

Содержание

1. Задание 1	2
1.1. Начало	2
1.2. Алгоритм №1	3
1.2.1. Тестирование алгоритма	4
1.2.2. Выводы по тестированию алгоритма	9
1.3. Алгоритм №2	9
1.3.1. Тестирование алгоритма	10
1.3.2. Вывод по тестированию алгоритма	15
1.4. Сравнение двух алгоритмов	16
1.5. Вывод из задания 1	17
1.5.1. Сравнение по времени выполнения	17
1.5.2. Сравнение по расходу памяти (Ёмкостная сложность)	18
2. Задание 2	19
2.1. Начало	19
2.2. Алгоритм простой сортировки (bubble sort)	19
2.2.1. Тестирование алгоритма	20
2.3. Вывод по тестированию алгоритма	23
2.3.1. Ёмкостная сложность алгоритма	23
2.3.2. Вывод об эмпирической вычислительной сложности	23
3. Задание 3	24
3.1. Тестирование при массиве в убывающем порядке значений (худший случай)	26
3.2. Тестирование при массиве в возрастающем порядке значений (лучший случай)	27
3.3. Вывод о зависимости алгоритма от исходной упорядоченности	27
4. Литература	29

Цель работы: актуализация знаний и приобретение практических умений и навыков по определению вычислительной сложности алгоритмов (эмпирический подход).

1. Задание 1

1.1. Начало

Определим структуру `ComplexityMetrics` для подсчета числа выполненных сравнений (C_n) + перемещений элементов в памяти (M_n), а также суммарное число критических операций $T_n = C_n + M_n$.

```
1 struct ComplexityMetrics {
2     size_t comparisons; // Cn – число сравнений
3     size_t moves;       // Mn – число перемещений
4     size_t total;        // Tn = Cn + Mn
5     double duration;     // время выполнения функции (мс)
6
7     ComplexityMetrics() : comparisons(0), moves(0), total(0),
8         duration(0) {}
9
10    std::string toString() const {
11        return "Cn=" + std::to_string(comparisons) +
12            ", Mn=" + std::to_string(moves) + ", Tn=" +
13            std::to_string(total) +
14            ", took " + std::to_string(duration) + " ms";
15    }
16};
```

Определим функцию для подсчета времени выполнения алгоритма:

```
1 #include <chrono>
2
3 using TestFunc = std::function<ComplexityMetrics(size_t)>;
4
5 ComplexityMetrics measureTime(TestFunc func, size_t len) {
6     auto start = std::chrono::high_resolution_clock::now();
7     ComplexityMetrics metrics = func(len);
8     auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
9
10    std::chrono::duration<double, std::milli> duration = end -
11        start;
12    metrics.duration = duration.count();
13    return metrics;
14}
```

Функция принимает функцию, соответствующую типу `ComplexityMetrics (size_t)`, и возвращает метрику.

Определим функцию для генерации случайно заполненного массива:

```
1  #include <random>
2
3  static std::mt19937 rng(std::random_device{}());
4
5  char *generateRandomArray(size_t size, const char key, const char
otherChar) {
6      char *arr = new char[size + 1];
7
8      std::bernoulli_distribution dist(0.5);
9
10     for (size_t i = 0; i < size; i++) {
11         arr[i] = dist(rng) ? key : otherChar;
12     }
13     arr[size] = '\0';
14     return arr;
15 }
```

Функция возвращает указатель на динамически аллоцированный массив символов длиной `size+1` (последний элемент массива под `'\0'`), заполненный символами `key` (символ к удалению) и `otherChar`.

1.2. Алгоритм №1

Реализуем первый метод на языке C++:

```
1  void delFirstMethod(char *x, size_t &n, const char &key) {
2      size_t i = 0;
3
4      while (i < n) {
5          if (x[i] == key) {
6              for (size_t j = i; j < n - 1; j++) {
7                  x[j] = x[j + 1];
8              }
9              n--;
10         } else {
11             i++;
12         }
13     }
14 }
```

Изменим код реализованного метода для возвращения метрик:

```

1 ComplexityMetrics delFirstMethod(char *x, size_t &n, const char
&key) {
2     ComplexityMetrics metrics;
3     size_t i = 0;
4
5     while (i < n) {
6         metrics.comparisons++; // Сравнение x[i] = key
7         if (x[i] == key) {
8             for (size_t j = i; j < n - 1; j++) {
9                 metrics.moves++; // Перемещение x[j] = x[j + 1]
10                x[j] = x[j + 1];
11            }
12            n--;
13        } else {
14            i++;
15        }
16    }
17    metrics.total = metrics.comparisons + metrics.moves;
18    return metrics;
19 }

```

Теперь функция возвращает метрику.

1.2.1. Тестирование алгоритма

Протестируем функцию в 3х случаях (лучший, худший и средний) на массивах длиной $n = 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000$

```

1 void testFirstMethod(size_t n, int runs = 100) {
2     std::cout << "\tttestFirstMethod() for " << runs << " runs:" <<
std::endl;
3     std::cout << "\t\ttestFirstMethodWorst() statistics: "
4         << testTimes(
5             [](size_t len) {
6                 char x[len];
7                 std::memset(x, '_', len);
8
9                 return delFirstMethod(x, len, '_');
10            },
11            runs, n)
12         .toString()
13     << std::endl;
14     std::cout << "\t\ttestFirstMethodBest() statistics: "
15         << testTimes(
16             [](size_t len) {
17                 char x[len];

```

```

18         std::memset(x, 'A', len);
19
20         return delFirstMethod(x, len, '_');
21     },
22     runs, n)
23     .toString()
24     << std::endl;
25 }

```

Определим функцию для тестирования алгоритма в среднем (случайном) случае:

```

1 void testBothMethodsMedium(size_t n, int runs = 100) {
2     char *arr = generateRandomArray(n, '_', 'A');
3     char *copy = new char[n + 1];
4     std::memcpy(copy, arr, n);
5
6     auto testFirst = [&](size_t n) { return delFirstMethod(arr, n,
7     '_'); };
8     auto testOther = [&](size_t n) { return delOtherMethod(copy, n,
9     '_'); };
10    std::cout << "\ttestBothMethodsMedium() for " << runs
11    << " runs: " << std::endl;
12    std::cout << "\t\ttestFirstMethodMedium() statistics: "
13    << measureTime(testFirst, n).toString() << std::endl;
14    std::cout << "\t\ttestOtherMethodMedium() statistics: "
15    << measureTime(testOther, n).toString() << std::endl;
16
17    delete[] arr;
18    delete[] copy;
19 }

```

Листинг 1. Общая функция проверки алгоритмов в среднем (случайном) случае.

Функция в данной реализации тестирует оба алгоритма на одном и том же массиве для точности сравнения. Дальше мы просто проигнорируем вывод тестирования для второго алгоритма.

Теперь в файле `main.cpp` вызовем методы для тестирования первого алгоритма:

```

1 #include "include/test.h"
2 #include <iostream>
3
4 int main() {

```

```

5     const auto runs = 1;
6
7     for (auto n : {100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000}) {
8         std::cout << "RUNNING FOR N=" << n << std::endl;
9         testFirstMethod(n, runs);
10        std::cout << "-----" << std::endl;
11        testBothMethodsMedium(n, runs);
12        std::cout << "-----" << std::endl;
13    }
14    return 0;
15 }

```

Вывод программы:

```

1  RUNNING FOR N=100
2      testFirstMethod() for 1 runs:
3          testFirstMethodWorst() statistics: Cn=100, Mn=4950, Tn=5050,
took 0.028183 ms
4          testFirstMethodBest() statistics: Cn=100, Mn=0, Tn=100, took
0.000802 ms
5  -----
6      testBothMethodsMedium() for 1 runs:
7          testFirstMethodMedium() statistics: Cn=100, Mn=2266, Tn=2366,
took 0.013666 ms
8  -----
9
10 RUNNING FOR N=200
11     testFirstMethod() for 1 runs:
12         testFirstMethodWorst() statistics: Cn=200, Mn=19900,
Tn=20100, took 0.100721 ms
13         testFirstMethodBest() statistics: Cn=200, Mn=0, Tn=200, took
0.001143 ms
14     -----
15     testBothMethodsMedium() for 1 runs:
16         testFirstMethodMedium() statistics: Cn=200, Mn=8564, Tn=8764,
took 0.047741 ms
17     -----
18
19 RUNNING FOR N=500
20     testFirstMethod() for 1 runs:
21         testFirstMethodWorst() statistics: Cn=500, Mn=124750,
Tn=125250, took 0.606165 ms
22         testFirstMethodBest() statistics: Cn=500, Mn=0, Tn=500, took
0.002314 ms
23     -----

```

```

24     testBothMethodsMedium() for 1 runs:
25         testFirstMethodMedium() statistics: Cn=500, Mn=61134,
Tn=61634, took 0.302020 ms
26 -----
27
28 RUNNING FOR N=1000
29     testFirstMethod() for 1 runs:
30         testFirstMethodWorst() statistics: Cn=1000, Mn=499500,
Tn=500500, took 2.427775 ms
31         testFirstMethodBest() statistics: Cn=1000, Mn=0, Tn=1000,
took 0.004569 ms
32 -----
33     testBothMethodsMedium() for 1 runs:
34         testFirstMethodMedium() statistics: Cn=1000, Mn=254091,
Tn=255091, took 1.250503 ms
35 -----
36
37 RUNNING FOR N=2000
38     testFirstMethod() for 1 runs:
39         testFirstMethodWorst() statistics: Cn=2000, Mn=1999000,
Tn=2001000, took 9.523869 ms
40         testFirstMethodBest() statistics: Cn=2000, Mn=0, Tn=2000,
took 0.007865 ms
41 -----
42     testBothMethodsMedium() for 1 runs:
43         testFirstMethodMedium() statistics: Cn=2000, Mn=1005082,
Tn=1007082, took 4.767976 ms
44 -----
45
46 RUNNING FOR N=5000
47     testFirstMethod() for 1 runs:
48         testFirstMethodWorst() statistics: Cn=5000, Mn=12497500,
Tn=12502500, took 59.287127 ms
49         testFirstMethodBest() statistics: Cn=5000, Mn=0, Tn=5000,
took 0.022282 ms
50 -----
51     testBothMethodsMedium() for 1 runs:
52         testFirstMethodMedium() statistics: Cn=5000, Mn=6178707,
Tn=6183707, took 29.289154 ms
53 -----
54
55 RUNNING FOR N=10000
56     testFirstMethod() for 1 runs:
57         testFirstMethodWorst() statistics: Cn=10000, Mn=49995000,
Tn=50005000, took 236.746269 ms
58         testFirstMethodBest() statistics: Cn=10000, Mn=0, Tn=10000,

```

```

took 0.044735 ms
59 -----
60     testBothMethodsMedium() for 1 runs:
61         testFirstMethodMedium() statistics: Cп=10000, Mп=25042001,
        Tп=25052001, took 119.494483 ms
62 -----

```

Представим результаты тестирования в таблицы.

п	время, мс	$C_{\text{п}}$	$M_{\text{п}}$	$T_{\text{п}} = C_{\text{п}} + M_{\text{п}}$
100	0.0008	100	0	100
200	0.0011	200	0	200
500	0.0023	500	0	500
1000	0.0046	1000	0	1000
2000	0.0079	2000	0	2000
5000	0.0223	5000	0	5000
10000	0.0447	10000	0	10000

Таблица 1. Сводная таблица результатов **лучшего** случая

п	время, мс	$C_{\text{п}}$	$M_{\text{п}}$	$T_{\text{п}} = C_{\text{п}} + M_{\text{п}}$
100	0.0137	100	2266	2366
200	0.0477	200	8564	8764
500	0.3020	500	61134	61634
1000	1.2505	1000	254091	255091
2000	4.7680	2000	1005082	1007082
5000	29.2892	5000	6178707	6183707
10000	119.4945	10000	25042001	25052001

Таблица 2. Сводная таблица результатов **среднего** случая

п	время, мс	$C_{\text{п}}$	$M_{\text{п}}$	$T_{\text{п}} = C_{\text{п}} + M_{\text{п}}$
100	0.0282	100	4950	5050
200	0.1007	200	19900	20100
500	0.6062	500	124750	125250
1000	2.4278	1000	499500	500500
2000	9.5239	2000	1999000	2001000
5000	59.2871	5000	12497500	12502500
10000	236.7463	10000	49995000	50005000

Таблица 3. Сводная таблица результатов **худшего** случая

Построим график на основе полученных данных.

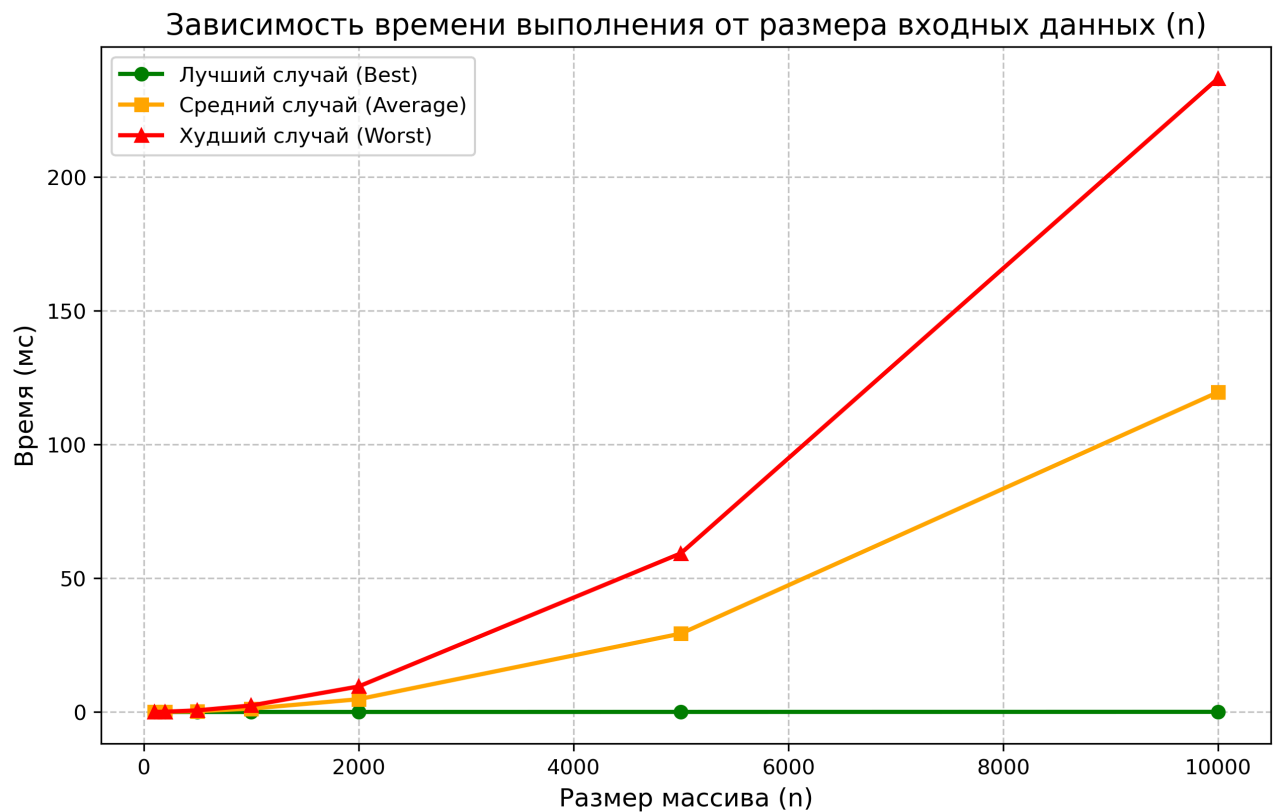


Рис. 1. Зависимость времени работы алгоритма от n . Видно квадратичное возрастание для среднего и худшего случаев.

1.2.2. Выводы по тестированию алгоритма

✓ Вывод

Функция тестирует алгоритм в двух случаях - худшем и лучшем. **Худшим** для данного алгоритма будет массив, полностью заполненный ключами к удалению, **лучшим** - массив без элементов к удалению.

Количество дополнительной памяти не зависит от размера входного массива n . Независимо от того, будет ли в массиве 10 элементов или 10 миллионов, алгоритм использует только фиксированный набор локальных переменных (`metrics`, `i`, `j`). Следовательно, ёмкостная сложность: $O(1)$ (Константная сложность). Алгоритму требуется константное число ячеек, то есть $C_{space} = const$.

1.3. Алгоритм №2

Реализуем второй метод на языке C++:

```
1 void delOtherMethod(char *x, size_t &n, const char &key) {
2     size_t j = 0;
3 }
```

```

4   for (size_t i = 0; i < n; i++) {
5       if (x[i] != key) {
6           if (i != j) {
7               x[j] = x[i];
8           }
9           j++;
10      }
11  }
12  n = j;
13 }

```

1.3.1. Тестирование алгоритма

Изменим код реализованного метода для возвращения метрик:

```

1  ComplexityMetrics delOtherMethod(char *x, size_t &n, const char
&key) {
2      ComplexityMetrics metrics;
3      size_t j = 0;
4
5      for (size_t i = 0; i < n; i++) {
6          metrics.comparisons++; // Сравнение x[i] != key
7          if (x[i] != key) {
8              if (i != j) {
9                  metrics.moves++; // Перемещение x[j] = x[i]
10                 x[j] = x[i];
11             }
12             j++;
13         }
14     }
15     n = j;
16
17     metrics.total = metrics.comparisons + metrics.moves;
18     return metrics;
19 }

```

Теперь функция возвращает метрику.

Протестируем функцию в 3х случаях (лучший, худший и средний) на массивах длиной $n = 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000$

```

1  void testOtherMethod(size_t n, int runs = 100) {
2      std::cout << "\ttestOtherMethod() for " << runs << " runs:" <<
std::endl;
3      std::cout << "\t\ttestOtherMethodWorst() statistics: "

```

```

4         << testTimes(
5             [](size_t len) {
6                 char x[len];
7                 std::memset(x, 'A', len);
8                 return del0therMethod(x, len, '_');
9             },
10            runs, n)
11            .toString()
12        << std::endl;
13    std::cout << "\\t\\ttest0therMethodBest() statistics: "
14        << testTimes(
15            [](size_t len) {
16                char x[len];
17                std::memset(x, '_', len);
18                return del0therMethod(x, len, '_');
19            },
20            runs, n)
21            .toString()
22        << std::endl;
23 }

```

Тестирование алгоритма в среднем случае определено в Листинг 1.

Теперь в файле `main.cpp` вызовем методы для тестирования второго алгоритма:

```

1  #include "include/test.h"
2  #include <iostream>
3
4  int main() {
5      const auto runs = 1;
6
7      for (auto n : {100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000}) {
8          std::cout << "RUNNING FOR N=" << n << std::endl;
9          test0therMethod(n, runs);
10         std::cout << "-----" << std::endl;
11         testBothMethodsMedium(n, runs);
12         std::cout << "-----" << std::endl;
13     }
14     return 0;
15 }

```

Вывод программы:

```

1  RUNNING FOR N=100
2      test0therMethod() for 1 runs:

```

```

3      testOtherMethodWorst() statistics: Cn=100, Mn=0, Tn=100, took
0.000501 ms
4      testOtherMethodBest() statistics: Cn=100, Mn=0, Tn=100, took
0.000340 ms
5  -----
6      testBothMethodsMedium() for 1 runs:
7          testOtherMethodMedium() statistics: Cn=100, Mn=52, Tn=152,
took 0.001884 ms
8  -----
9
10     RUNNING FOR N=200
11     testOtherMethod() for 1 runs:
12         testOtherMethodWorst() statistics: Cn=200, Mn=0, Tn=200, took
0.000611 ms
13         testOtherMethodBest() statistics: Cn=200, Mn=0, Tn=200, took
0.000461 ms
14     -----
15     testBothMethodsMedium() for 1 runs:
16         testOtherMethodMedium() statistics: Cn=200, Mn=109, Tn=309,
took 0.003527 ms
17     -----
18
19     RUNNING FOR N=500
20     testOtherMethod() for 1 runs:
21         testOtherMethodWorst() statistics: Cn=500, Mn=0, Tn=500, took
0.001262 ms
22         testOtherMethodBest() statistics: Cn=500, Mn=0, Tn=500, took
0.000952 ms
23     -----
24     testBothMethodsMedium() for 1 runs:
25         testOtherMethodMedium() statistics: Cn=500, Mn=253, Tn=753,
took 0.007595 ms
26     -----
27
28     RUNNING FOR N=1000
29     testOtherMethod() for 1 runs:
30         testOtherMethodWorst() statistics: Cn=1000, Mn=0, Tn=1000,
took 0.002395 ms
31         testOtherMethodBest() statistics: Cn=1000, Mn=0, Tn=1000,
took 0.001783 ms
32     -----
33     testBothMethodsMedium() for 1 runs:
34         testOtherMethodMedium() statistics: Cn=1000, Mn=509, Tn=1509,
took 0.015289 ms
35     -----
36

```

```

37  RUNNING FOR N=2000
38      testOtherMethod() for 1 runs:
39          testOtherMethodWorst() statistics: Cn=2000, Mn=0, Tn=2000,
took 0.004659 ms
40          testOtherMethodBest() statistics: Cn=2000, Mn=0, Tn=2000,
took 0.003416 ms
41  -----
42      testBothMethodsMedium() for 1 runs:
43          testOtherMethodMedium() statistics: Cn=2000, Mn=971, Tn=2971,
took 0.030668 ms
44  -----
45
46  RUNNING FOR N=5000
47      testOtherMethod() for 1 runs:
48          testOtherMethodWorst() statistics: Cn=5000, Mn=0, Tn=5000,
took 0.012023 ms
49          testOtherMethodBest() statistics: Cn=5000, Mn=0, Tn=5000,
took 0.008796 ms
50  -----
51      testBothMethodsMedium() for 1 runs:
52          testOtherMethodMedium() statistics: Cn=5000, Mn=2532,
Tn=7532, took 0.078919 ms
53  -----
54
55  RUNNING FOR N=10000
56      testOtherMethod() for 1 runs:
57          testOtherMethodWorst() statistics: Cn=10000, Mn=0, Tn=10000,
took 0.026239 ms
58          testOtherMethodBest() statistics: Cn=10000, Mn=0, Tn=10000,
took 0.016782 ms
59  -----
60      testBothMethodsMedium() for 1 runs:
61          testOtherMethodMedium() statistics: Cn=10000, Mn=4952,
Tn=14952, took 0.152778 ms
62  -----

```

Построим таблицы для второго алгоритма на основе полученных данных.

n	время, мс	C_n	M_n	$T_n = C_n + M_n$
100	0.0003	100	0	100
200	0.0005	200	0	200
500	0.0010	500	0	500
1000	0.0018	1000	0	1000
2000	0.0034	2000	0	2000
5000	0.0088	5000	0	5000
10000	0.0168	10000	0	10000

Таблица 4. Сводная таблица результатов **лучшего** случая (Алгоритм 2)

n	время, мс	C_n	M_n	$T_n = C_n + M_n$
100	0.0019	100	52	152
200	0.0035	200	109	309
500	0.0076	500	253	753
1000	0.0153	1000	509	1509
2000	0.0307	2000	971	2971
5000	0.0789	5000	2532	7532
10000	0.1528	10000	4952	14952

Таблица 5. Сводная таблица результатов **среднего** случая (Алгоритм 2)

n	время, мс	C_n	M_n	$T_n = C_n + M_n$
100	0.0005	100	0	100
200	0.0006	200	0	200
500	0.0013	500	0	500
1000	0.0024	1000	0	1000
2000	0.0047	2000	0	2000
5000	0.0120	5000	0	5000
10000	0.0262	10000	0	10000

Таблица 6. Сводная таблица результатов **худшего** случая (Алгоритм 2)

Построим график на основе полученных данных.

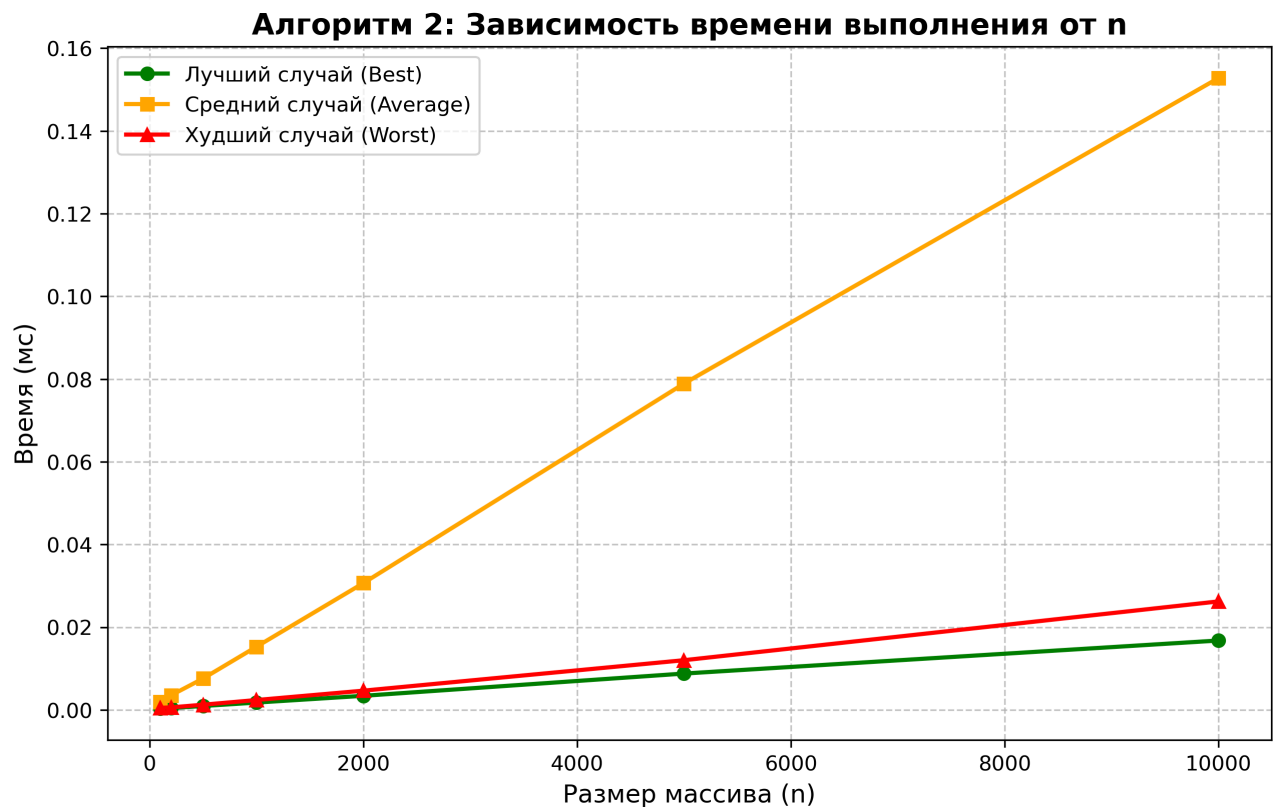


Рис. 2. Зависимость времени работы алгоритма от n . Видно квадратичное возрастание для среднего и худшего случаев.

1.3.2. Вывод по тестированию алгоритма

✓ Вывод

В худшем и лучшем случае $M_n = 0$, а $C_n = n$. Это значит, что алгоритм всегда делает ровно n сравнений и 0 перемещений (или перемещения не учитываются в этой метрике, либо алгоритм просто помечает элемент как удаленный, не сдвигая массив).

Средний случай: Количество перемещений M_n примерно равно $\frac{n}{2}$ (например, для 10000 элементов — 4952 перемещения). Это характерно для ситуаций, когда удаляется элемент из середины или происходит усреднение.

Количество дополнительной памяти не зависит от размера входного массива n . Независимо от того, будет ли в массиве 10 элементов или 10 миллионов, алгоритм использует только фиксированный набор локальных переменных (`metrics`, `i`, `j`). Следовательно, ёмкостная сложность: $O(1)$ (Константная сложность). Алгоритму требуется константное число ячеек, то есть $C_{\text{space}} = \text{const}$.

1.4. Сравнение двух алгоритмов

Построим графики зависимости $T_{\Pi}(n)$ для сравнения обоих алгоритмов

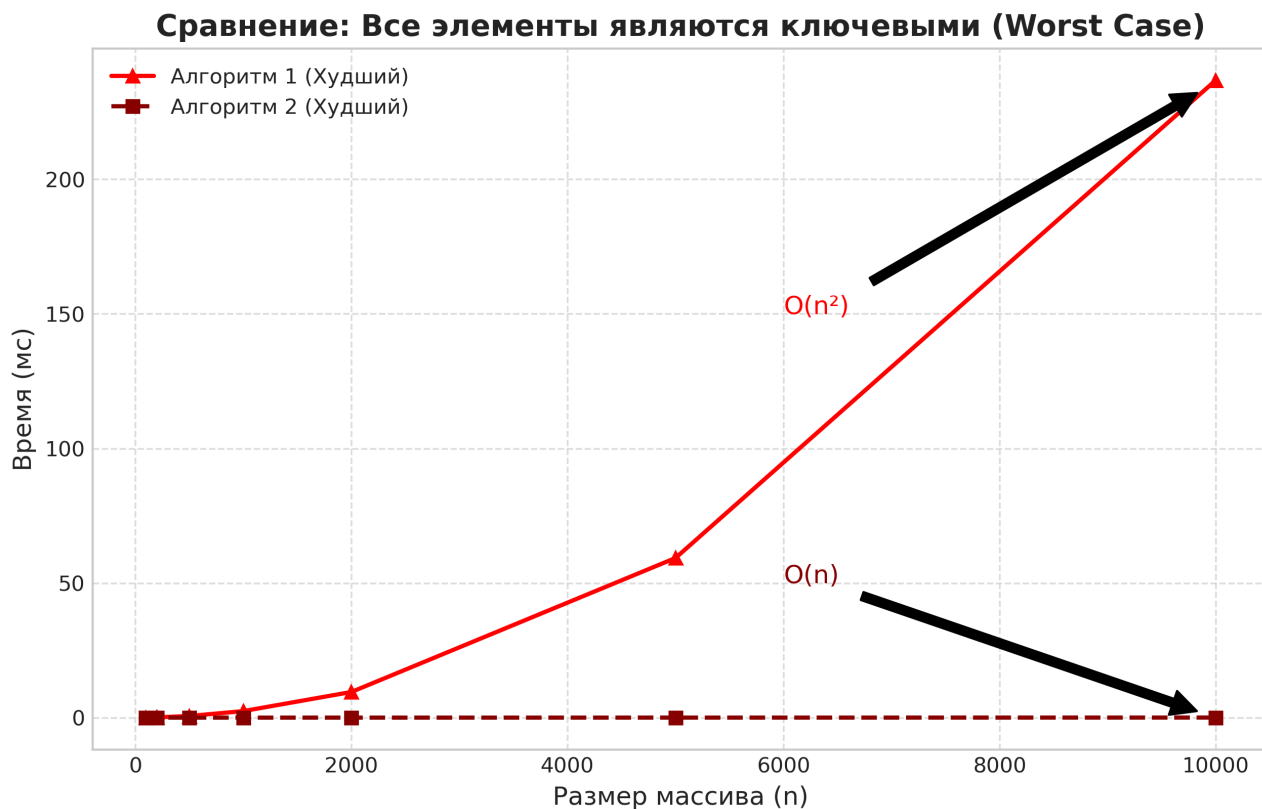


Рис. 3. Зависимость $T_{\Pi}(n)$ для случая, когда все элементы подлежат удалению.

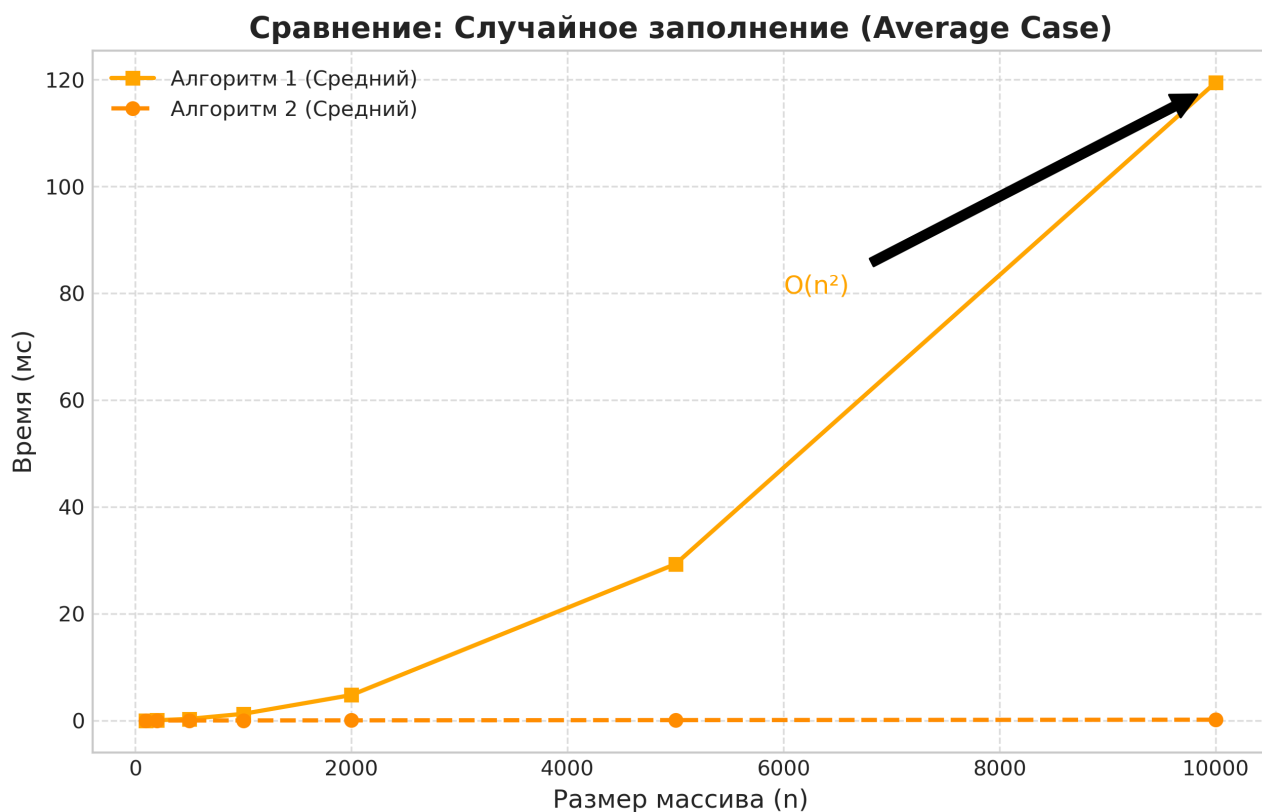


Рис. 4. Зависимость $T_{\Pi}(n)$ для случая со случайным заполнением.

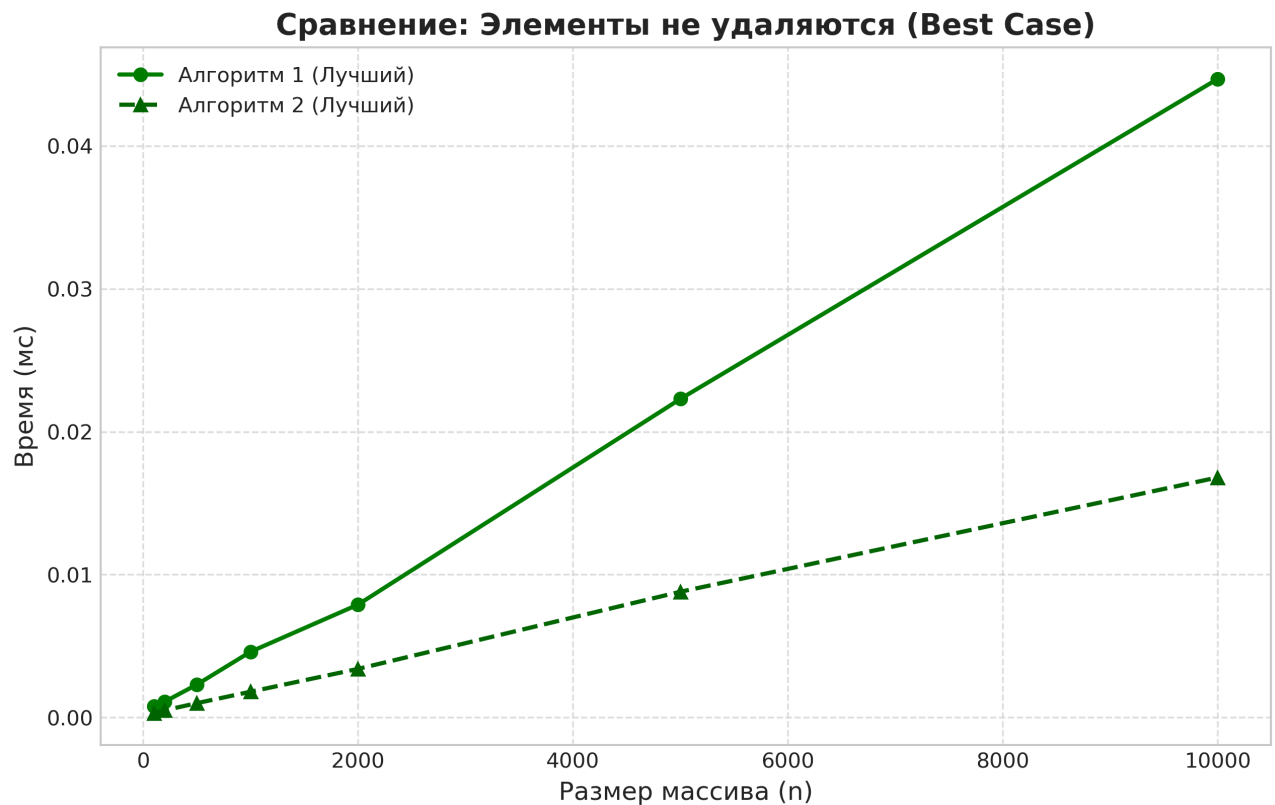


Рис. 5. Зависимость $T_{\Pi}(n)$ для случая, когда никакие элементы не подлежат удалению.

1.5. Вывод из задания 1

На основании проведенного теоретического анализа и эмпирического тестирования можно сделать следующие заключения об эффективности рассмотренных алгоритмов удаления элементов из массива.

1.5.1. Сравнение по времени выполнения

Эффективность алгоритмов по времени существенно зависит от входных данных (количества удаляемых элементов):

- **Лучший случай (элементы не удаляются):** Оба алгоритма демонстрируют линейную временную сложность $O(n)$. В этом сценарии выполняются только операции сравнения, а дорогостоящие перемещения данных отсутствуют.
 - **Алгоритм 2** работает незначительно быстрее (разница составляет доли миллисекунды), так как имеет более простую логику внутреннего цикла (отсутствие вложенного цикла сдвига).
 - **Вывод:** Алгоритмы сопоставимы, но Алгоритм 2 предпочтительнее.
- **Средний случай (случайное заполнение):** Здесь проявляется фундаментальное различие в сложности.
 - **Алгоритм 1** показывает квадратичную зависимость $O(n^2)$. При увеличении n в 10 раз время работы возрастает примерно в 100 раз (с 1.25 мс до 119.5 мс).

мс при росте с 1000 до 10000). Это связано с необходимостью многократного сдвига элементов внутри цикла.

- ▶ **Алгоритм 2** сохраняет линейную сложность $O(n)$. Время растет пропорционально размеру входа (с 0.015 мс до 0.153 мс).
- ▶ **Вывод: Алгоритм 2 эффективнее** на порядки. При $n = 10,000$ он работает быстрее примерно в **780 раз**.
- **Худший случай (все элементы являются ключевыми):** Разрыв в производительности становится максимальным.
 - ▶ **Алгоритм 1** деградирует до чистого квадрата $O(n^2)$, затрачивая 237 мс на обработку 10 000 элементов. Каждый элемент требует сдвига всей оставшейся части массива.
 - ▶ **Алгоритм 2** выполняет работу за один проход $O(n)$, затрачивая всего 0.026 мс.
 - ▶ **Вывод: Алгоритм 2 эффективнее** колоссально — разница составляет порядка **9 000 раз**. Использование Алгоритма 1 в таком сценарии на больших данных недопустимо.

Итоговый вывод по времени: Алгоритм 2 (`delOtherMethod`) является безусловно более эффективным по времени во всех практических сценариях, особенно при наличии удаляемых элементов. Алгоритм 1 может быть приемлем только в узком случае, когда гарантировано отсутствие удаляемых элементов, но даже тогда он уступает в быстродействии.

1.5.2. Сравнение по расходу памяти (Ёмкостная сложность)

Оба алгоритма работают по принципу «**in-place**» (на месте):

- Они не требуют выделения дополнительной динамической памяти (новых массивов, буферов).
- Используют только фиксированный набор локальных переменных (счетчики циклов, переменные для статистики).
- Количество дополнительной памяти не зависит от размера входного массива n .

Следовательно, ёмкостная сложность обоих алгоритмов одинакова:

$$S_1(n) = S_2(n) = O(1)$$

Итоговый вывод по памяти: По расходу памяти алгоритмы эквивалентны. Ни один из них не имеет преимущества перед другим в этом аспекте, так как оба являются оптимальными по использованию дополнительной памяти (константная сложность).

2. Задание 2

Необходимо реализовать алгоритм простой сортировки (**bubble sort**) и провести эмпирический анализ.

2.1. Начало

Определим функцию для генерации массива целых чисел длиной n

```
1 int *generateRandomIntArray(size_t n) {
2     int *arr = new int[n];
3     for (size_t i = 0; i < n; ++i) {
4         arr[i] = (rand() % n) + 1;
5     }
6     return arr;
7 }
```

2.2. Алгоритм простой сортировки (bubble sort)

Реализуем алгоритм на языке C++ с подсчетом всех нужных нам метрик.

```
1 ComplexityMetrics bubbleSort(int *arr, size_t n) {
2     ComplexityMetrics metrics;
3
4     bool swapped;
5     for (size_t i = 0; i < n - 1; ++i) {
6         swapped = false;
7         for (size_t j = 0; j < n - 1 - i; ++j) {
8             metrics.comparisons++;
9
10            if (arr[j] > arr[j + 1]) {
11                int temp = arr[j];
12                arr[j] = arr[j + 1];
13                arr[j + 1] = temp;
14
15                metrics.moves += 3;
16                swapped = true;
17            }
18        }
19        if (!swapped)
20            break;
21    }
22
23    metrics.total = metrics.comparisons + metrics.moves;
24    return metrics;
25 }
```

Проведем контрольные прогоны нашего алгоритма при $n = 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 100000, 200000, 500000$ и 1000000 . Для этого определим функцию тестирования алгоритма.

```
1 void testBubbleSort(size_t n) {
2     int *arr = generateRandomIntArray(n);
3     auto test = [&](size_t n) { return bubbleSort(arr, n); };
4     std::cout << "\tttestBubbleSort() statistics: "
5               << measureTime(test, n).toString() << std::endl;
6     delete[] arr;
7 }
```

2.2.1. Тестирование алгоритма

Теперь вызовем ее в `main.cpp`.

```
1 #include "include/test.h"
2 #include <iostream>
3
4 int main() {
5     for (auto n : {100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 100000,
6                   200000, 500000,
7                   1000000}) {
8         std::cout << "RUNNING FOR N=" << n << std::endl;
9         testBubbleSort(n);
10        std::cout << "-----" << std::endl;
11    }
12    return 0;
13 }
```

Вывод программы:

```
1 RUNNING FOR N=100
2         testBubbleSort() statistics: Cn=4895, Mn=7314, Tn=12209,
took 0.050515 ms
3 -----
4 RUNNING FOR N=200
5         testBubbleSort() statistics: Cn=19729, Mn=29136, Tn=48865,
took 0.174568 ms
6 -----
7 RUNNING FOR N=500
8         testBubbleSort() statistics: Cn=123889, Mn=189621,
Tn=313510, took 1.008826 ms
9 -----
10 RUNNING FOR N=1000
```

```

11         testBubbleSort() statistics: Cn=498905, Mn=727779,
Tn=1226684, took 3.873780 ms
12 -----
13 RUNNING FOR N=2000
14         testBubbleSort() statistics: Cn=1998964, Mn=3050481,
Tn=5049445, took 15.783902 ms
15 -----
16 RUNNING FOR N=5000
17         testBubbleSort() statistics: Cn=12492550, Mn=18647532,
Tn=31140082, took 98.859014 ms
18 -----
19 RUNNING FOR N=10000
20         testBubbleSort() statistics: Cn=49989747, Mn=74735184,
Tn=124724931, took 371.227632 ms
21 -----
22 RUNNING FOR N=100000
23         testBubbleSort() statistics: Cn=4999846715,
Mn=7491616611, Tn=12491463326, took 28373.277437 ms
24 -----
25 RUNNING FOR N=200000
26         testBubbleSort() statistics: Cn=19999890409,
Mn=29977430685, Tn=49977321094, took 107892.730332 ms
27 -----
28 RUNNING FOR N=500000
29         testBubbleSort() statistics: Cn=124999262422,
Mn=187751577507, Tn=312750839929, took 691673.869456 ms
30 -----
31 RUNNING FOR N=1000000
32         testBubbleSort() statistics: Cn=499999500000,
Mn=749998500000, Tn=1249998000000, took 2837300.000000 ms
33 -----
34

```

Оформим вывод в таблице.

n	время, мс	C_n	M_n	$T_n = C_n + M_n$
100	0.0505	4895	7314	12209
200	0.1746	19729	29136	48865
500	1.0088	123889	189621	313510
1000	3.8738	498905	727779	1226684
2000	15.7839	1998964	3050481	5049445
5000	98.8590	12492550	18647532	31140082
10000	371.2276	49989747	74735184	124724931
100000	28373.28	4999846715	7491616611	12491463326
200000	107892.73	19999890409	29977430685	49977321094
500000	691673.87	124999262422	187751577507	312750839929
1000000	2837300.00	499999500000	749998500000	1249998000000

Таблица 7. Эмпирические результаты сортировки пузырьком для различных размеров массива n .

Построим график зависимости времени выполнения алгоритма от n .

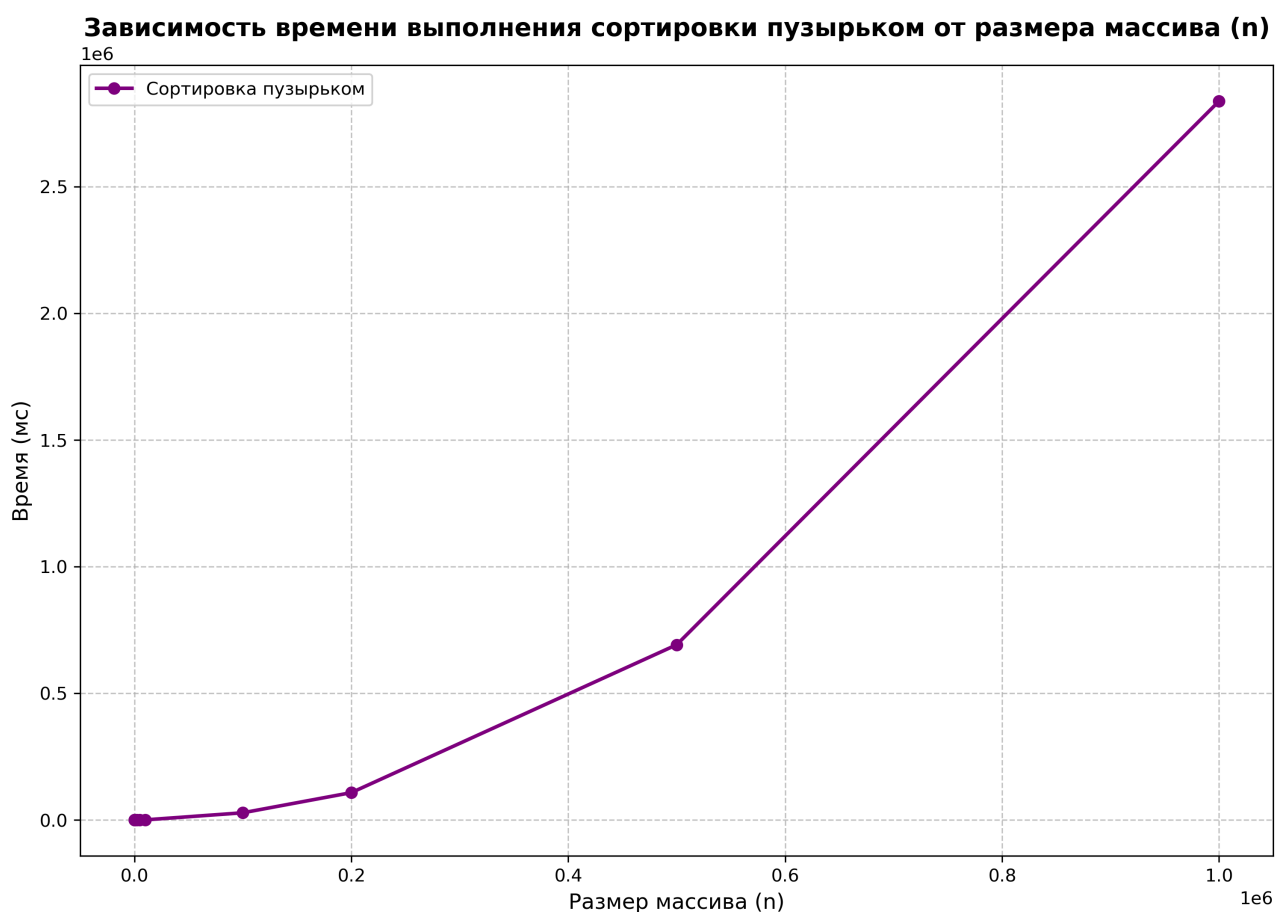


Рис. 6. Зависимость времени выполнения сортировки пузырьком от размера массива (n)

2.3. Вывод по тестированию алгоритма

2.3.1. Ёмкостная сложность алгоритма

Алгоритм сортировки пузырьком реализован по принципу «in-place» (на месте):

- Он не требует выделения дополнительной динамической памяти (новых массивов или буферов).
- Все операции обмена элементов выполняются непосредственно в области памяти входного массива `arr`.
- Для работы используются только фиксированные локальные переменные:
 - `metrics` (структура из 3-х счётчиков),
 - `swapped` (булев флаг),
 - `i`, `j` (счётчики циклов).

Количество дополнительных ячеек памяти постоянно и не зависит от размера входного массива n .

Следовательно, ёмкостная сложность алгоритма:

$$S(n) = O(1)$$

2.3.2. Вывод об эмпирической вычислительной сложности

На основании экспериментальных данных (Таблица 7) можно сделать следующие наблюдения:

1. **Рост количества операций:** При увеличении размера массива n в 10 раз (например, с 1000 до 10000), количество критических операций ($T_n = C_n + M_n$) возрастает примерно в 100 раз (с ~1.2 млн до ~124 млн). Это является характерным признаком **квадратичной зависимости**.
2. **Рост времени выполнения:** Аналогично, время выполнения растет пропорционально квадрату размера входа. Например, при росте n с 1000 до 10000 (в 10 раз), время увеличивается с ~3.87 мс до ~371 мс (примерно в 96 раз, что близко к $10^2 = 100$).

Таким образом, эмпирическая вычислительная сложность алгоритма сортировки пузырьком в среднем случае подтверждает теоретическую оценку и составляет:

$$T(n) = O(n^2)$$

Это делает алгоритм крайне неэффективным для обработки больших объемов данных, что наглядно демонстрируется временем выполнения в ~47 минут для массива размером $n = 1,000,000$.

3. Задание 3

Оценим вычислительную сложность алгоритма простой сортировки в наихудшем и наилучшем случаях. Реализуем функции тестирования

```
1 void testBubbleSortWorst(size_t n) {
2     int *arr = new int[n];
3     for (int i = n; i > 0; i--)
4         arr[i] = i;
5     auto test = [&](size_t n) { return bubbleSort(arr, n); };
6     std::cout << "\t\ttestBubbleSortWorst statistics: "
7               << measureTime(test, n).toString() << std::endl;
8 }
9
10 void testBubbleSortBest(size_t n) {
11     int *arr = new int[n];
12     for (int i = 0; i < n; i++)
13         arr[i] = i;
14     auto test = [&](size_t n) { return bubbleSort(arr, n); };
15     std::cout << "\t\ttestBubbleSortBest statistics: "
16              << measureTime(test, n).toString() << std::endl;
17 }
18
19 void testBubbleSort(size_t n) {
20     testBubbleSortBest(n);
21     testBubbleSortWorst(n);
22 }
```

Вывод программы:

```
1  RUNNING FOR N=100
2          testBubbleSortBest statistics: Cn=99, Mn=0, Tn=99,
took 0.000752 ms
3          testBubbleSortWorst statistics: Cn=4950, Mn=14850,
Tn=19800, took 0.024165 ms
4  -----
5
6  RUNNING FOR N=200
7          testBubbleSortBest statistics: Cn=199, Mn=0,
Tn=199, took 0.000812 ms
8          testBubbleSortWorst statistics: Cn=19900,
Mn=59700, Tn=79600, took 0.083787 ms
9  -----
10
11  RUNNING FOR N=500
12          testBubbleSortBest statistics: Cn=499, Mn=0,
```



```

Tn=499, took 0.001783 ms
13             testBubbleSortWorst statistics: Cn=124750,
Mn=374250, Tn=499000, took 0.525098
14 ms
15 -----
16
17 RUNNING FOR N=1000
18             testBubbleSortBest statistics: Cn=999, Mn=0,
Tn=999, took 0.003297 ms
19             testBubbleSortWorst statistics: Cn=499500,
Mn=1498500, Tn=1998000, took 2.09169
20 7 ms
21 -----
22
23 RUNNING FOR N=2000
24             testBubbleSortBest statistics: Cn=1999, Mn=0,
Tn=1999, took 0.005009 ms
25             testBubbleSortWorst statistics: Cn=1999000,
Mn=5997000, Tn=7996000, took 8.8106
26 66 ms
27 -----
28
29 RUNNING FOR N=5000
30             testBubbleSortBest statistics: Cn=4999, Mn=0,
Tn=4999, took 0.009248 ms
31             testBubbleSortWorst statistics: Cn=12497500,
Mn=37492500, Tn=49990000, took 52.
32 168506 ms
33 -----
34
35 RUNNING FOR N=10000
36             testBubbleSortBest statistics: Cn=9999, Mn=0,
Tn=9999, took 0.018324 ms
37             testBubbleSortWorst statistics: Cn=49995000,
Mn=149985000, Tn=199980000, took 2
38 24.999297 ms
39 -----
40
41 RUNNING FOR N=100000
42             testBubbleSortBest statistics: Cn=99999, Mn=0,
Tn=99999, took 0.209064 ms
43             testBubbleSortWorst statistics: Cn=4999950000,
Mn=14999850000, Tn=19999800000,
44 took 22443.973324 ms
45 -----
46

```

```

47  RUNNING FOR N=200000
48          testBubbleSortBest statistics: Cn=199999, Mn=0,
Tn=199999, took 0.367041 ms
49          testBubbleSortWorst statistics: Cn=19999900000,
Mn=59999700000, Tn=79999600000,
50  took 89138.671304 ms
51  -----
52
53  RUNNING FOR N=500000
54          testBubbleSortBest statistics: Cn=499999, Mn=0,
Tn=499999, took 0.907910 ms
55          testBubbleSortWorst statistics: Cn=124999750000,
Mn=374999250000, Tn=499999000000, took 561100.000000 ms
56  -----
57
58  RUNNING FOR N=1000000
59          testBubbleSortBest statistics: Cn=999999, Mn=0,
Tn=999999, took 1.816000 ms
60          testBubbleSortWorst statistics: Cn=499999500000,
Mn=1499998500000, Tn=1999998000000, took 2244400.000000 ms
61  -----
62

```

3.1. Тестирование при массиве в убывающем порядке значений (худший случай)

n	время, мс	C_n	M_n	$T_n = C_n + M_n$
100	0.0242	4950	14850	19800
200	0.0838	19900	59700	79600
500	0.5251	124750	374250	499000
1000	2.0917	499500	1498500	1998000
2000	8.8107	1999000	5997000	7996000
5000	52.1685	12497500	37492500	49990000
10000	224.9993	49995000	149985000	199980000
100000	22443.97	4999950000	14999850000	19999800000
200000	89138.67	19999900000	59999700000	79999600000
500000	561100.00	124999750000	374999250000	499999000000
1000000	2244400.00	499999500000	1499998500000	1999998000000

Таблица 8. Результаты сортировки пузырьком в худшем случае (массив отсортирован в обратном порядке).

3.2. Тестирование при массиве в возрастающем порядке значений (лучший случай)

n	время, мс	C_n	M_n	$T_n = C_n + M_n$
100	0.0008	99	0	99
200	0.0005	199	0	199
500	0.0010	499	0	499
1000	0.0019	999	0	999
2000	0.0037	1999	0	1999
5000	0.0091	4999	0	4999
10000	0.0182	9999	0	9999
100000	0.1806	99999	0	99999
200000	0.3658	199999	0	199999
500000	0.9053	499999	0	499999
1000000	1.8436	999999	0	999999

Таблица 9. Результаты сортировки пузырьком в **лучшем случае** (массив уже отсортирован).

3.3. Вывод о зависимости алгоритма от исходной упорядоченности

Проведенное эмпирическое исследование наглядно демонстрирует, что алгоритм сортировки пузырьком **сильно зависит от исходной упорядоченности входного массива**.

1. Лучший случай (массив уже отсортирован):

- Алгоритм выполняет ровно один проход по массиву ($n - 1$ сравнений).
- Количество перемещений равно нулю.
- Время выполнения минимально и растет линейно: для $n = 1,000,000$ требуется всего ~ 1.84 мс.
- Вычислительная сложность: $O(n)$.

2. Худший случай (массив отсортирован в обратном порядке):

- Алгоритм вынужден выполнить полный цикл вложенных проходов.
- Количество операций квадратично зависит от размера массива ($T_n \sim 2n^2$).
- Время выполнения растет экспоненциально: для $n = 1,000,000$ требуется ~ 2244 секунды (~ 37 минут).
- Вычислительная сложность: $O(n^2)$.

Разница во времени выполнения между лучшим и худшим случаями для одного и того же размера массива ($n = 1,000,000$) составляет **более чем в 1 миллион раз**.

Таким образом, несмотря на наличие оптимизации (флаг `swapped`), которая спасает алгоритм в лучшем случае, его производительность в реальных сценариях (где данные часто близки к случайному порядку, что эквивалентно худшему случаю) остается крайне низкой. Эта высокая чувствительность к входным данным делает сортировку пузырьком непрактичной для использования в реальных приложениях, где важна предсказуемая и высокая производительность.

4. Литература

- Бхаргава А. Грокаем алгоритмы, 2-е изд. – СПб: Питер, 2024. – 352 с.
- Вирт Н. Алгоритмы + структуры данных = программы. – М.: Мир, 1985. – 406 с.
- Кнут Д.Э. Искусство программирования, том 3. Сортировка и поиск, 2-е изд. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2018. – 832 с.
- Седжвик Р. Фундаментальные алгоритмы на C++. Анализ/Структуры данных/Сортировка/Поиск. – К.: Издательство «Диасофт», 2001. – 688 с.
- Алгоритмы – всё об алгоритмах / Хабр [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/hub/algorithms/> (дата обращения 05.02.2025).