



**Министерство науки и высшего образования Российской  
Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования**  
**«Московский государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана**  
**(национальный исследовательский университет)»**  
**(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

---

**ФАКУЛЬТЕТ «Информатика и системы управления»**

**КАФЕДРА «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»**

**Лабораторная работа №2**  
**по дисциплине "Анализ Алгоритмов"**

**Тема Умножение матриц**

**Студент Рядинский К. В.**

**Группа ИУ7-53Б**

**Преподаватель Волкова Л. Л.**

Москва

2021 г.

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
1 Аналитическая часть . . . . .	4
1.1 Стандартный алгоритм . . . . .	4
1.2 Алгоритм Копперсмита – Винограда . . . . .	4
1.3 Оптимизированный алгоритм Копперсмита – Винограда . . . . .	5
1.4 Вывод . . . . .	5
2 Конструкторская часть . . . . .	6
2.1 Требования к программному обеспечению . . . . .	6
2.2 Разработка алгоритмов . . . . .	6
2.3 Трудоемкость алгоритмов . . . . .	6
2.3.1 Классический алгоритм . . . . .	7
2.3.2 Алгоритм Винограда . . . . .	7
2.4 Оптимизированный алгоритм Винограда . . . . .	8
2.5 Вывод . . . . .	8
3 Технологическая часть . . . . .	12
3.1 Средства реализации . . . . .	12
3.2 Листинги кода . . . . .	12
3.3 Тестирование функций . . . . .	15
3.4 Вывод . . . . .	16
4 Исследовательская часть . . . . .	17
4.1 Технические характеристики . . . . .	17
4.2 Время выполнения алгоритмов . . . . .	17
4.3 Вывод . . . . .	19
Заключение . . . . .	20
Литература . . . . .	21

# Введение

Алгоритм Копперсмита - Винограда — алгоритм умножения квадратных матриц, предложенный в 1987 году Д. Копперсмитом и Ш. Виноградом. В исходной версии асимптотическая сложность алгоритма составляла  $O(n^{2.3755})$ , где  $n$  — размер стороны матрицы. Алгоритм Копперсмита – Винограда, с учетом серии улучшений и доработок в последующие годы, обладает лучшей асимптотикой среди известных алгоритмов умножения матриц.

Алгоритм Штрассена предназначен для быстрого умножения матриц. Он был разработан Фолькером Штрассеном в 1969 году и является обобщением метода умножения Карацубы на матрицы.

В отличие от традиционного алгоритма умножения матриц, алгоритм Штрассена умножает матрицы за время  $\Theta(n^{\log_2 7}) = O(n^{2.81})$

Несмотря на то, что алгоритм Штрассена является асимптотически не самым быстрым из существующих алгоритмов быстрого умножения матриц, он проще программируется и эффективнее при умножении матриц относительно малого размера.

Задачи лабораторной работы:

- рассчитать трудоемкость алгоритмов умножения матриц;
- реализовать классический алгоритм умножения матриц;
- реализовать алгоритм Копперсмита — Винограда;
- реализовать улучшенный Алгоритм Копперсмита – Винограда;
- сравнить их временные характеристики экспериментально;
- на основании проделанной работы сделать выводы.

# 1 Аналитическая часть

В данном разделе будут рассмотрены алгоритмы умножения матриц

## 1.1 Стандартный алгоритм

Пусть даны две прямоугольные матрицы

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{l1} & a_{l2} & \cdots & a_{lm} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Тогда матрица  $C$  размерностью  $l \times n$

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{l1} & c_{l2} & \cdots & c_{ln} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

в которой:

$$c_{ij} = \sum_{r=1}^m a_{ir} b_{rj}, \quad (i = \overline{1, l}; j = \overline{1, n}) \quad (4)$$

будет называться произведением матриц  $A$  и  $B$ . Стандартный алгоритм реализует данную формулу.

## 1.2 Алгоритм Копперсмита – Винограда

В результате умножения двух матриц, каждый элемент в нем представляет собой скалярное произведение соответствующих строки и столбца исходных

матриц. Можно заметить, что такое умножение допускает предварительную обработку, позволяющую часть работы выполнить заранее.

Рассмотрим два вектора  $V = (v_1, v_2, v_3, v_4)$  и  $W = (w_1, w_2, w_3, w_4)$ . Их скалярное произведение равно:  $V \cdot W = v_1w_1 + \dots + v_4w_4$ , что эквивалентно

$$V \cdot W = (v_1 + w_1)(v_2 + w_1) + (v_3 + w_4)(v_4 + w_3) - v_1v_2 - v_3v_4 - w_1w_2 - w_3w_4. \quad (5)$$

Несмотря на то, что второе выражение требует вычисления большего количества операций, чем стандартный алгоритм: вместо четырех умножений - шесть, а вместо трех сложений - десять, выражение в правой части последнего равенства допускает предварительную обработку: его части можно вычислить заранее и запомнить для каждой строки первой матрицы и для каждого столбца второй, то для каждого элемента будет необходимо выполнить лишь первые два умножения и последующие пять сложений, а также дополнительно два сложения. Из-за того, что операция сложения быстрее операции умножения, алгоритм должен работать быстрее стандартного.

## 1.3 Оптимизированный алгоритм Копперсмита – Винограда

В данный алгоритм является оптимизированной версией алгоритма Копперсмита – Винограда. Следующие выражения были оптимизированы:

1. Убраны деления в цикле.
2. Замена выражения  $a = a + \dots$  на  $a+ = \dots$ .
3. Шаг в цикле был увеличен на 2.
4. Добавлен кэш во внутреннем цикле.

## 1.4 Вывод

Были рассмотрены алгоритмы классического умножения матриц и алгоритм Винограда, основное отличие которых — наличие предварительной обработки, а также количество операций умножения.

## 2 Конструкторская часть

В данном разделе будут рассмотрены требования к программному обеспечению, трудоемкость алгоритмов, схемы алгоритмов.

### 2.1 Требования к программному обеспечению

К программе предъявляется ряд требований:

- на вход подаются размеры матриц (натуральные числа) и сами матрицы, которые нужно перемножить;
- на вход подаются только квадратные матрицы;
- на выходе — результаты умножения матриц алгоритмами простого умножения матриц, умножения матриц по Копперсмити–Винограду и улучшенного умножения матриц по Копперсмити–Винограду.

### 2.2 Разработка алгоритмов

На рисунках 1-3 приведены схемы алгоритмов простого умножения матриц, умножения матриц по Копперсмити–Винограду и улучшенного умножения матриц по Копперсмити–Винограду соответственно.

Для алгоритма Винограда худшим случаем являются матрицы с нечётным общим размером, а лучшим - с чётным, так как отпадает необходимость в последнем цикле.

Данный алгоритм можно оптимизировать:

1. Убрать деления в цикле.
2. Замена выражения  $a = a + \dots$  на  $a += \dots$ .
3. Увеличить шаг в цикле до 2.
4. Добавлен кэш во внутреннем цикле тройного цикла.

### 2.3 Трудоемкость алгоритмов

Для последующего вычисления трудоемкости необходимо ввести модель вычислений [1]. Трудоемкость алгоритмов будет вычислена по схемам алгоритмов.

1.  $+$ ,  $-$ ,  $/$ ,  $\%$ ,  $=$ ,  $\neq$ ,  $<$ ,  $>$ ,  $\leq$ ,  $\geq$ ,  $[]$ ,  $*$  — трудоемкость 1.

2. Трудоемкость оператора выбора *if* условие *then A else B* рассчитывается, как:

$$f_{if} = f_{условия} + \begin{cases} f_A & \text{если условие выполняется,} \\ f_B & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

3. Трудоемкость цикла рассчитывается, как:

$$f_{for} = f_{инициализации} + f_{сравнения} + N(f_{тела} + f_{инициализации} + f_{сравнения}). \quad (7)$$

4. Трудоемкость вызова функции равна 0.

### 2.3.1 Классический алгоритм

Трудоемкость классического алгоритма:

$$10MNQ + 4MQ + 4M + 2$$

### 2.3.2 Алгоритм Винограда

Трудоемкость алгоритма Винограда:

$$\text{Первый цикл: } \frac{15}{2} \cdot MN + 5 \cdot M + 2$$

$$\text{Второй цикл: } \frac{15}{2} \cdot MN + 5 \cdot M + 2$$

$$\text{Третий цикл: } 13 \cdot MNQ + 12 \cdot MQ + 4 \cdot M + 2$$

Условный переход:

$$\begin{cases} 2 & \text{,если размер матрицы нечетный} \\ 15 \cdot QM + 4 \cdot M + 2 & \text{,иначе} \end{cases}$$

Итого:

$$\begin{aligned} & \frac{15}{2} \cdot MN + 5M + 2 + \frac{15}{2} \cdot MN + 5M + 2 + 13MNQ + \\ & + 12MQ + 4M + 2 + \begin{cases} 2 & \text{,если размер матрицы нечетный} \\ 15 \cdot MQ + 4M + 2 & \text{,иначе.} \end{cases} \end{aligned}$$

## 2.4 Оптимизированный алгоритм Винограда

Рассмотрим трудоемкость оптимизированного алгоритма Винограда:

Первый цикл:  $\frac{11}{2} \cdot MN + 4M + 2$

Второй цикл:  $\frac{11}{2} \cdot MN + 4M + 2$

Третий цикл:  $\frac{15}{2} \cdot MNQ + 9MQ + 4M + 2$

Условный переход:  $\begin{cases} 1 & , \text{ если размер матрицы нечетный} \\ 10MQ + 4M + 2 & , \text{ иначе.} \end{cases}$

Итого:  $\frac{11}{2} \cdot MN + 4M + 2 + \frac{11}{2}MN + 4M + 2 + \frac{15}{2}MNQ + 9MQ + 4M + 2 +$   
 $\begin{cases} 1 & , \text{ если размер матрицы нечетный} \\ 10MQ + 4M + 2 & , \text{ иначе.} \end{cases}$

## 2.5 Вывод

На основе теоретических данных, полученных из аналитического раздела, были построены схемы требуемых алгоритмов и проведена теоретическая оценка трудоемкости.



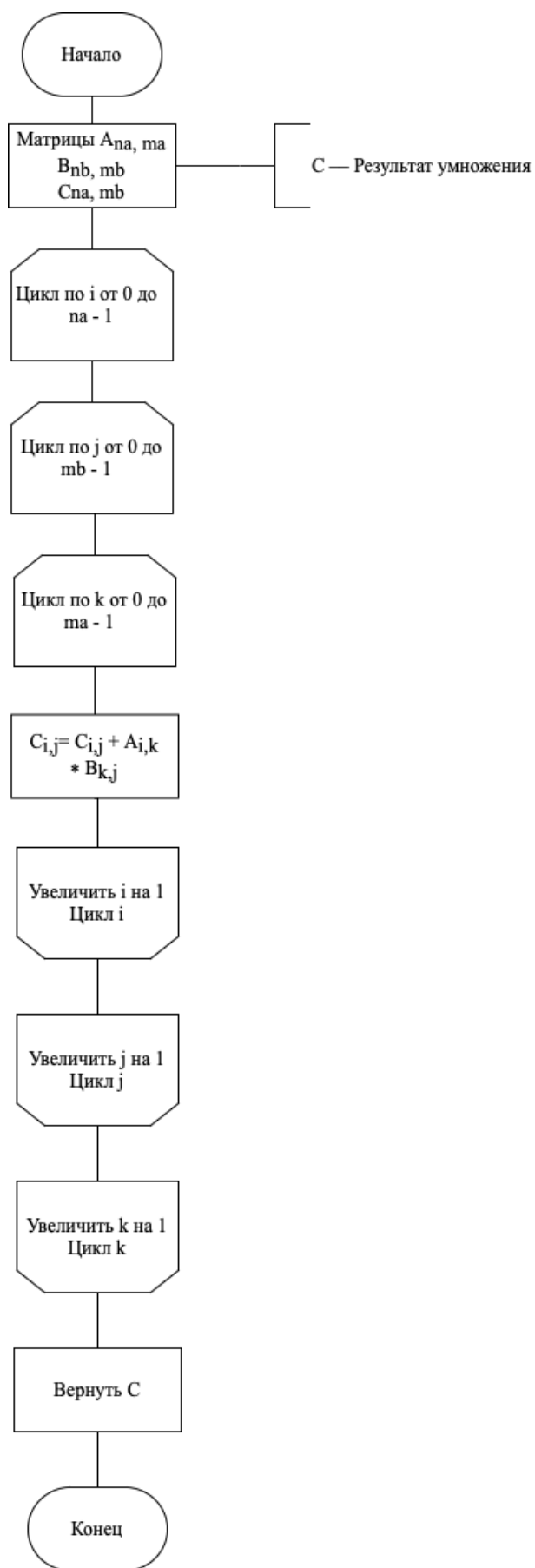


Рис. 1 — Схема алгоритма простого умножения матриц

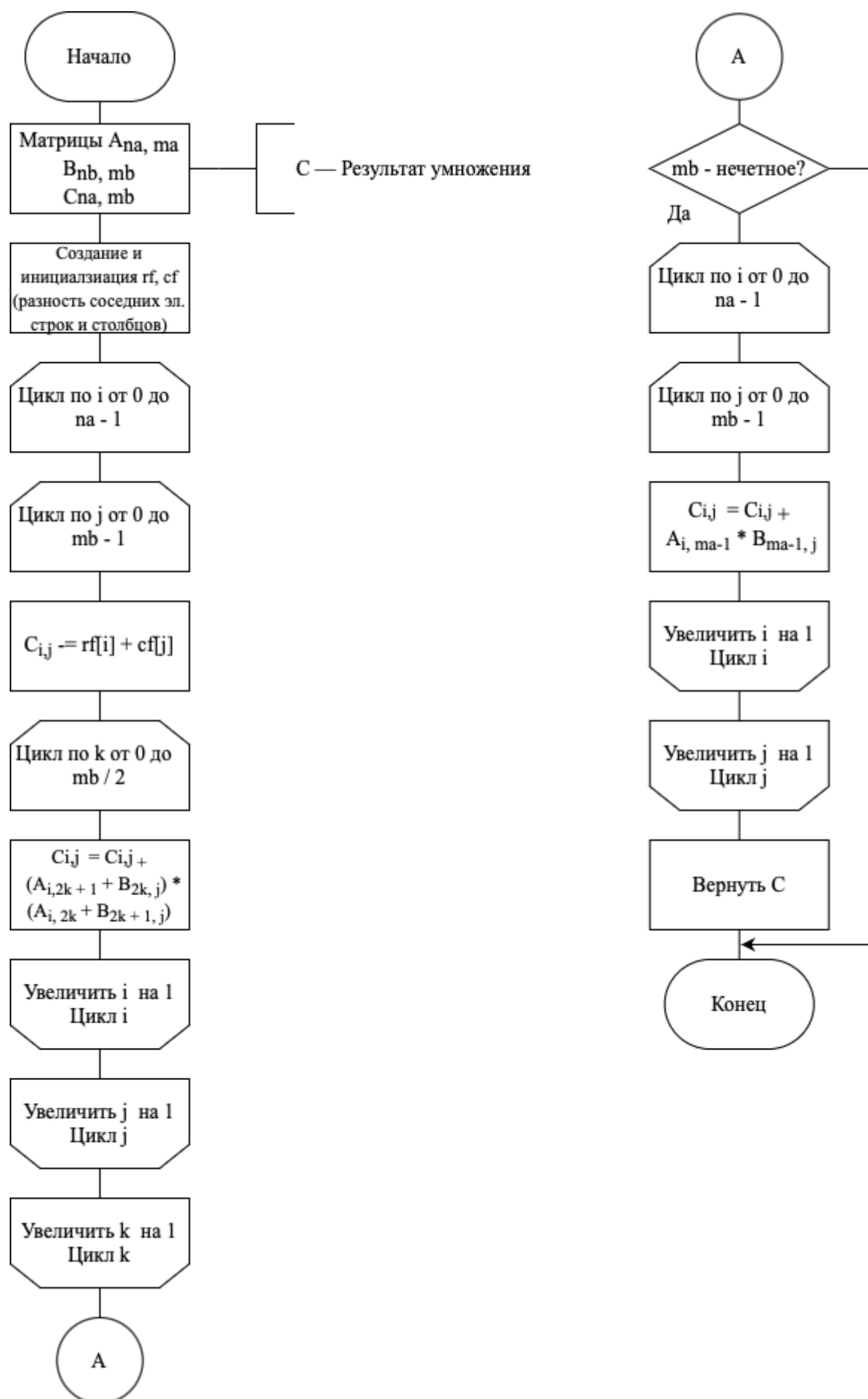


Рис. 2 — Схема алгоритма Винограда умножения матриц

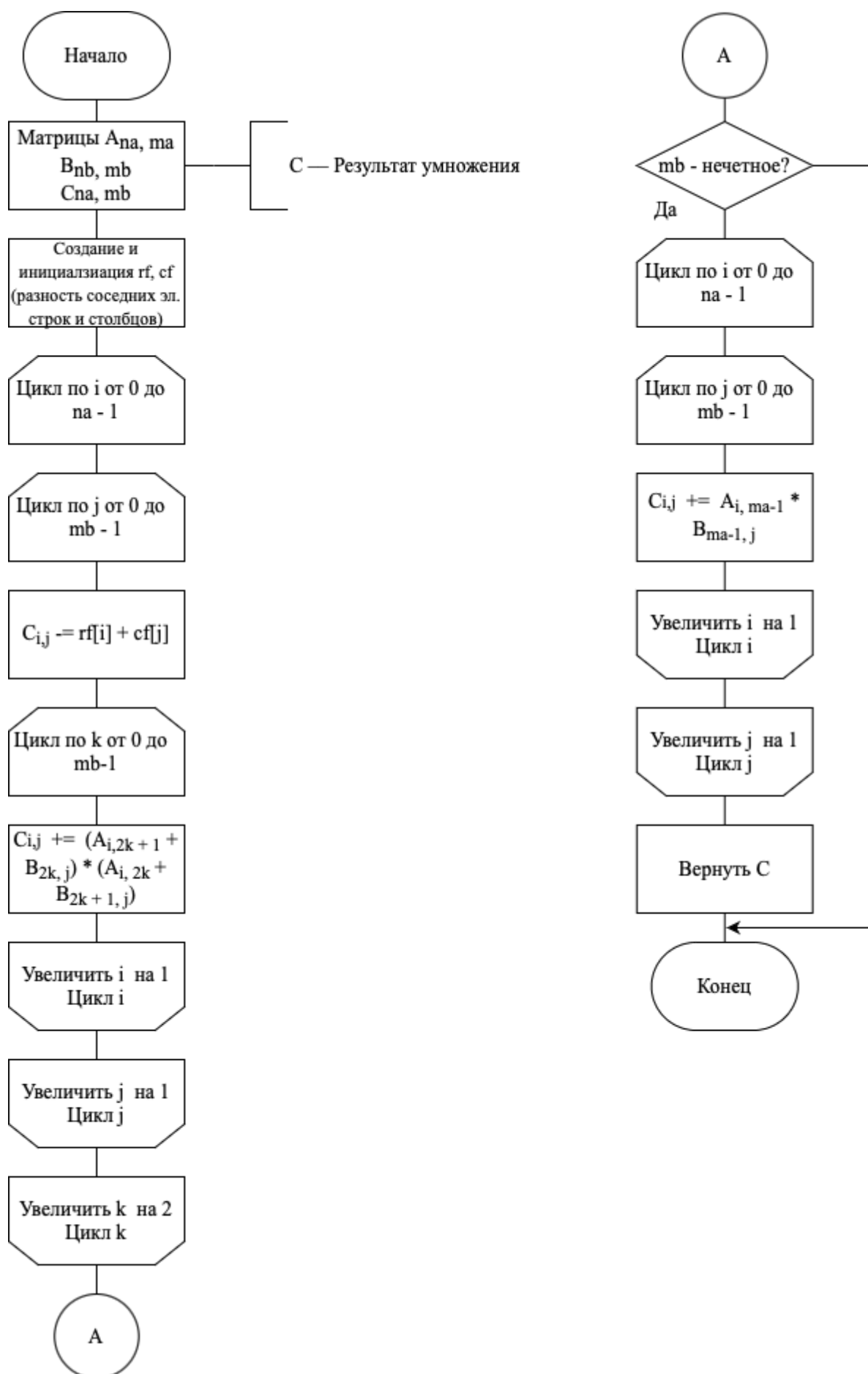


Рис. 3 — Схема оптимизированного алгоритма Винограда умножения матриц

## 3 Технологическая часть

В данном разделе приведены средства реализации и листинги кода.

### 3.1 Средства реализации

Для реализации программ был выбран язык программирования Rust [2], так как этот язык предоставляет как низкоуровневые интерфейсы, так и высокоуровневые, этот язык безопасен при работе с памятью. Также данный язык был выбран потому, что в нем присутствует инструментарий для замера процессорного времени и тестирования.

### 3.2 Листинги кода

Листинг 1: Алгоритм простого умножения матриц

```
1 pub fn default_mult(m1 : & Matrix<T>, m2 : & Matrix<T>) ->
  Result<Matrix<T>, &'static str> {
2     if m1.col != m2.rows {
3         return Err("The number of columns must be equal to
  number of rows");
4     }
5     let mut out = Matrix::new_zero(m1.rows, m2.col);
6     for i in 0..m1.rows {
7         for j in 0..m2.col {
8             for k in 0..m1.col {
9                 out[[i, j]] += m1[[i, k]] * m2[[k, j]];
10            }
11        }
12    }
13    Ok(out)
14 }
```

Листинг 2: Алгоритм умножения матриц Винограда

```
1 pub fn vinograd_mult(m1 : & Matrix<T>, m2 : & Matrix<T>) ->
  Result<Matrix<T>, &'static str> {
2     if m1.rows != m1.col || m2.col != m2.rows || m1.col != m2
  .col {
```

```

3      return Err("Matrices must be square and have equal
size");
4  }
5
6  let mut out : Matrix<T> = Matrix::new_zero(m1.rows, m2.
col);
7
8  let mut row_factor : Vec<T> = vec![Default::default(); m1
.rows];
9  let mut col_factor : Vec<T> = vec![Default::default(); m2
.col];
10
11  for i in 0..m1.rows {
12      for j in 0..m1.col / 2 {
13          row_factor[i] += m1[[i, j * 2]] * m1[[i, j * 2 +
1]]
14      }
15  }
16
17  for i in 0..m2.col {
18      for j in 0..m2.rows / 2 {
19          col_factor[i] += m2[[j * 2, i]] * m2[[j * 2 + 1,
i]]
20      }
21  }
22
23  for i in 0..m1.rows {
24      for j in 0..m2.col {
25          out[[i, j]] -= row_factor[i] + col_factor[j];
26
27          for k in 0..m1.col / 2 {
28              out[[i, j]] += (m1[[i, 2 * k + 1]] + m2[[2 *
k, j]]) * (m1[[i, 2 * k]] + m2[[2 * k + 1, j]]);
29          }
30      }
31  }
32
33  if m1.col % 2 > 0{
34      for i in 0..m1.rows {
35          for j in 0..m2.col {

```

```

36         out[[i, j]] += m1[[i, m1.col - 1]] * m2[[m1.
    col - 1, j]];
37     }
38 }
39 }
40
41 Ok(out)
42 }

```

### Листинг 3: Оптимизированный алгоритм умножения матриц Винограда

```

1 pub fn vinograd_opt_mult(m1 : & Matrix<T>, m2 : & Matrix<T>)
  -> Result<Matrix<T>, &'static str> {
2     if m1.rows != m1.col || m2.col != m2.rows || m1.col != m2
    .col {
3         return Err("Matrices must be square and have equal
    size");
4     }
5
6     let mut out : Matrix<T> = Matrix::new_zero(m1.rows, m2.
    col);
7
8     let mut row_factor : Vec<T> = vec![Default::default(); m1
    .rows];
9     let mut col_factor : Vec<T> = vec![Default::default(); m2
    .col];
10
11     let m1_col_mod = m1.col % 2;
12     let m2_row_mod = m2.rows % 2;
13
14     for i in 0..m1.rows {
15         for j in (0..m1.col - m1_col_mod).step_by(2) {
16             row_factor[i] += m1[[i, j]] * m1[[i, j + 1]]
17         }
18     }
19
20     for i in 0..m2.col {
21         for j in (0..m2.rows - m2_row_mod).step_by(2) {
22             col_factor[i] += m2[[j, i]] * m2[[j + 1, i]]
23         }
24     }

```

```

25
26     for i in 0..m1.rows {
27         for j in 0..m2.col {
28             let mut buf : T = -(row_factor[i] + col_factor[j
29         ]);
30
31             for k in (0..m1.col - m1_col_mod).step_by(2) {
32                 buf += (m1[[i, k + 1]] + m2[[k, j]]) * (m1[[i
33                 , k]] + m2[[k + 1, j]]);
34             }
35             out[[i, j]] = buf;
36         }
37
38         if m1.col % 2 > 0 {
39             let m1c = m1.col - 1;
40             for i in 0..m1.rows {
41                 for j in 0..m2.col {
42                     out[[i, j]] += m1[[i, m1c]] * m2[[m1c, j]];
43                 }
44             }
45         }
46
47         Ok(out)
48 }

```

### 3.3 Тестирование функций

В таблице 1 приведены модульные тесты для функций умножения матриц выше перечисленными методами. Все тесты были пройдены успешно.

Таблица 1 — Тестирование функций умножения матриц

Матрица 1	Матрица 2	Ожидаемый результат
$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 30 & 36 & 42 \\ 66 & 81 & 96 \\ 102 & 126 & 150 \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 9 & 12 \\ 24 & 33 \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} 8 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 32 \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} 1 & 2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3 & 4 \end{pmatrix}$	Умножение невозможно

### 3.4 Вывод

Были разработаны и протестированы реализации алгоритмов: простой алгоритм умножения матриц, алгоритм умножения матриц по Копперсмитту – Винограду и улучшенный алгоритм умножения матриц по Копперсмитту – Винограду.



## 4 Исследовательская часть

В данном разделе будут рассмотрены технические характеристики машины, замер времени выполнения алгоритмов.

### 4.1 Технические характеристики

Технические характеристики электронно-вычислительной машины, на которой выполнялось тестирование:

- операционная система: macOS BigSur версия 11.4;
- оперативная память: 8 гигабайт LPDDR4 [3];
- процессор: Apple M1.

Тестирование проводилось на ноутбуке, включенном в сеть электропитания. Во время тестирования ноутбук был нагружен только встроенными приложениями окружения рабочего стола, окружением рабочего стола, а также непосредственно системой тестирования.

### 4.2 Время выполнения алгоритмов

Был проведен замер времени работы каждого из алгоритмов с помощью библиотеки Criterion [4]. Эта библиотека замеряет процессорное время выполнения функции и усредняет его (проводится не менее 100 замеров). В таблицах 2, 3 содержатся результаты исследований при четном и нечетном размерах матриц.

На рисунках 4, 5 демонстрируется зависимость времени выполнения конкретных реализаций алгоритмов умножения матриц от размера стороны квадратной матрицы.

Таблица 2 — Время выполнения реализаций алгоритмов (в секундах) при четном размере матрицы

Размер	К	В	ОВ
100	0.0738	0.0591	0.0540
200	0.589	0.482	0.422
400	4,749	3,8028	3,3414
800	38,577	30,073	26,665

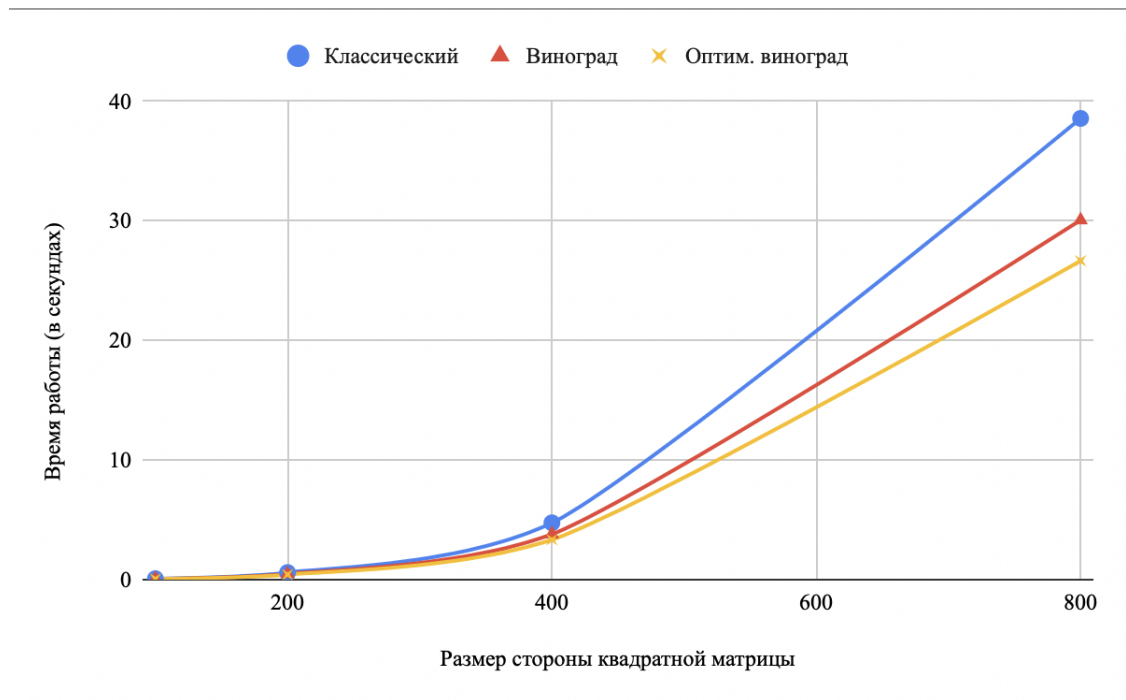


Рис. 4 — Зависимость времени выполнения алгоритмов от четного размера стороны квадратной матрицы

Таблица 3 — Время выполнения реализаций алгоритмов (в секундах) при нечетном размере матрицы

Размер	К	В	ОВ
101	0.0741E	0.0616	0.0551
201	0.590	0.475	0.429
401	4,7312	3,7858	3,3499
801	38,591	30,11	26,655

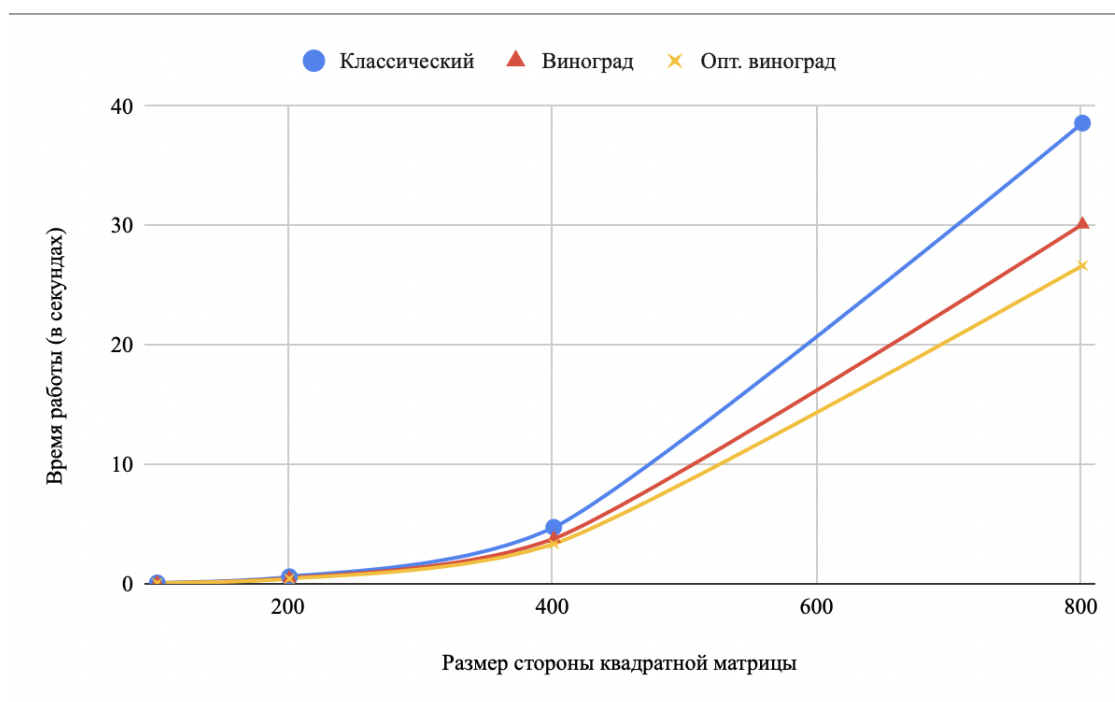


Рис. 5 — Зависимость времени выполнения алгоритмов от нечетного размера стороны квадратной матрицы

## 4.3 Вывод

Время работы реализации алгоритма Копперсмита–Винограда быстрее классического алгоритма умножения матриц примерно на 25-30% быстрее. В то же время оптимизированный алгоритм Копперсмита–Винограда быстрее оригинального на 10-15%. Таким образом на матрицах значительного размера (больше 200) следует использовать алгоритм Копперсмита–Винограда, так как он значительно быстрее (таблица 2).

Не смотря на то, что в аналитической части сложность алгоритма Винограда и оптимизированного Винограда больше, эти алгоритмы работают быстрее, так как в алгоритмах Винограда и оптимизированного Винограда используются выражения, которые предварительно обрабатываются, и это позволяет уменьшить количество умножений, но количество сложений увеличивается, но так как на реальных машинах операция сложения работает быстрее, то и сам алгоритм обрабатывает быстрее стандартного.

## Заключение

В ходе выполнения работы была достигнута цель, выполнены все поставленные задачи:

- рассчитать трудоемкость алгоритмов умножения матриц;
- реализовать классический алгоритм умножения матриц;
- реализовать алгоритм Копперсмита — Винограда;
- реализовать улучшенный Алгоритм Копперсмита — Винограда;
- сравнить их временные характеристики экспериментально;
- на основании проделанной работы сделать выводы.

Экспериментально были установлены различия в производительности различных алгоритмов умножения матриц. Оптимизированный алгоритм Копперсмита–Винограда имеет меньшую сложность, нежели оригинальный алгоритм умножения матриц Винограда. Так при размерах матриц  $800 \times 800$  классический алгоритм отстает от алгоритма Копперсмита-Винограда на 45%.

## Литература

1. Ульянов М. В. Ресурсно-эффективные компьютерные алгоритмы. Разработка и Анализ. - Наука Физматлит, 2007. - 376.
2. Блэнди Дж., Орендорф Дж. Программирование на языке Rust = Programming Rust. — ДМК Пресс, 2018. — 550 с. — ISBN 978-5-97060-236-2.
3. LPDDR4 [Электронный ресурс] <https://ru.wikipedia.org/wiki/LPDDR#LPDDR4> (дата обращения: 14 октября 2021 г.)
4. Criterion.rs - Statistics-driven benchmarking library for Rust [Электронный ресурс] <https://github.com/bheisler/criterion.rs> (дата обращения: 14 октября 2021 г.)