор присваивания перемещения

Перегрузка по квалификаторам ссылок

Перегружать методы класса не только по параметрам, но и по тому, какой объект вызывает метод. То есть вызывается ли метод от lvalue выражения или от rvalue выражения.

```
#include <iostream>
struct Cat
{
    void print() &
    {
        std::cout << "lvalue\n";
    }

    void print() &&
    {
        std::cout << "rvalue\n";
    }
};

int main()
{
    Cat a;
    a.print();            // lvalue, вызовется версия с &
    Cat().print();        // rvalue, вызовется версия с &&
    std::move(a).print(); // rvalue, вызовется версия с &&
}
```