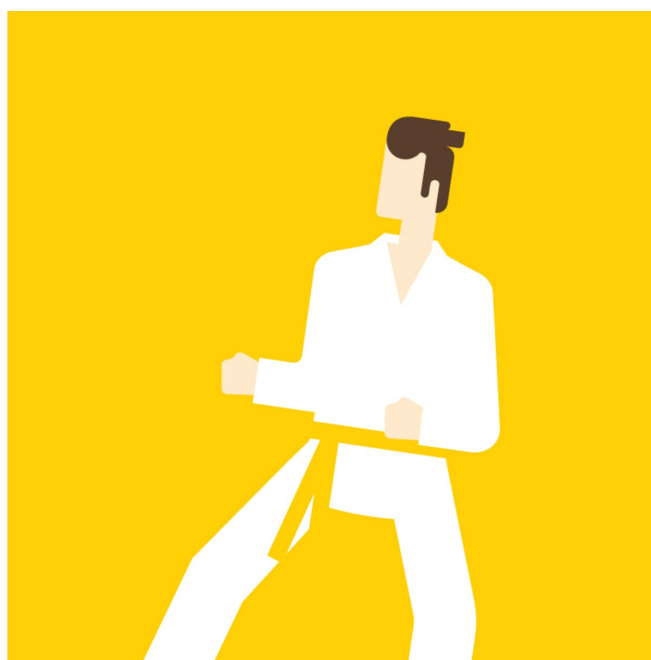




Основы разработки на C++: жёлтый пояс

Неделя 4

Итераторы, алгоритмы, контейнеры



Оглавление

Итераторы, алгоритмы, контейнеры	3
4.1 Введение в итераторы	3
4.1.1 Введение в итераторы	3
4.1.2 Концепция полуинтервалов итераторов	5
4.1.3 Итераторы множеств и словарей	8
4.1.4 Продвинутое итерирование по контейнерам	9
4.2 Использование итераторов в алгоритмах и контейнерах	11
4.2.1 Использование итераторов в методах контейнеров	11
4.2.2 Использование итераторов в алгоритмах	12
4.2.3 Обратные итераторы	14
4.2.4 Алгоритмы, возвращающие набор элементов	15
4.2.5 Итераторы <code>inserter</code> и <code>back_inserter</code>	17
4.2.6 Отличия итераторов векторов и множеств	18
4.2.7 Категории итераторов, документация	19
4.3 Очередь, дек и алгоритмы поиска	20

4.3.1	Стек, очередь и дек	20
4.3.2	Алгоритмы поиска	22
4.3.3	Анализ распространённых ошибок	25

Итераторы, алгоритмы, контейнеры

4.1. Введение в итераторы

4.1.1. Введение в итераторы

Рассмотрим задачу. Пусть у нас есть вектор строк с языками программирования:

```
#include <iostream>
#include <vector>

using namespace std;

int main() {
    vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
    return 0;
}
```

Зададимся целью найти в нашем векторе язык, начинающийся с буквы 'C' или сказать, что такого языка нет. Можно написать цикл `for` и проверять первую букву каждого языка, но чтобы знать, нашёлся язык или нет, нам нужно хранить флажок типа `bool` и с каждым шагом всё больше шанс ошибиться. Но существует стандартный алгоритм `find_if()`, принимающий начало диапазона, конец диапазона и лямбда-функцию, которая ищет нужный язык. Дописываем строчку:

```
#include <algorithm> // подключаем модуль с алгоритмами
...
auto result = find_if(
    begin(langs), end(langs), [](const string& lang) { // лямбда-функция по языкам
        return lang[0] == 'C'; // возвращает true, если нулевая буква = 'C'
    });
cout << *result; // вызываем * от find_if, чтобы обратиться к найденному элементу
// C++
```

Видим, что нашли первый подходящий язык. Этот результат можно сохранить в какую-нибудь строчку:

```
string& ref = *result; // сохраняем в строку
cout << ref << endl; // выводим
```

Причём, поскольку `*result` – неконстантная ссылка, мы по ней можем поменять элемент. Например:

```
string& ref = *result; // сохраняем в строку C++
ref = "D++";
cout << *result << endl;
// D++
```

А если у нас в векторе лежат не строки, а более сложные структуры:

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
using namespace std;
struct Lang { // у каждого языка программирования есть название и возраст
    string name;
    int age;
};
int main() {
    vector<Lang> langs = // тоже поменяли на Lang
        {"Python", 26},
        {"C++", 34},
        {"C", 45},
        {"Java", 22},
        {"C#", 17}};

    auto result = find_if(
        begin(langs), end(langs),
        [](const Lang& lang) { // лямбда-функция немного меняется
            return lang.name[0] == 'C';
        });
    if (result == end(langs)) { // если результат выводит ссылку на конец диапазона
        cout << "Not found"; // значит, элемент не найден
    } else { // иначе мы нашли элемент
        cout << (*result).age << endl; // выводим возраст первого попавшегося языка на C
    }
}
```

```
    return 0;
}
// 34
```

Если результат не нашёлся, то `result` указывает на конец диапазона. Это значит, что мы можем спокойно проверить на наличие. Кроме того, обращаться можно короче:

```
cout << result->age << endl; // более удобная форма
```

А для языков на букву 'D' получим: `Not Found`. И `begin()`, `end()` и `result` указывают на какую-то позицию в контейнере. Все типы, указывающие на какую-то позицию контейнера, называются **итераторами**. А операция `*` над итератором называется **разыменованием итератора**. Выведем начало контейнера:

```
cout << begin(langs)->name << " " << langs.begin()->age << endl;
// Python 26
```

А вот `end(langs)` уже указывает не на последний элемент контейнера, а на конец. Заметим, что к началу можно обращаться методом `langs.begin()`.

4.1.2. Концепция полуинтервалов итераторов

Итераторы есть не только у вектора, но и у любого контейнера. Например, у строки:

```
#include <string>
...
string lang = langs[1].name;
auto it = begin(lang);
cout << *it;
// C
```

`begin()` у строки указывает на её первый символ. Пока что мы с их помощью только получали элемент контейнера, но из названия следует, что с их помощью можно итерироваться по контейнеру. Допишем:

```
++it; // получим следующий символ
cout << *it
// C+
```

Теперь мы вывели сначала нулевой элемент, а затем первый. Давайте с помощью цикла `for` проитерируемся по вектору `langs`:

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
using namespace std;
struct Lang {
    string name;
    int age;
};
int main() {
    vector<Lang> langs = // тоже поменяли на Lang
        {"Python", 26},
        {"C++", 34},
        {"C", 45},
        {"Java", 22},
        {"C#", 17}};
    for (auto it = begin(langs); it != end(langs); ++it) {
        cout << it-> name << " ";
    }
    return 0;
}
// Python C++ C Java C#
```

Таким образом мы вывели все языки. Когда итератор показывает на `begin(langs)`, выводится первый элемент. Итератор двигается вправо, проверяет, что он не достиг конца и т. д. Выводим последний элемент и сдвигаем итератор на `end`. Т. е. `end(langs)` – это итератор сразу за последним элементом. Получается полуинтервал $[begin, end)$.

Для 5 элементов получаем 5 элементов и `end`. А вот пустой диапазон представляется из равных итераторов `begin` и `end`. Попробуем обратиться к полю `end(langs)`. Код компилируется, но падает, потому что там либо чужая память, либо вообще ничего не лежит. Напишем универсальную функцию `PrintRange`, принимающую два итератора на `Lang`:

```
using LangIt = vector<string>::iterator; // укорачиваем запись
void PrintRange(LangIt range_begin, // начало
    LangIt range_end) { // конец
    for (auto it = range_begin; it != range_end; ++it) {
        cout << *it << " "; // мы не хотим переопределять вывод структур
    }
}
```

```

}
int main() {
    vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
    PrintRange(begin(langs), end(langs));
    return 0;
}
// Python C++ C Java C#

```

Всё снова работает. Вспомним, что итераторы есть для разных контейнеров, и хотелось бы написать универсальный итератор. Цикл `for` уже достаточно универсален. Напишем шаблонную функцию:

```

template <typename It> // написали шаблонную функцию
void PrintRange(It range_begin, // поменяли здесь на шаблон итератора
                It range_end) { // и тут
    for (auto it = range_begin; it != range_end; ++it) {
        cout << *it << " ";
    }
}
...
PrintRange(begin(langs), end(langs)); // проходимся по контейнеру с языками
PrintRange(begin(langs[0]), end(langs[0])); // проходимся по контейнеру с python
// Python C++ C Java C# P y t h o n

```

Теперь, используя концепцию полуинтервалов, попробуем вывести половину векторов по отдельности, например, все языки строго до 'C' и отдельно все языки начиная с него:

```

auto border = find(begin(langs), end(langs), "C"); // раздел
PrintRange(begin(langs), border); // Python, C++
PrintRange(border, end(langs)); // C, Java, C#

```

Мы просто разбили по нужному языку наш полуинтервал на два диапазона.

Заключение:

- Итератор – способ задать позицию в контейнере;
- `begin(c)` и `end(c)` – границы полуинтервала [*begin*, *end*);
- Алгоритмы часто принимают пару итераторов, образующую полуинтервал;
- С помощью шаблонов легко написать свой универсальный алгоритм, например, `PrintRange`.

4.1.3. Итераторы множеств и словарей

Давайте посмотрим, как работает итератор от других контейнеров. Увидим, что по сути они работают точно так же. Например, множество. Давайте возьмем наш вектор языков и заменим его на множество языков.

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
#include <set> // подключили множества
using namespace std;
template <typename It> // написали шаблонную функцию
void PrintRange(It range_begin, // поменяли здесь на шаблон итератора
                It range_end) { // и тут
    for (auto it = range_begin; it != range_end; ++it) {
        cout << *it << " ";
    }
}

int main() {
    set<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
    PrintRange(begin(langs), end(langs));
    // тоже выводит названия, но в алфавитном порядке
    auto it = langs.find("C++");
    PrintRange(begin(langs), it);
    // выведем все языки до C++, в отсортированном порядке
    return 0;
}
// C C# C++ Java Python C C#
```

Получим вывод сначала всех строк, а потом строк, которые лексикографически меньше C++. Теперь рассмотрим словарь. Но для вызова `PrintRange` должен быть определён оператор `<<`.

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
#include <map> // подключили словари
using namespace std;
void PrintRange...
int main() {
    map<string, int> langs = // словарь Имя-возраст
```

```

    {"Python", 26},
    {"C++", 34},
    {"C", 45},
    {"Java", 22},
    {"C#", 17}};
return 0;
}

```

Какой тип у элементов словаря? Когда вы итерировались по нему `range based for`'ом, этот тип был парой. И здесь `*it` – это пара. Переопределять оператор вывода для словаря мы уже умеем. Создадим функцию `PrintMapRange` для вывода словаря:

```

void PrintMapRange(It range_begin, It range_end) {
    for (auto it = range_begin; it != range_end; ++it){
        cout << it->first << '/' << it->second << " ";
    }
}
...
auto it = langs.find("C++");
PrintMapRange(begin(langs), it); // вызовем наш
return 0;
}
// C/45 C#/17

```

Видим, что вывелись нужные нам языки и их возраст.

4.1.4. Продвинутое итерирование по контейнерам

Продemonстрируем, что итераторы универсальнее, чем `range-based for`, что их можно использовать в гораздо более широком числе случаев. Вернёмся к множеству языков. Сделаем множество строк с языками. И с помощью итераторов выведем множество в обратном порядке с помощью `--it`.

```

#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
using namespace std;
int main() {
    vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
}

```

```
auto it = end(langs);
while (it != begin(langs)) {
    --it;
    cout << *it << " ";
}
}
// C# Java C C++ Python
```

Всё работает. Итерирование в обратную сторону работает так: проверяем, что `it != begin`, двигаем его влево и уже можем вывести последний элемент. И т. д., пока не доходим до начала. Мы вывели вектор в обратном порядке. Кроме того, тот же код можно переписать в виде:

```
while (it != begin(langs)) { // заметим, что нельзя делать --it от it = begin
    --it;
    cout << *it << " ";
}
```

Опасные операции над итераторами:

- `*end(c)` – обращаться к элементу после последнего;
- `auto it = end(c); ++it;` – смотреть на элемент после `end`;
- `auto it = begin(c); --it;` – смотреть на элемент до `begin`.

Итераторы очень похожи на ссылки, но есть разница.

Отличия итераторов от ссылок:

- Итераторы могут указывать «в никуда» – на `end`. Ссылка всегда привязана к чему-то;
- Итераторы можно перемещать на другие элементы:

```
vector<int> numbers = {1, 3, 5};
auto it = numbers.begin();
++it; // it указывает на 3
int& ref = numbers.front();
++ref; // теперь numbers[0] == 2
```

В итоге мы узнали, что у всех контейнеров есть итераторы, и чем они отличаются от ссылок. И итераторы предоставляют универсальный способ обхода контейнеров.

4.2. Использование итераторов в алгоритмах и контейнерах

4.2.1. Использование итераторов в методах контейнеров

Где мы раньше встречали итераторы?

1. В алгоритмах, например `sort`, `count`, `count_if`, `reverse`, `find_if`;
2. Конструкторы вектора и множества;
3. Метод `find` у множества.

Рассмотрим методы контейнеров на примере вектора строк.

```
vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
auto it = find(begin(langs), end(langs), "C++"); // получаем позицию C++
langs.erase(it); // метод удаления элемента из контейнера по итератору it
langs.insert(begin(langs), "C++") // вставка перед итератором элемента C++
langs.erase(it, end(langs)); // удалили все с C++ и до конца
// C# Java C C++ Python
```

У вектора длины 5 есть 6 позиций для вставки от `v.insert(begin(), value)` до `v.insert(end(), value)`. Вставка в произвольное место вектора:

- Вставка диапазона

```
v.insert(it, range_begin, range_end);
// вставит диапазон [range_begin, range_end) в позицию it
```

- Вставка элемента несколько раз

```
v.insert(it, count, value);
// count раз вставляет элемент value в позицию it
```

- Вставка нескольких элементов

```
v.insert(it, {1, 2, 3});
// вставляет 1, 2, 3 в позицию it
```

4.2.2. Использование итераторов в алгоритмах

Рассмотрим алгоритмы, которые можно применять к векторам.

```
vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
remove_if(begin(langs), end(langs),
    [](const string& lang) { // лямбда-функция, по которой удаляем
        return lang[0] == 'C'; // хотим удалить все языки, начинающиеся на C
    });
PrintRange(begin(langs), end(langs));
// Java Python C C#
```

Но у нас не удалились C и C#. Оказывается даже у стандартных алгоритмов C++ итераторы – это настолько общая концепция, что они не позволяют обратиться к исходным контейнерам. Поэтому алгоритм `remove_if` может лишь подсказать вам, помочь вам удалить что-то из контейнера. Он помог. Как он помог? Всё, что должно в контейнере остаться, перебросил в начало этого контейнера. И он вернул новый конец вашего вектора, то, что должно стать его концом. И теперь ваша задача сделать то, что вернул `remove_if`, новым концом вектора. Как это можно сделать? Например, с помощью метода `erase`.

```
langs.erase(it, end(langs)); // удаляем начиная с итератора и до конца
// Java Python
```

Ещё раз: `remove_if` ничего не удаляет. Он лишь помогает нам удалить, потому что общие алгоритмы не могут влиять на контейнер (например, изменять его размер).

```
vector<string> langs = {"Python", "C++", "C++", "Java", "C++"};
// оставляем из подряд идущих повторов только один элемент
auto it = unique(begin(langs), end(langs));
langs.erase(it, end(langs)); // удаляем повторяющиеся, которые выкинуты в конец
PrintRange(begin(langs), end(langs));
// Python C++ Java C++
```

Таким образом мы удалили подряд идущие дубликаты элементов. Получается, что можно оставить в векторе только уникальные элементы, сначала их отсортировав, потом удалив повторы, то есть сначала `sort`, потом `unique`, и даже не нужно создавать их множество для этого, так получается экономнее.

Еще есть алгоритм нахождения минимума в массиве:

```
vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
```

```
auto it = min_element(begin(langs), end(langs)); // кладём в итератор мин. элемент
cout << *it << endl; // min_element может вернуть end(langs), только если langs пуст
// C
```

```
auto it = max_element(begin(langs), end(langs)); // максимальный элемент
cout << *it << endl;
// Python
```

```
auto p =
    minmax_element(begin(langs), end(langs)); // пара - min и max в контейнере
cout << *p.first << ' ' << *p.second << endl;
// C Python
```

Таким образом, мы умеем получать минимальный и максимальный элементы в векторе. Но имеет ли смысл применять такие алгоритмы ко множеству? Ответ – нет. На множестве (`set`) нам достаточно взять `it = begin(langs)` для получения минимального элемента и `it = end(langs); --it;` для получения максимального.

Теперь попробуем вызвать `remove` для элементов множества:

```
set<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
remove(begin(langs), end(langs), "C");
```

Но оно не скомпилировалось и выдало много ошибок. Вспомним, что делает `remove` – он переставляет элементы в конец для удаления. А множество не даёт переставлять элементы.

Но есть, например, алгоритм, проверяющий какое-то свойство для всего диапазона:

```
set<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
cout << all_of(begin(langs), end(langs), [](const string& lang) {
    return lang[0] >= 'A' && lang[0] <= 'Z'; // все названия с большой буквы
}) << endl;
// 1
```

Все элементы начинаются с заглавной английской буквы и алгоритм выдал `true` (1). Если изменить первую букву какого-нибудь языка на малую, начнёт выводить 0. Что мы узнали?

1. Методы вектора, позволяющие вставить в конкретное место вектора или удалить: `insert`, `erase`;
2. Алгоритмы:

- `remove_if` – оставляет в начале вектора элементы, не удовлетворяющие условию;
- `unique` – оставляет в начале вектора по одному элементу из группы подряд идущих повторений;
- `min_element`, `max_element`, `minmax_element` – `min`, `max` элементы;
- `all_off` – проверка условия для всех элементов.

4.2.3. Обратные итераторы

Бывают не только обычные итераторы. Например, вывод в обратном порядке можно сделать так:

```
vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
PrintRange(rbegin(langs), rend(langs)); // обратные итераторы
// C# Java C C++ Python
```

`rbegin()` и `rend()` от слова `reverse` – перевернутый. Это **обратные итераторы**.

Причём `*rbegin(langs) = "C#"`, а вот `*rend()` не скомпилируется.

```
vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
auto it = rbegin(langs); // итератор на последний элемент
cout << *it << " "; // выводим
++it;
cout << *it << " "; // сдвинули итератор и вывели предпоследний элемент
// C# Java
```

Если `begin` и `end` имеют тип `vector<string>::iterator`, то `rbegin` и `rend` в свою очередь имеют тип `vector<string>::reverse_iterator`.

Python	C++	C	Java	C#	
	Python	C++	C	Java	C#

`begin` указывает на Python, а `end` за C#;
а вот `rbegin` – уже на C# и `rend` перед Python.

Передадим обратные итераторы в наши алгоритмы:

```
auto result = find_if(
    rbegin(langs), rend(langs),
    [](const string& lang) { // лямбда-функция по языкам
        return lang[0] == 'C'; // возвращает true, если нулевая буква = 'C'
    });
```

```
});  
// C#
```

Раньше `find_if` возвращал первый подходящий элемент, а теперь последний (первый для диапазона обратных итераторов). Вызовем `sort` от обратных итераторов и посмотрим на результат:

```
#include <iostream>  
#include <vector>  
#include <algorithm>  
#include <map> // подключили словари  
using namespace std;  
template <typename It> // написали шаблонную функцию  
void PrintRange(It range_begin, // поменяли здесь на шаблон итератора  
               It range_end) { // и тут  
    for (auto it = range_begin; it != range_end; ++it) {  
        cout << *it << " ";  
    }  
}  
  
int main() {  
    vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};  
    sort(rbegin(langs), rend(langs)); // сортируем по убыванию  
    PrintRange(begin(langs), end(langs));  
    return 0;  
}  
// Python Java C++ C# C
```

`reverse` для обратных операторов работает как и для прямых (переворачивает).

В итоге обратные итераторы упрощают итерирование по контейнеру в обратную сторону и могут быть переданы в алгоритмы. А `sort(rbegin(langs), rend(langs));` – простой способ сортировки вектора по убыванию.

4.2.4. Алгоритмы, возвращающие набор элементов

Мы рассматривали алгоритм `remove_if`, который позволяет удалить элемент по какому-то критерию в массиве, в диапазоне элементов в векторе. А что если мы хотим эти элементы не удалить, а аккуратно отложить, например, в конец вектора? Для этого есть алгоритм `partition`. Я вызвал алгоритм `partition` от диапазона, который я хочу разбить на две части, и передаю

критерий, по которому я хочу разбить.

```
vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
auto it = partition(begin(langs), end(langs), [](const string& lang) {
    return lang[0] == 'C'; // делим по принципу "начинается или не начинается на C"
});
PrintRange(begin(langs), end(langs));
// C# C++ C Java Python
```

Сначала идут все языки, которые начинаются с буквы C в каком-то порядке, как получилось: C#, C++ и C, а потом все остальные языки. То есть все элементы, которые удовлетворяют критерию, для которых лямбда-функция возвращает true, перемещаются в начало диапазона. Причём мы можем сохранить результат `partition` (правую границу полуинтервала тех элементов, которые удовлетворяют условию) в итератор `it`.

Если мы хотим переложить какие-то элементы из одного вектора в другой, используем алгоритм `copy_if`:

```
// исправим PrintRange, чтобы выводил через запятую
...
vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
vector<string> c_langs(langs.size()); // вектор, куда мы копируем, должен быть
// объявлен и иметь подходящий размер
auto it = copy_if(begin(langs), end(langs), begin(c_langs),
    [](const string& lang) {
        return lang[0] == 'C';
    });
PrintRange(begin(c_langs), end(c_langs));
// C++, C, C#, , ,
```

Заметим, что размер остался равным 5. Итераторы не могут менять размер векторов. Но `copy_if` копирует подходящие под условие элементы и возвращает в `it` итератор на новый конец вектора, в который копировали.

Теперь поговорим о `set`'ах. Что можно делать с множествами в математике? Объединять, пересекать, вычитать. Рассмотрим алгоритмы C++, которые помогают делать это же с множествами здесь.

```
// исправим PrintRange, чтобы выводил через запятую
set<int> a = {1, 8 ,3};
set<int> b = {3, 6 ,8};
```

```
vector<int> v(a.size()); // вектор для хранения результата размера как set a
auto it = set_intersection(begin(a), end(a), begin(b), end(b), begin(v));
// intersection принимает два полуинтервала и итератор, куда сохранять результат
PrintRange(begin(v), end(v));
// 3, 8, 0,
```

В итоге мы имеем пересечение множеств и 0, который дополняет до размера `a`. Сам `set_intersection` возвращает итератор за концом итогового пересечения. Т. е.:

```
PrintRange(begin(v), it);
// 3, 8,
```

Замечание: если мы не укажем явно размер вектора, в который помещаем результат, то код упадёт.

4.2.5. Итераторы `inserter` и `back_inserter`

Рассмотрим более удобный способ.

```
#include <iterator>
...
vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
vector<string> c_langs; // о размере уже не беспокоимся
copy_if(begin(langs), end(langs),
        back_inserter(c_langs), // специальный итератор, вставляющий в конец
        [](const string& lang) { // привычная лямбда-функция
            return lang[0] == 'C'; // снова выделяем только начинающиеся на C
        });
PrintRange(begin(c_langs), end(c_langs));
// C++, C, C#,
```

Вектор имеет нужный размер и не содержит лишних элементов. Итераторы умеют делать лишь ограниченный набор действий: * (ссылка на конкретный элемент), ++, -- и сравнение итераторов. А итератор `back_inserter` (если с ним происходят перечисленные операции) делает `push_back` в контейнер, к которому он относится.

Аналогично поступим с алгоритмом `set_intersection`. У множества есть просто `insert`:

```
set<int> a = {1, 8, 3}
```

```
set<int> b = {3, 6, 8};
set<int> res;
auto it = set_intersection(begin(a), end(a), begin(b), end(b),
    inserter(res, end(res))); // итератор для вставки в множество
PrintRange(begin(res), end(res));
```

`inserter` возвращает специальный итератор, который вставляет элемент в множество.

4.2.6. Отличия итераторов векторов и множеств

Рассмотрим задачу: найти в векторе строк язык, который начинается с буквы 'C', и найти позицию элемента в векторе (а не итератор).

```
vector<string> langs = {"Python", "C++", "C", "Java", "C#"};
auto it = find_if(begin(langs), end(langs),
    [](const string& lang) {
        return lang[0] == 'C';
    });
cout << it - begin(langs) << endl; // таким образом получаем номер элемента в векторе
// 1
```

Для получения номера элемента достаточно из полученного с помощью `find_if` вычесть итератор начала диапазона. Получим 1. Действительно, у 'C++' в векторе номер 1. Таким образом, **итераторы вектора можно вычитать друг из друга**. Но такое не работает для итераторов множества, т. к. для них не определена операция «минус». Аналогично итераторы вектора можно сравнивать не только с помощью `==` и `!=`, но и с помощью `<` и `>`. А для множеств применимо только равно и не равно.

Попробуем для множества чисел вывести все элементы, строго большие его самого.

```
set<int> s = {1, 6, 8, 9};
auto it = s.find(6);
++it;
PrintRange(it, end(s));
// 8, 9,
```

Но часто бывает, что `it` нельзя изменить и поэтому нельзя писать `it + 1`. Но этого можно избежать операцией `next(it)`. По сути она прибавляет 1 с помощью `++`.

```
set<int> s = {1, 6, 8, 9};
auto it = s.find(6);
PrintRange(next(it), end(s));
// 8, 9,
```

Точно так же работает функция `prev`, только вычитает 1.

4.2.7. Категории итераторов, документация

Научимся читать документацию по языку C++ с помощью сайта ru.cppreference.com. Сейчас нас интересует документация по алгоритмам. Посмотрим на [unique_copy](#).

```
template <class InputIt, class OutputIt>
ForwardIt unique_copy(InputIt first, InputIt last, OutputIt d_first);
```

Видим, что это шаблонная функция, которая принимает `InputIt first`, `InputIt last`, `OutputIt d_first`. Категории итераторов в документации:

- **Input:** итераторы, из которых можно читать (итераторы любых контейнеров). Но не подходят `inserter` и `back_inserter`;
- **Forward, Bidirectional:** обычные итераторы, из которых можно читать (кроме `set` и `map`, если по `forward`-итератору что-то меняется);
- **Random:** итераторы, к которым можно прибавлять число или вычитать друг из друга (итераторы векторов и строк);
- **Output:** итераторы, в которые можно писать (итераторы векторов и строк, `inserter` и `back_inserter`).

Например, `partial_sort` принимает `random`-итераторы, потому что он сортирует (переставляет элементы) и пользуется функцией.

4.3. Очередь, дек и алгоритмы поиска

4.3.1. Стек, очередь и дек

Рассмотрим новый контейнер: **очередь**. Очередь бывает из людей или запросов. Новые приходят в конец и удаляются из начала (или наоборот). Её можно реализовать с помощью вектора:

```
v.push_back(x); // добавляем новый
v.erase(begin(v)); // удаляем из начала вектора, что очень долго
```

Элементы вектора хранятся подряд, и поэтому удаление из начала вектора будет работать за длину вектора, потому что он будет переставлять все элементы в начало, чтобы заполнить полученную пустоту: удалили нулевой, переместили первый на нулевое место, второй на первое и т.д.

Для работы с очередью есть специальный контейнер – **deque** (double-ended queue)

- Это двусторонняя очередь;
- `#include <deque>;`
- Быстрые операции:

```
d.push_back(x) // добавление в конец
d.pop_back(x)  // удаление из конца
d.push_front(x) // добавление в начало
d.pop_front(x) // удаление из начала
d[i]           // обращение к элементу по индексу
```

На коде, представленном ниже, продемонстрируем скорость работы **deque**:

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
using namespace std;
int main() {
    int n = 80000;
    vector<int> v(n);
    while (!v.empty()) {
        v.erase(begin(v));
    }
}
```

```

}
cout << "Empty!" << endl;
return 0;
}

```

Т.е. мы сделали примерно $80000^2/2$ операций (т. к. каждый раз удаляли и перемещали).

```

#include <iostream>
#include <deque>
#include <algorithm>
using namespace std;
int main() {
    int n = 80000;
    deque<int> v(n);
    while (!v.empty()) {
        v.erase(begin(v));
    }
    cout << "Empty!" << endl;
    return 0;
}

```

Сработало моментально. И даже `pop_front` тоже сработает сразу. Дек умеет больше, но, как следствие, он менее эффективен. Если нужно работать с двумя концами, используйте дек. Но если хватает вектора, используйте вектор.

Разберём ещё одну структуру: **очередь** (`queue`).

- Если нужна только очередь, используйте `queue`;
- Основана на деке, но работает немного быстрее;
- `#include <queue>;`
- Умеет совсем немного:

```

q.push(x), q.pop(x) // вставляем в начало и удаляем из конца
q.front(), q.back() // ссылки на первый и последний элементы очереди
q.size(), q.empty() // размер и проверка на пустоту

```

Кроме того, существует **стек** (`stack`).

- Позволяет лишь добавлять в конец и удалять из конца;
- `#include <stack>;`
- Как вектор, но умеет меньше:

```
st.push(x), st.pop(x) // вставляем в конец и удаляем из конца
st.top()             // ссылка на последний элемент
st.size(), st.empty() // размер и проверка на пустоту
```

4.3.2. Алгоритмы поиска

Рассмотрим специальный класс методов контейнеров и алгоритмов – алгоритмы поиска. Мы с ними уже сталкивались при поиске по вектору и множеству;

- Подсчёт количества:

```
count(begin(v), end(v), x);
s.count(x);
```

- Поиск:

```
find(begin(v), end(v), x);
s.find(x);
```

Рассмотрим задачу поиска элементов в контейнерах:

1. Где будем искать?

- Неотсортированный вектор (или строка);
- Отсортированный вектор;
- Множество (или словарь).

2. Что будем искать и проверять?

- Проверить существование;
- Проверить существование и найти первое вхождение;
- Найти первый элемент, больший или равный данному;

- Найти первый элемент, больший данного;
- Подсчитать количество;
- Перебрать все.

Как осуществляется поиск в неотсортированном векторе?

- Поиск конкретного элемента:

```
find(begin(v), end(v), x)
```

- Элемент по какому-то условию (больше, меньше, больше или равен):

```
find_if(begin(v), end(v), [](int y) {...})
```

- Посчитать количество:

```
count(begin(v), end(v), x)
```

- Перебрать все можно с помощью цикла и `find`.

Например, выведем позиции всех пробелов в строке:

```
for (auto it = find(begin(s), end(s), ' ');
     it != end(s);
     it = find(next(it), end(s), ' ')) { // переходим в цикле к следующему пробелу
    cout << it - begin(s) << " "; // next(it) эквивалентен it + 1
}
```

В отсортированном векторе поиск можно осуществить быстрее с помощью [бинарного поиска](#). Количество операций равно $\log_2(N)$ – двоичному логарифму числа элементов. Столько же работает поиск во множестве и словаре.

Отсюда следствие: если вы просто хотите быстро искать по набору элементов, но не хотите добавлять новые или удалять какие-то, вам достаточно отсортированного вектора. Это будет оптимальнее, чем если вы используете множество. В отсортированном векторе можно искать так:

- Проверка на существование:

```
binary_search(begin(v), end(v), x)
```

- Первый больший или равный данному:


```
lower_bound(begin(v), end(v), x)
```

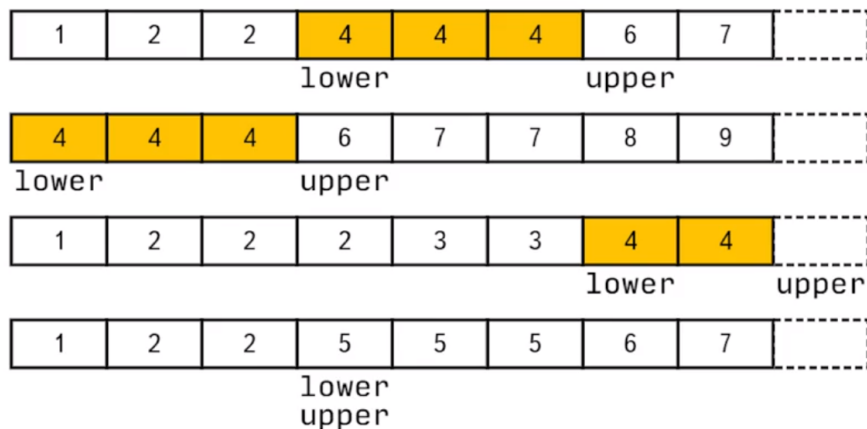
- Первый элемент, больший данного:

```
upper_bound(begin(v), end(v), x)
```

- Диапазон элементов, равных данному (аналог minmax):

```
equal_range(begin(v), end(v), x) ==  
make_pair(lower_bound(...), upper_bound(...))
```

lower_bound и upper_bound



Ещё про `equal_range`.

- Если элемент есть, то `equal_range = [lower_bound, upper_bound)` – диапазон всех вхождений;
- Если же элемента нет, то `lower_bound == upper_bound` – позиция, куда можно вставить элемент без нарушения порядка сортировки;
- Количество вхождений `== upper_bound - lower_bound`;
- А перебрать все элементы, равные данному, можно просто проитерировавшись от `lower_bound` до `upper_bound`.

Поиск во множестве мы уже знаем:

- `s.count(x)`;
- `s.find(x)`;
- `s.lower_bound(x)`;
- `s.upper_bound(x)`;
- `s.equal_range(x)`.

4.3.3. Анализ распространённых ошибок

Первый пример распространённых ошибок – вычитание итераторов множества:

```
int main() {
    set<int> s = {1, 2, 7};
    end(s) - begin(s);
    return 0;
}
// no match for 'operator-'
```

Это ошибка простая, а вот если мы возьмём алгоритм, принимающий `Random` итераторы (например, `partial_sort`) и передадим ему итераторы множества:

```
int main() {
    set<int> s = {1, 2, 7};
    partial_sort(begin(s), end(s), end(s))
    return 0;
}
// no match for 'operator-', 'operator+', 'operator<'
```

Всё по той же причине. Итератор множества – не `Random` итератор, по нему нельзя сравнивать или перемещать элементы.

Теперь попробуем вызвать `remove`:

```
int main() {
    set<int> s = {1, 2, 7};
    remove(begin(s), end(s), 0);
    return 0;
}
// assignment of read-only location ...
```

Т. е. присваивание в итератор, содержимое которого нельзя менять. Ссылка под итераторами константная.

Теперь одна из самых страшных ошибок (не ловится на этапе компиляции) – передача диапазона, у которого итераторы от разных контейнеров:

```
int main() {
    vector<int> s1 = {1, 2, 7};
    vector<int> s2 = {2, 7};
    sort(begin(s1), end(s2)); // диапазон от начала одного вектора до конца другого
    return 0;
}
```

Запускаем код – и программа упала. В обратном порядке она, скорее всего, зациклится. Проверить это можно, закомментировав код, и если он заработает, проблема в нём.

Если же мы передадим итераторы разных типов, то:

```
int main() {
    vector<int> s1 = {1, 2, 7};
    vector<int> s2 = {2, 7};
    sort(begin(s1), rend(s2));
    return 0;
}
// deduced conflicting types for parameter random access iterator
```

Итераторы должны иметь один тип. А у нас в данном случае тип разный и не получается вызвать функцию `sort`.