Оглавление

Move-семантика и базовая многопоточность

5.1. Move-семантика

5.1.1. Перемещение временных объектов.

Рассмотрим задачу. Пусть есть функция, которая возвращает тяжёлую строку:

```
string MakeString() {
  return string(100000000, 'a');
}
```

Пусть необходимо добавить эту строчку в некоторый вектор строк.

```
int main() {
  vector<string> strings;
  string heavy_string = MakeString();
  strings.push_back(heavy_string);

  return 0;
}
```

Мы хотим положить результат вызова функции `MakeString()` в вектор. Это можно сделать, не используя переменную `heavy_string`.

```
int main() {
  vector<string> strings;
  strings.push_back(MakeString());

  return 0;
}
```

Замерим время работы каждой реализации, используя макрос `LOG_DURATION`.

```
// with variable: 299 ms
// without variable: 168 ms
```

Второй вариант работает быстрее, потому что временный объект – результат вызова функции – не сохраняется в переменную.

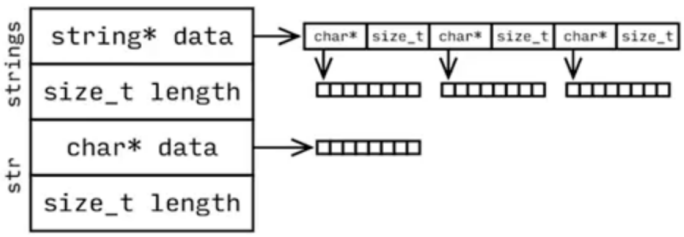
Исследуем скорость работы алгоритмов, в которых в вектор добавляется временный объект, созданный с помощью конструктора строки.

```
vector<string> strings;
string heavy_string = string(100000000, 'a');
strings.push_back(heavy_string);

vector<string> strings;
strings.push_back(string(100000000, 'a'));

// ctor: with variable: 201 ms
// ctor: without variable: 122 ms
```

Без использования промежуточной переменной код работает быстрее. Во втором варианте в `push_back` передаётся временный объект, он забирает данные этого объекта, не копируя. Подробнее разберёмся, как это работает.

Рассмотрим процесс добавления в вектор переменной. Вспомним, как хранятся данные вектора и строки в памяти.

```
vector<string> strings(3);
string str(100'000'000, 'a');
strings.push_back(str);
```

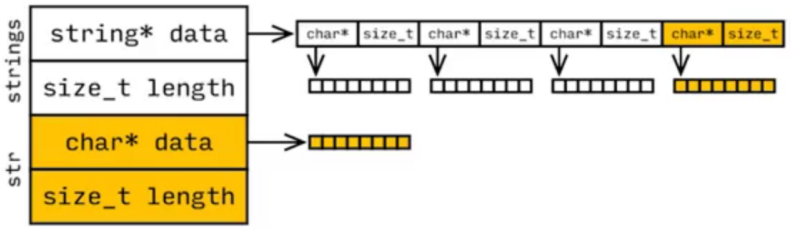


Локальная переменная `strings`, которая является вектором, и локальная переменная `str` со строкой хранятся на стеке. Вектор представляется указателем на свои данные в куче и длиной.

Кроме того, есть локальная переменная со строкой, которая представляет собой указатель на данные в куче и длину. У вектора в куче хранятся строки подряд, где каждая строка – указатель на свои данные и длина.

`push_back`, вызванный от локальной переменной, должен скопировать данные этой строки.

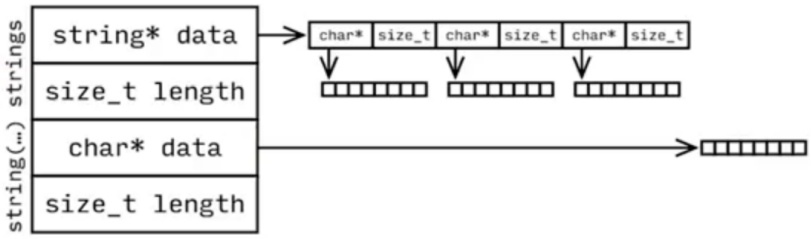
```
vector<string> strings(3);
string str(100'000'000, 'a');
strings.push_back(str);
```



Выделяем память под восемь символов, в вектор кладём указатель на них.

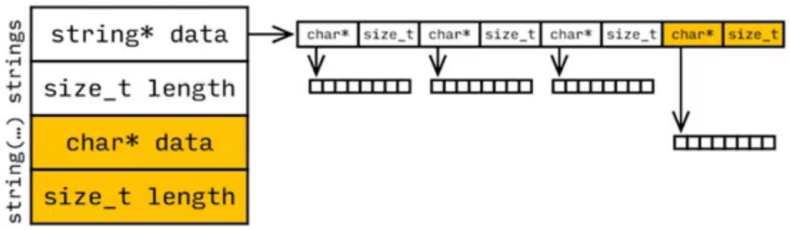
Если мы хотим добавить в вектор временный объект, то его данные в куче, на которые он ссылается, никому не будут нужны. Если их никто не заберёт, то они просто уничтожатся, потому что объект временный.

```
vector<string> strings(3);
strings.push_back(string(100'000'000, 'a'));
```



`push_back` имеет право эти данные не копировать, а просто свой указатель, который добавится в данные вектора, направить на эти данные, а у той самой локальной временной строки эти данные отобрать.

```
vector<string> strings(3);
strings.push_back(string(100'000'000, 'a'));
```



5.1.2. Перемещение в других ситуациях

Разберём ещё один класс ситуаций, когда у нас не происходит копирование данных временного объекта. В языке C++ везде, где может происходить копирование, имеет место и перемещение. Вспомним, где может происходить копирование объектов. Самый простой случай – это присваивание.

```
string target_string = "old_value";
string source_string = MakeString();
target_string = source_string;
```

В таком варианте здесь будет происходить копирование. Здесь тоже можно убрать промежуточную переменную `source_string` и сэкономить ресурсы на копировании.

```
string target_string = "old_value";
target_string = MakeString();
```

Замерим время работы программы с присваиванием в промежуточную переменную и без промежуточной переменной.

```
// assignment, with variable: 243 ms
// assignment, without variable: 119 ms
```

При использовании метода `set::insert` тоже можно обойтись без промежуточной переменной.

```
// set::insert, with variable
set<string> strings;
string heavy_string = MakeString();
strings.insert(heavy_string);
```

```
// set::insert, without variable
set<string> strings;
strings.insert(MakeString());

// set::insert, with variable: 217 ms
// set::insert, without variable: 100 ms
```

Теперь рассмотрим пример со словарём. Промежуточную переменную создаём и для ключа, и для значения.

```
map<string, string> strings;
string key = MakeString();
string value = MakeString();
strings[key] = value;
// map::operator[], with variables: 474 ms
```

Избавимся от промежуточной переменной для значения.

```
map<string, string> strings;
string key = MakeString();
strings[key] = MakeString();
// map::operator[], with variable for key: 305 ms
```

Теперь избавимся и от промежуточной переменной для ключа.

```
map<string, string> strings;
strings[MakeString()] = MakeString();
// map::operator[], without variables: 210 ms
```

Напишем функцию `MakeVector()`, создающую вектор, и попробуем этот вектор куда-нибудь положить.

```
vector<int> MakeVector() {
  return vector<int>(100000000, 0);
}
```

Попробуем положить такой вектор во множество.

```
// set::insert for vector, with variable
set<vector<int>> vectors;
vector<int> heavy_vector = MakeVector();
vectors.insert(heavy_vector);
```

```
// set::insert for vector, without variable
set<vector<int>> vectors;
vectors.insert(MakeVector());

// set::insert for vector, with variable: 1062 ms
// set::insert for vector, without variable: 386 ms
```

Если у вас есть некоторый временный объект, старайтесь не потерять это важное свойство – временность. Так компилятор сэкономит на копировании.

5.1.3. Функция `move`

Есть ситуации, когда есть невременный объект, но про него известно, что там, где он создан, он больше не понадобится.

Есть задача – считать набор строк из потока ввода и эти строки положить в вектор. Это делает функция `ReadStrings()`.

```
vector<string> ReadStrings(istream& stream) {
  vector<string> strings;
  string s;
  while (stream >> s) {
    strings.push_back(s);
  }
  return strings;
}
```

После того как мы кладем строчку `s` в вектор, она нам больше не понадобится. Хочется, чтобы метод `push_back` вел бы себя в этом случае как с временным объектом. Мы хотим изменить семантику объекта.

Есть функция `move`, которая может изменить семантику даже постоянного объекта. Чтобы использовать функцию `move`, нужно подключить модуль `utility`. Цикл теперь выглядит так:

```
while (stream >> s) {
  strings.push_back(move(s));
}
```

Проверим работу функции:

```
int main() {
  for (const string& s : ReadStrings(cin)) {
    cout << s << "\n";
  }
  return 0;
}
// ввод: Red belt C++
// вывод:
// Red
// belt
// C++
```

Разницу между реализациями с `move` и без можно определить не только по времени работы кода, но и по содержанию переменной `s`. Посмотрим, что лежит в переменной `s` до `push_back`'а и после него. Также посмотрим, что лежит в конце вектора.

```
while (stream >> s) {
  cout << "s = " << s << "\n";
  strings.push_back(s);
  cout << "s = " << s <<
      ", strings.back() = " << strings.back() << "\n";
}
// ввод: a b c
// вывод:
// s = a
// s = a, strings.back() = a
// s = b
```

Буква `a` скопировалась. Если добавить вызов `move` в метод `push_back`:

```
// ввод: a b c
// вывод:
// s = a
// s = , strings.back() = a
// s = b
```

Метод `push_back` забрал данные из строки `s`.

Покажем, что код ускоряется. Для этого напишем функцию, которая умеет как перемещать, так и не перемещать.

```
vector<string> ReadStrings(istream& stream, bool use_move) {
  vector<string> strings;
  string s;
  while (stream >> s) {
    if (use_move) {
      strings.push_back(move(s));
    } else {
      strings.push_back(s);
    }
  }
  return strings;
}
```

Воспользуемся функцией `GenerateText()`. Она генерирует текст из миллиарда символов и разбивает его пробелами через каждые десять миллионов символов.

```
int main() {
  const string text = GenerateText();
  { LOG_DURATION("without move");
    istringstream stream(text);
    ReadStrings(stream, false);
  }
  { LOG_DURATION("with move");
    istringstream stream(text);
    ReadStrings(stream, true);
  }
}
// without move: 26359 ms
// with move: 17586 ms
```

Получили существенное ускорение за счет избавления от лишнего копирования.

Этим примером область применения функции `move` не ограничивается. Бывают ситуации, когда результат вызова функции разбиения строки на слова должен жить дольше чем исходная строка. Рассмотрим следующую реализацию функции `SplitIntoWords`:

```
vector<string> SplitIntoWords(const string& text) {
  vector<string> words;
  string current_word;
  for (const char c : text) {
    if (c == ' ') {
```

```
      words.push_back(current_word);  // вызываем push_back от переменной, которая нам
      // дальше не нужна
      // логично будет обернуть её в move
      current_word.clear();
    } else {
      current_word.push_back(c);
    }
  }
  words.push_back(current_word);
  return words;
}
```

5.1.4. Когда перемещение не помогает

Если у объекта нет данных в куче, а основные данные на стеке, то данные придётся копировать. Массив хранит свои данные на стеке. Продемонстрируем на его примере, что перемещение не помогает ускорить работу с ним.

```
const int SIZE = 10000;

array<int, SIZE> MakeArray() {
  array<int, SIZE> a;
  a.fill(8);
  return a;
}
```

Создадим вектор массивов и положим массив в вектор десять тысяч раз с использованием промежуточной переменной и без использования промежуточной переменной.

```
int main() {
  { LOG_DURATION("with variable");
    vector<array<int, SIZE>> arrays;
    for (int i = 0; i < 10000; ++i) {
      auto heavy_array = MakeArray():
      arrays.push_back(heavy_array);
    }
  }
  { LOG_DURATION("without variable");
    vector<array<int, SIZE>> arrays;
```

```
    for (int i = 0; i < 10000; ++i) {
      arrays.push_back(MakeArray());
    }
  }

  return 0;
}
// with variable: 1191 ms
// without variable: 1148 ms
```

Ускорения не произошло. Рассмотрим другой пример.

```
string MakeString() {
  return "C++";
}

int main() {
  vector<string> strings;
  string s = MakeString();
  cout << s << "\n";
  strings.push_back(s);
  cout << s << "\n";

  return 0;
}
// C++
// C++
```

Теперь сделаем переменную `s` константной:

```
const string s = MakeString();

// C++
// C++
```

Обернём строчку `s` в `move`:

```
strings.push_back(move(s));

// C++
// C++
```

Перемещения строки не произошло. Строка константная, перемещение из неё не сработает.

Вызов `move` для константного объекта бесполезен. Следите за константностью перемещаемого объекта.

5.1.5. Конструктор копирования и оператор присваивания

Обсудим, что происходит в следующих ситуациях:

```
vector<int> source = /* ... */;
vector<int> target = source;

vector<int> source2 = /* ... */;
target = source2;
```

Зачем это необходимо:

- Научиться перемещать собственные классы;
- Разговаривать с разработчиками на одном языке;
- Читать документацию и понимать, где может происходить перемещение;
- Развить интуицию относительно `move`-семантики.

В следующих случаях вызывается конструктор копирования (copy constructor):

```
vector<int> source = /* ... */;
vector<int> target = source;
vector<int> target2(source);
```

В следующих случаях вызывается оператор копирующего присваивания (copy assignment operator):

```
vector<int> source = /* ... */;
vector<int> target = /* ... */;
target = source;
target.operator=(source);
```

Познакомимся поближе с этими методами на примере класса `Logger`, который будет логировать вызовы этих методов.

```
class Logger {
public:
  Logger() { cout << "Default ctor\n"; }  // конструктор по умолчанию
  Logger(const Logger&) { cout << "Copy ctor"; }  // конструктор копирования
  void operator=(const Logger&) { cout << "Copy assignment\n"; }  // оператор
  // присваивания
};

int main() {
  Logger source;  // вызывается конструктор по умолчанию
  Logger target = source;  // вызывается конструктор копирования

  return 0;
}
// Default ctor
// Copy ctor

vector<Logger> loggers;
loggers.push_back(target);
// Copy ctor

source = target;  // вызывается оператор присваивания
// Copy assignment
```

Для собственных типов при необходимости компилятор сам генерирует конструктор копирования и оператор присваивания, которые просто копируют все поля.

Для типов, которые самостоятельно управляют памятью, нужно самостоятельно реализовывать копирование и присваивание.

Напишем конструктор копирования для класса `SimpleVector`.

Добавим конструктор от константной ссылки на `SimpleVector`.

```
SimpleVector(const SimpleVector& other);
```

Реализуем этот конструктор:

```
template <typename T>
```

```
SimpleVector<T>::SimpleVector(const SimpleVector<T>& other)
  : data(new T[other.capacity]),
    size(other.size),
    capacity(other.capacity)
{
  copy(other.begin(). other.end(), begin());
}
```

5.1.6. Конструктор перемещения и перемещающий оператор присваивания

В следующих случаях вызывается конструктор перемещения (move constructor):

```
vector<int> source = /* ... */;
vector<int> target = move(source);
vector<int> target2(move(target));

vector<vector<int>> vectors;
vectors.push_back(vector<int>(5));
```

В следующем случае инициализация временным объектом оптимизируется без вызова конструктора перемещения. Этот случай особый, его обсудим позже.

```
vector<int> MakeVector();

vector<int> target = MakeVector();
```

В следующих случаях вызывается оператор перемещающего присваивания (move assignment operator):

```
vector<int> source = /* ... */;
vector<int> target = /* ... */;
target = move(source);
target = vector<int>(5);
```

Если у вас есть собственный класс с конструктором копирования, но без конструктора перемещения, то компилятор делает перемещение эквивалентным копированию. Рассмотрим пример с классом `SimpleVector`. Скажем компилятору самостоятельно сгенерировать конструктор перемещения.

```
// rvalue reference
SimpleVector(const SimpleVector&& other) = default;
```

`rvalue reference` ведёт себя как обыкновенная ссылка, но позволяет принимать временные объекты.

```
int main() {
  SimpleVector<int> source(1);
  SimpleVector<int> target = move(source);
  cout << source.Size() << " " << target.Size() << endl;
  return 0;
}
// 1 1
```

Такой код падает в конце, на деструкторах. Придётся самостоятельно реализовывать конструктор перемещения.

```
template <typename T>
SimpleVector<T>::SimpleVector(SimpleVector<T>&& other)
  : data(other.data),
    size(other.size),
    capacity(other.capacity)
{
  other.data = nullptr;
  other.size = other.capacity = 0;
}

// 0 1
```

Теперь у объекта, из которого мы перемещали, размер 0, а у объекта, в который мы перемещали – размер 1.

Реализуем оператор перемещающего присваивания.

```
void operator=(SimpleVector&& other);
```

Он будет реализован примерно как конструктор перемещения.

```cpp
template <typename T>
void SimpleVector<T>::operator=(SimpleVector<T>&& other) {
  delete[] data;
  data = other.data;
  size = other.size;
  capacity = other.capacity;

  other.data = nullptr;
  other.size = other.capacity = 0;
}
```

Проверим конструктор перемещения.

```cpp
int main() {
  SimpleVector<int> source(1);
  SimpleVector<int> target(1);
  target = move(source);
  cout << source.Size() << " " << target.Size() << endl;
  return 0;
}
// 0 1
```

Перегрузка по `rvalue`-ссылке – способ отличить временный объект от постоянного.

```cpp
target = source;
// ↑ вызывается operator=(const vector<int>&
target = vector<int>(5);
// ↑ вызывается operator=(vector<int>&&)
target = move(source);
// ↑ вызывается operator=(vector<int>&&)
```

При необходимости компилятор сам генерирует конструктор перемещения и оператор перемещающего присваивания, которые просто перемещают все поля. Если класс не управляет памятью самостоятельно, то перемещение для него будет просто работать.

5.1.7. Передача параметра по значению

Оптимизируем методы `ChangeFirstName` и `ChangeLastName` из класса `Person`, который реализовывался в задаче «Имена и фамилии-4»

```
void ChangeFirstName(int year, const string& first_name) {
  first_names[year] = first_name;
}
void ChangeLastName(int year, const string& last_name) {
  last_names[year] = last_name;
}
```

Необходимо принимать строки по значению, а не по ссылке. Внутри функции будем перемещать строку внутрь словаря.

```
void ChangeFirstName(int year, string first_name) {
  first_names[year] = move(first_name);
}
void ChangeLastName(int year, string last_name) {
  last_names[year] = move(last_name);
}
```

Возможны два случая. Если мы вызываем `ChangeFirstName` от временного объекта, то он проинициализирует переменную `first_name`, поскольку объект временный, то для него вызовется конструктор перемещения. Затем мы снова вызовем перемещение, переместим `first_name` внутрь контейнера. Будет два перемещения.

Если мы вызываем этот метод не от временного объекта, тогда этот объект скопируется в аргумент функции, затем случится перемещение этого объекта внутрь контейнера.

Итого, приняв параметр функции по значению, мы можем сделать его универсальным, вызывать как от временных объектов, так и от постоянных.

5.1.8. `Move`-итераторы

Рассмотрим конструкцию, позволяющую сделать использование `move`-семантики более простым.

Рассмотрим задачу `SplitIntoSentences`, в которой нужно было написать функцию, принимающую набор токенов, разбивающую их на предложения. Рассмотрим саму функцию `SplitIntoSentences`:

```
template <typename Token>
vector<Sentence<Token>> SplitIntoSentences(
    vector<Token>> tokens) {
  vector<Sentence<Token>> sentences;
  auto tokens_begin = begin(tokens);
  while (tokens_begin != tokens_end) {
    const auto sentence_end =
        FindSentenceEnd(tokens_begin, tokens_end);
    Sentence<Token> sentence;
    for (; tokens_begin != sentence_end; ++tokens_begin) {
      sentence.push_back(move(*tokens_begin));
    }
    sentences.push_back(move(sentence));
  }
  return sentences;
}
```

В ней мы заводим итератор `tokens_begin` и идём этим итератором по токенам, находим конец очередного предложения. Берем текущий токен, идем итератором от текущего токена до конца предложения, все эти токены вставляем в текущее предложение. Затем это предложение вставляем в вектор предложений.

Рассмотрим работу цикла `for`. Он перебирает токены в их диапазоне, каждый из них вставляет в вектор.

Подключим модуль `iterator`. После этого станет доступна специальная функция, которую мы вызовем от итераторов. Она называется `make_move_iterator`. Такая функция возвращает обёртку над итератором, которая, если мы хотим скопировать объект, перемещает его. Функция `make_move_iterator` меняет семантику итератора, чтобы при обращении к нему данные перемещались бы, а не копировались.

Используя `make_move_iterator`, можем заменить этот кусок...

```
Sentence<Token> sentence;
for (; tokens_begin != sentence_end; ++tokens_begin) {
  sentence.push_back(move(*tokens_begin));
}
sentences.push_back(move(sentence));
```

...на такой:

```
sentences.push_back(Sentence<Token>(
    make_move_iterator(tokens_begin),
    make_move_iterator(sentence_end)
));
```

Осталось в конце менять итератор `tokens_begin`:

```
tokens_begin = sentence_end;
```

Рассмотрим задачу «Считалка Иосифа». Рассмотрим следующий цикл:

```
for (uint32_t i = 0; i < range_size; ++i, ++range_begin) {
  *range_begin = move(permutation[i]);
}
```

Без цикла это можно записать так:

```
copy(
  make_move_iterator(begin(permutation)), make_move_iterator(end(permutation)),
      range_begin);
);
```

Алгоритм `move` будет перемещать данные, а не копировать. Это избавит от необходимости вызывать `make_move_iterator`.

```
move(begin(permutation), end(permutation), range_begin);
```

5.1.9. Некопируемые типы

Продемонстрируем, как можно сделать тип, который не будет уметь копировать на примере `Logger`'а. Нужно написать `delete` вместо тела конструктора копирования:

```
Logger(const Logger&) = delete;
```

В языке есть такие типы, которые копировать бессмысленно, например, потоки ввода и вывода. Посмотрим, как с ними обращаться на примере вектора потоков.

```
vector<ofstream> streams;
streams.reserve(5);
```

```
for (int i = 0; i < 5; ++i) {
  ofstream stream(to_string(i) + ".txt");
  stream << "File #" << i << "\n";
  streams.push_back(move(stream));
}
for (auto& stream : streams) {
  stream << "Vector is ready!" << endl;
}
```

Откроем, например, файл «0.txt». Там написано:

```
// File #0
// Vector is ready!
```

Получилось работать с файловыми потоками, несмотря на то, что это некопируемые объекты.

5.1.10. NRVO и copy elision

Можно оптимизировать копирование объектов, у которых данные только на стеке. Продемонстрируем это на примере `Logger`'а. Пусть у нас есть функция `MakeLogger()`:

```
Logger MakeLogger() {
  return Logger();  // temporary -> returned temporary
}
```

Временным объектом `Logger()` мы инициализируем тот промежуточный объект, который должен вернуться из функции. В функции `main` мы из временного объекта, который вернулся из функции, инициализируем переменную:

```
int main() {
  Logger logger = MakeLogger();  // temporary -> variable

  return 0;
}
// Default ctor
```

Поскольку в обоих случаях новый объект инициализируется временным объектом, происходит перемещение.

В результате работы кода вызывался только конструктор по умолчанию, конструкторы копирования и перемещения не вызвались. Дело в том, что в некоторых случаях компилятор умеет оптимизировать перемещение. Например:

- при возвращении из функции временного объекта;
- при инициализации нового объекта временным объектом.

Такая оптимизация называется copy elision.

При возвращении локальной переменной из функции перемещение и копирование опускаются. Такая оптимизация называется named return value optimization.

5.1.11. Опасности `return`

Рассмотрим два случая, когда `return` оптимизируется не так хорошо, как в случаях из предыдущего пункта.

```
pair<ifstream, ofstream> MakeStreams(const string& prefix) {
  ifstream input(prefix + ".in");
  ofstream output(prefix + ".out");
  return {input, output};
}
```

Код не компилируется, компилятор не может составить пару потоков. `input` и `output` передаются в конструктор пары, затем созданная с помощью этого конструктора пара должна проинициализировать возвращаемый временный объект. Поскольку эта пара тоже временная, то инициализация временного объекта, возвращаемого из функции этой парой, происходит безболезненно, но передача переменных `input` и `output` в конструктор пары происходит по обычным правилам языка C++. Чтобы решить проблему, следует обернуть `input` и `output` в `move`.

Если функция должна вернуть некоторый объект, например поток ввода:

```
ifstream MakeInputStream(const string& prefix) {

}
```

Внутри функции получили пару объектов, вернуть ходим только один её элемент.

```
ifstream MakeInputStream(const string& prefix) {
  auto streams = MakeStreams(prefix);
  return streams.first;
}
```

`streams.first` не является временным объектом. Также это выражение не является названием локальной переменной – это поле локальной переменной.

Проблема решается, если обернуть `streams` в `move`.

5.2. Базовая многопоточность

5.2.1. `async` и `future`

Напишем функцию, которая будет суммировать элементы двух векторов. В однопоточной синхронной версии наша функция будет выглядеть так:

```
int SumToVectors(const vector<int>& one,
    const vector<int>& two) {
  return accumulate (begin(one), end(one), 0)
      + accumulate(begin(two), end(two), 0);
}
```

В начале мы находим сумму элементов одного ветора, потом сумму элементов другого вектора. Мы могли бы один вектор суммировать асинхронно, другой вектор суммировать одновременно с первым, потом сложить результаты. Понадобится заголовочный файл `future`:

```
#include <future>
```

Вызываем функцию `async`, она запускает асинхронную операцию. В данном случае возвращается результат суммирования вектора `one`.

```
future<int> f = async([] {
  return accumulate(begin(one), end(one), 0);
});
```

Далее в переменную `result` присваиваем сумму элементов второго вектора.

```
int result = accumulate(begin(two), end(two), 0);
```

Далее возвращаем `result` плюс то, что возвращает `async`. `async` возвращает `future`.

```
return result + f.get();
```

Такой код не компилируется, потому что не захвачена переменная `one`.

```
future<int> f = async([&one] {
  return accumulate(begin(one), end(one), 0);
});
```

Когда мы пишем `one` в квадратных скобках лямбды, то происходит копирование внутрь лямбда-функции. Чтобы он не копировался, его следует передавать по ссылке.

5.2.2. Задача генерации и суммирования матрицы

У нас есть матрица:

```
vector<vector<int>> matrix;
```

Она генерируется с помощью функции `GenerateSingleThread`:

```
vector<vector<int>> GenerateSingleThread(size_t size) {
  vector<vector<int>> result(size);
  GenerateSingleThread(result, 0, size);
  return result;
}
```

Функция вызывает другую функцию `GenerateSingleThread`, которая является шаблоном.

```
template <typename ContainerOfVectors>
void GenerateSingleThread(
    ContainerOfVectors& result;
    size_t first_row,
    size_t column_size
) {
  for (auto& row : result) {
    row.reserve(column_size);
```

```
    for (size_t column = 0; column < column_size; ++column) {
      row.push_back(first_row ^ column);
    }
    ++first_row;
  }
}
```

Далее матрица обрабатывается с помощью функции `SumSingleThread`.

Запустим программу:

```
int main() {
  LOG_DURATION("Total");
  const size_t matrix_size = 7000;

  vector<vector<int>> matrix;
  {
    LOG_DURATION("Single thread generation");
    matrix = GenerateSingleThread(matrix_size);
  }
  {
    LOG_DURATION("Single thread sum");
    cout << SumSingleThread(matrix) << endl;
  }

}
// Single thread generation: 1254 ms
// Single thread sum: 375 ms
// 195928050144
// Total: 1651 ms
```

Мы хотим ускорить программу. Попробуем генерировать матрицу многопоточно. Напишем функцию `GenerateMultiThread`. Она будет принимать `page_size` `0` – желаемый размер страницы, который будет передаваться потоку.

```
vector<vector<int>> GenerateMultiThread(
    size_t size, size_t page_size
) {
  vector<vector<int>> result(size);
  return result;
}
```

Мы хотим разбивать вектор `result` на несколько частей. Здесь подходит шаблон `Paginator`.

```
vector<vector<int>> GenerateMultiThread(
    size_t size, size_t page_size
) {
  vector<vector<int>> result(size);
  vector<future<void>> futures;
  size_t first_row = 0;
  for (auto page : Paginate(result, page_size)) {
    futures.push_back(
      async([page, first_row, size] {
        GenerateSingleThread(page, first_row, size);
      })
    );
    first_row += page_size;
  }

  return result;
}
```

Теперь в `main()` будем вызывать многопоточный генератор.

```
{
  LOG_DURATION("Multi thread generation");
  matrix = GenerateMultiThread(matrix_size, 2000);
}

// Single thread generation: 1229 ms
// Multi thread generation: 611 ms
// Single thread sum: 365 ms
// 195928050144
// Total: 2345 ms
```

Многопоточная генерация матрицы оказалась в два раза быстрее, чем однопоточная.

5.2.3. Особенности шаблона `future`

Обратим внимание на вектор `futures` из функции `GenerateMultiThread`. Мы его объявили, сложили в него результаты вызова `async` и больше его не вызывали. Сохраняя результаты в вектор,

мы откладываем вызов их деструктора, в котором вызывается `get()`. Если результат вызова функции `async` не сохранить в переменную, то программа может выполняться последовательно.

5.2.4. Состояние гонки

Разработаем класс `Account`:

- Он представляет собой банковский счёт;
- Не должен позволять тратить больше денег, чем есть на счету;
- Не должен допускать, чтобы баланс счёта стал отрицательным.

```
struct Account {
  int balance = 0;

  bool Spend(int value) {
    if (value <= balance) {
      balance -= value;
      return true;
    }
    return false;
  };
};
```

Напишем функцию, которая будет пытаться 100000 раз потратить один рубль. Она возвращает количество потраченных денег.

```
int SpendMoney (Account& account) {
  int total_spent = 0;
  for (int i = 0; i < 100000; ++i) {
    if (account.Spend(1)) {
      ++total_spent;
    }
  }
  return total_spent;
}
```

```
int main() {
  Account my_account(100000);

  cout << "Total spent: " << SpendMoney(my_account)
       << "Balance: " << my_account.balance << endl;
}
// Total spent: 100000
// Balance: 0
```

Пусть теперь несколько людей тратят деньги с семейного счёта асинхронно.

```
int main() {
  Account family_account(100000);

  auto husband  = async(SpendMoney, ref(family_account));
  auto wife     = async(SpendMoney, ref(family_account));
  auto son      = async(SpendMoney, ref(family_account));
  auto daughter = async(SpendMoney, ref(family_account));

  int spent = husband.get() + wife.get() + son.get()
      + daughter.get();

  cout << "Total spent: " << spent << endl
       << "Balance: " << family_account.balance << endl;
}
// Total spent: 140573
// Balance: 0
```

Семья потратила больше денег, чем изначально лежало на счёте.

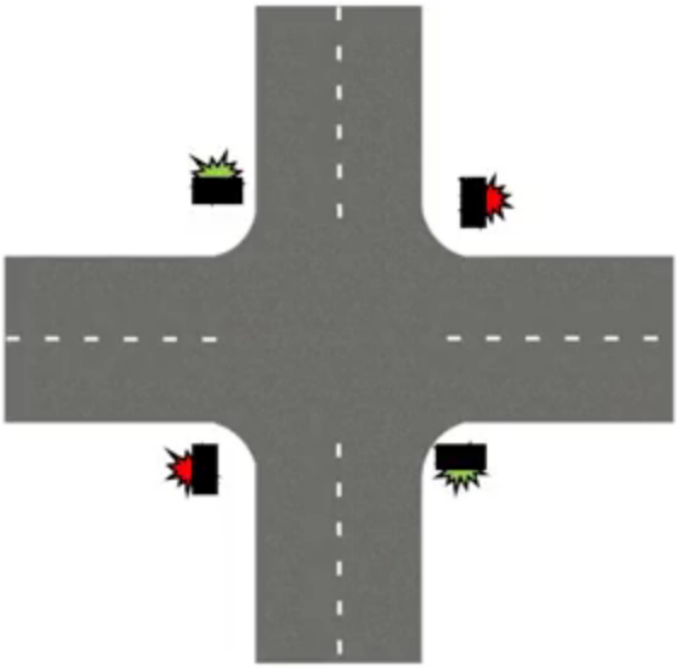
Если несколько потоков обращаются к одной и той же переменной, целостность данных может быть нарушена. Класс `Account` поддерживал инвариант: баланс никогда не становится отрицательным, мы не можем потратить больше, чем есть на счету. Этот инвариант был нарушен при одновременном обращении к данным. В этом заключается гонка данных. Чтобы её избежать, необходимо выполнять синхронизацию доступа к данным из нескольких потоков.

5.2.5. mutex и lock_guard

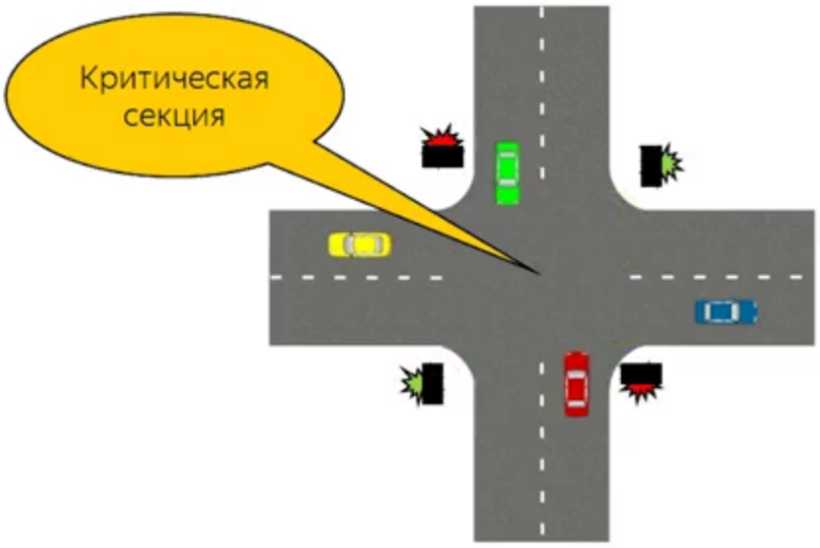
Добавим в наш класс `Account` `vector<int> history`, который будет сохранять все транзакции.

```
struct Account {
  int balance = 0;
  vector<int> history;

  bool Spend(int value) {
    if (value <= balance) {
      balance -= value;
      history.push_back(value);
      return true;
    }
    return false;
  };
};
```

Текущий код нужно адаптировать для работы нескольких потоков, используя `Mutex (MUTual EXclusion)`. Простым примером мьютекса является перекрёсток.



Мьютекс защищает критическую секцию. В программировании это тот участок кода, который в любой момент времени может выполнять не более одного потока.



Применим мьютекс в нашей программе. Подключим заголовочный файл `mutex`. В классе `Account` объявим поле

```
mutex m;
```

Критической секцией в нашем коде является метод `Spend`. Его нужно защитить мьютексом.

```
bool Spend(int value) {
    lock_guard<mutex> g(m);
    if (value <= balance) {
      balance -= value;
      history.push_back(value);
      return true;
    }
    return false;
};
```

Теперь программа работает правильно:

```
// Total spent: 100000
// Balance: 0
```

5.2.6. <execution>, которого нет

Вернёмся к примеру с генерацией и суммированием элементов матрицы. Изменим реализацию функции `GenerateSingleThread`. Заменим цикл `for` на алгоритм `for_each`. По сути он делает то же самое.

```
void GenerateSingleThread(
    ContainerOfVectors& result;
    size_t first_rod,
    size_t column_size
) {
  for_each (
    begin(result),
    end(result),
    [&first_row, column_size] (vector<int>& row) {
      row.reverse(column_size);
      for (size_t column = 0; column < column_size; ++column) {
        row.push_back(first_row ^ column);
      }
      ++first_row;
    }
  );
}
```

В стандарте C++17 были введены параллельные версии стандартных алгоритмов. Чтобы получить параллельную версию алгоритма `for_each` достаточно подключить заголовочный файл `execution` и в качестве первого параметра в функции указать `execution::par`.

```
for_each (execution::par, ...)
```

Ни один из ведущих компиляторов на момент записи видео (апрель 2018) не реализовал поддержку параллельных версий алгоритмов. Сейчас этим воспользоваться нельзя.