



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА  
Факультет Вычислительной Математики и Кибернетики

Вохмин Максим Эдуардович

608 группа

**Отчет** на тему:

«Приближенное решение задачи Дирихле для уравнения Пуассона в  
криволинейной области»

Вариант 2

Москва – 2024

## Оглавление

Введение .....	3
Математическая постановка задачи.....	3
Метод фиктивных областей.....	3
Разностная схема решения задачи .....	4
Метод решения системы линейных алгебраических уравнений.....	6
Задание практикума .....	6
Краткое описание проделанной работы .....	7
График ошибки по итерациям для сетки (160, 180).....	8
Графики ошибки по области для сетки (160, 180) .....	9
Графики ускорения для сеток (80, 90) и (160, 180) .....	20

## Введение

Требуется приближенно решить двумерную задачу Дирихле для уравнения Пуассона в криволинейной области. Задание необходимо выполнить на ПВС Московского университета IBM Polus.

## Математическая постановка задачи

В области  $D \subset \mathbb{R}^2$ , ограниченной контуром  $\gamma$ , рассматривается дифференциальное уравнение Пуассона

$$-\Delta u = f(x, y), \quad (1)$$

в котором оператор Лапласа

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2},$$

функция  $f(x, y)$  считается известной. Для выделения единственного решения уравнение дополняется граничными условием Дирихле (см. [1]):

$$u(x, y) = 0, \quad (x, y) \in \gamma. \quad (2)$$

Требуется найти функцию  $u(x, y)$ , удовлетворяющую уравнению (1) в области  $D$  и краевому условию (2) на ее границе.

## Метод фиктивных областей

Для приближенного решения задачи (1), (2) предлагается воспользоваться методом фиктивных областей [2].

Пусть область  $D$  принадлежит прямоугольнику  $\Pi = \{(x, y) : A_1 < x < B_1, A_2 < y < B_2\}$ . Обозначим через  $\overline{D}$ ,  $\overline{\Pi}$  замыкание области  $D$  и прямоугольника  $\Pi$  соответственно, через  $\Gamma$  – границу прямоугольника. Разность множеств

$$\hat{D} = \Pi \setminus \overline{D}$$

называется фиктивной областью. Выберем и зафиксируем малое  $\varepsilon > 0$ .

В прямоугольнике  $\Pi$  рассматривается задача Дирихле

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial x} \left( k(x, y) \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k(x, y) \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= F(x, y), \\ v(x, y) &= 0, \quad (x, y) \in \Gamma \end{aligned} \quad (3)$$

с кусочно-постоянным коэффициентом

$$k(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in D, \\ 1/\varepsilon, & (x, y) \in \hat{D} \end{cases} \quad (4)$$

и правой частью

$$F(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & (x, y) \in D, \\ 0, & (x, y) \in \hat{D}. \end{cases} \quad (5)$$

Требуется найти непрерывную в  $\overline{\Pi}$  функцию  $v(x, y)$ , удовлетворяющую дифференциальному уравнению задачи (3) всюду в  $\Pi \setminus \gamma$ , равную нулю на границе  $\Gamma$  прямоугольника, и такую, чтобы вектор потока

$$W(x, y) = -k(x, y) \left( \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

имел непрерывную нормальную компоненту на общей части криволинейной границы области  $D$  и прямоугольника  $\Pi$ . Последнее означает, что в каждой точке  $(x_0, y_0) \in \gamma \cap \Pi$  должно выполняться равенство

$$\lim_{\substack{(x,y) \rightarrow (x_0,y_0), \\ (x,y) \in D}} (W(x,y), n(x_0, y_0)) = \lim_{\substack{(x,y) \rightarrow (x_0,y_0), \\ (x,y) \in \hat{D}}} (W(x,y), n(x_0, y_0)), \quad (6)$$

где  $n(x, y)$  – вектор единичной нормали к границе  $\gamma$  в точке  $(x, y)$ , определенный всюду или почти всюду на кривой.

Известно [2], что функция  $v(x, y)$  равномерно приближает решение  $u(x, y)$  задачи (1), (2) в области  $D$ , а именно,

$$\max_{P \in \bar{D}} |v(x, y) - u(x, y)| < C\varepsilon, \quad C > 0. \quad (7)$$

В частности,  $|v(x, y)| < C\varepsilon$  во всех точках кривой  $\gamma$ . Этот результат позволяет получить искомую функцию  $u(x, y)$  с любой наперед заданной точностью  $\varepsilon > 0$ , решая задачу (3), (6) вместо задачи (1), (2). Тем самым, задача Дирихле в криволинейной области приближенно заменяется задачей Дирихле в прямоугольнике с кусочно-постоянным коэффициентом  $k(x, y)$ .

## Разностная схема решения задачи

Краевые задачу (3), (6) предлагается решать численно методом конечных разностей [3]. В замыкании прямоугольника  $\bar{\Pi}$  определяется равномерная прямоугольная сетка  $\bar{\omega}_h = \bar{\omega}_1 \times \bar{\omega}_2$ , где

$$\bar{\omega}_1 = \{x_i = A_1 + ih_1, \quad i = \overline{0, M}\}, \quad \bar{\omega}_2 = \{y_j = A_2 + jh_2, \quad j = \overline{0, N}\}.$$

Здесь  $h_1 = (B_1 - A_1)/M$ ,  $h_2 = (B_2 - A_2)/N$ . Через  $\omega_h$  обозначим множество внутренних узлов сетки  $\bar{\omega}_h$ , т.е. множество узлов сетки прямоугольника, не лежащих на границе  $\Gamma$ .

Рассмотрим линейное пространство  $H$  функций, заданных на сетке  $\omega_h$ . Обозначим через  $w_{ij}$  значение сеточной функции  $w \in H$  в узле сетки  $(x_i, y_j) \in \omega_h$ . Будем считать, что в пространстве  $H$  задано скалярное произведение и евклидова норма

$$(u, v) = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} h_1 h_2 u_{ij} v_{ij}, \quad \|u\|_E = \sqrt{(u, u)}. \quad (8)$$

В методе конечных разностей дифференциальная задача математической физики заменяется конечно-разностной операторной задачей вида

$$Aw = B, \quad (9)$$

где  $A : H \rightarrow H$  – оператор, действующий в пространстве сеточных функций,  $B \in H$  – известная правая часть. Задача (9) называется разностной схемой. Решение этой задачи считается численным решением исходной дифференциальной задачи.

При построении разностной схемы следует аппроксимировать (приблизительно заменить) все уравнения краевой задачи их разностными аналогами – сеточными уравнениями, связывающими значения искомой сеточной функции в узлах сетки. Полученные таким образом уравнения должны быть функционально независимыми, а их общее количество – совпадать с числом неизвестных, т.е. с количеством узлов сетки.

Дифференциальное уравнение задачи (3) во всех внутренних точках сетки аппроксимируется разностным уравнением

$$-\frac{1}{h_1} \left( a_{i+1j} \frac{w_{i+1j} - w_{ij}}{h_1} - a_{ij} \frac{w_{ij} - w_{i-1j}}{h_1} \right) - \frac{1}{h_2} \left( b_{ij+1} \frac{w_{ij+1} - w_{ij}}{h_2} - b_{ij} \frac{w_{ij} - w_{ij-1}}{h_2} \right) = F_{ij},$$

$$i = \overline{1, M-1}, \quad j = \overline{1, N-1}, \quad (10)$$

в котором коэффициенты

$$a_{ij} = \frac{1}{h_2} \int_{y_{j-1/2}}^{y_{j+1/2}} k(x_{i-1/2}, t) dt, \quad b_{ij} = \frac{1}{h_1} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} k(t, y_{j-1/2}) dt \quad (11)$$

при всех  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ . Здесь полуцелые узлы

$$x_{i\pm 1/2} = x_i \pm 0.5h_1, \quad y_{j\pm 1/2} = y_j \pm 0.5h_2.$$

Правая часть разностного уравнения

$$F_{ij} = \frac{1}{h_1 h_2} \iint_{\Pi_{ij}} F(x, y) dx dy, \quad \Pi_{ij} = \{(x, y) : x_{i-1/2} \leq x \leq x_{i+1/2}, y_{j-1/2} \leq y \leq y_{j+1/2}\} \quad (12)$$

при всех  $i = \overline{1, M-1}$ ,  $j = \overline{1, N-1}$ .

Введем обозначения правой и левой разностных производных по переменным  $x$ ,  $y$  соответственно:

$$\begin{aligned} w_{x,ij} &= \frac{w_{i+1,j} - w_{ij}}{h_1}, & w_{\bar{x},ij} &= w_{x,i-1,j} = \frac{w_{ij} - w_{i-1,j}}{h_1}, \\ w_{y,ij} &= \frac{w_{ij+1} - w_{ij}}{h_2}, & w_{\bar{y},ij} &= w_{y,i,j-1} = \frac{w_{ij} - w_{i,j-1}}{h_2}. \end{aligned}$$

С учетом принятых обозначений разностное уравнение (10) можно представить в более компактном и удобном виде:

$$-(aw_{\bar{x}})_{x,ij} - (bw_{\bar{y}})_{y,ij} = F_{ij}, \quad i = \overline{1, M-1}, \quad j = \overline{1, N-1} \quad (13)$$

Краевые условия Дирихле задачи (3), (6) аппроксимируются точно равенством

$$w_{ij} = w(x_i, y_j) = 0, \quad (x_i, y_j) \in \Gamma. \quad (14)$$

Переменные  $w_{ij}$ , заданные равенством (14), исключаются из системы уравнений (13). В результате остаются неизвестными значения  $w_{ij}$  при  $i = \overline{1, M-1}$ ,  $j = \overline{1, N-1}$  и их количество совпадает с числом уравнений. Система является линейной относительно неизвестных величин и может быть представлена в виде (9) с самосопряженным и положительно определенным оператором

$$Aw = -(aw_{\bar{x}})_x - (bw_{\bar{y}})_y$$

и правой частью  $F$ , определенной равенством (12). Таким образом, построенная разностная схема (13), (14) линейна и имеет единственное решение при любой правой части (см. [5]).

**Замечание.** Интегралы (11) от кусочно-постоянной функции  $k(x, y)$  следует вычислять аналитически. Нетрудно видеть, что если отрезок, соединяющий точки  $P_{ij} = (x_{i-1/2}, y_{j-1/2})$  и  $P_{ij+1} = (x_{i-1/2}, y_{j+1/2})$ , целиком расположен в области  $D$ , то  $a_{ij} = 1$ . Если же указанный отрезок находится в фиктивной области  $\hat{D}$ , то  $a_{ij} = 1/\varepsilon$ . В противном случае

$$a_{ij} = h_2^{-1} l_{ij} + (1 - h_2^{-1} l_{ij})/\varepsilon,$$

где  $l_{ij}$  — длина той части отрезка  $[P_{ij}, P_{ij+1}]$ , которая принадлежит области  $D$ . Аналогичным образом вычисляются коэффициенты  $b_{ij}$ .

Очевидно, правая часть схемы  $F_{ij}$  равна нулю при всех  $(i, j) : \Pi_{ij} \subset \hat{D}$ . Если  $\Pi_{ij} \subset D$ , то правую часть предлагается приближенно заменить значением  $f(x_i, y_j)$ . В противном случае, когда прямоугольник  $\Pi_{ij}$  содержит точки оригинальной области  $D$  и фиктивной области  $\hat{D}$ , величина  $F_{ij}$  может быть вычислена приближенно как произведение

$$(h_1 h_2)^{-1} S_{ij} f(x_i^*, y_j^*),$$

где  $(x_i^*, y_j^*)$  — любая точка пересечения  $\Pi_{ij} \cap D$ ,  $S_{ij} = \text{mes}(\Pi_{ij} \cap D)$  — площадь пересечения областей, при вычислении которой криволинейную часть границы можно заменить отрезком прямой.

# Метод решения системы линейных алгебраических уравнений

Приближенное решение разностной схемы (10), (14) может быть получено итерационным методом скорейшего спуска [4]. Этот метод позволяет получить последовательность сеточных функций  $w^{(k)} \in H$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , сходящуюся по норме пространства  $H$  к решению разностной схемы, т.е.

$$\|w - w^{(k)}\|_E \rightarrow 0, \quad k \rightarrow +\infty.$$

Начальное приближение  $w^{(0)}$  можно выбрать любым способом, например, равным нулю во всех точках расчетной сетки.

Метод является одношаговым. Итерация  $w^{(k+1)}$  вычисляется по итерации  $w^{(k)}$  согласно равенствам:

$$w_{ij}^{(k+1)} = w_{ij}^{(k)} - \tau_{k+1} r_{ij}^{(k)}, \quad (15)$$

где невязка  $r^{(k)} = Aw^{(k)} - B$ , итерационный параметр

$$\tau_{k+1} = \frac{(r^{(k)}, r^{(k)})}{(Ar^{(k)}, r^{(k)})}.$$

В качестве условия остановки итерационного процесса следует использовать неравенство

$$\|w^{(k+1)} - w^{(k)}\|_E < \delta,$$

где  $\delta$  – положительное число, определяющее точность итерационного метода. Оценку точности приближенного решения можно проводить в других нормах пространства сеточных функций, например, в максимум норме

$$\|w\|_C = \max_{x \in \bar{\omega}_h} |w(x)|. \quad (16)$$

Константу  $\delta$  для данной задачи предлагается выбрать так, чтобы итерационный процесс укладывался в отведенное для него время.

**Замечание.** По согласованию с преподавателем, принимающим задание, метод скорейшего спуска может быть заменен любым другим методом, пригодным для решения систем линейных алгебраических уравнений с симметричной положительно определенной матрицей, таких как метод сопряженных градиентов, метод Рундсона с чебышевским набором итерационных параметров [4].

## Задание практикума

Требуется приближенно найти решение задачи (1), (2) для случая, когда  $f(x, y) = 1$  при всех  $(x, y) \in D$ . Конкретное задание определяется геометрией области  $D$ .

Область  $D$  задается следующей геометрией: треугольник с вершинами в точках  $C(-3, 0)$ ,  $A(3, 0)$ ,  $B(0, 4)$ .

**Для успешного выполнения задания требуется:**

1. разработать последовательный код программы, вычисляющий приближенное решение разностной схемы методом скорейшего спуска, выполнить расчеты на сгущающихся сетках

$$(M, N) = (10, 10), (20, 20), (40, 40);$$

2. используя средства OpenMP, разработать параллельный код программы, вычисляющий приближенное решение разностной схемы, проверить качество работы алгоритма, выполнив расчеты на сетке  $(M, N) = (40, 40)$  на одном, четырех и шестнадцати нитях, провести сравнение с последовательным вариантом алгоритма.

3. заполнить таблицу 1 с результатами расчетов OpenMP-программы;

## Краткое описание проделанной работы

Был реализован последовательный алгоритм и проверена его работа на сгущающихся сетках  $(M, N) = (10, 10), (20, 20), (40, 40)$ . Затем код был дополнен директивами OpenMP для распараллеливания вычислений и запущен на 2, 4, 8, 16 и 32 нитях. Затем было проведено тестирование на сетках (80, 90) и (160, 180) на разном количестве нитей. Результаты времени работы приведены в таблице 1.

Последовательный запуск сетки 80 x 90:

- Ошибка: 0.000001
- Время: 7.71271 мин
- Количество итераций: 126040

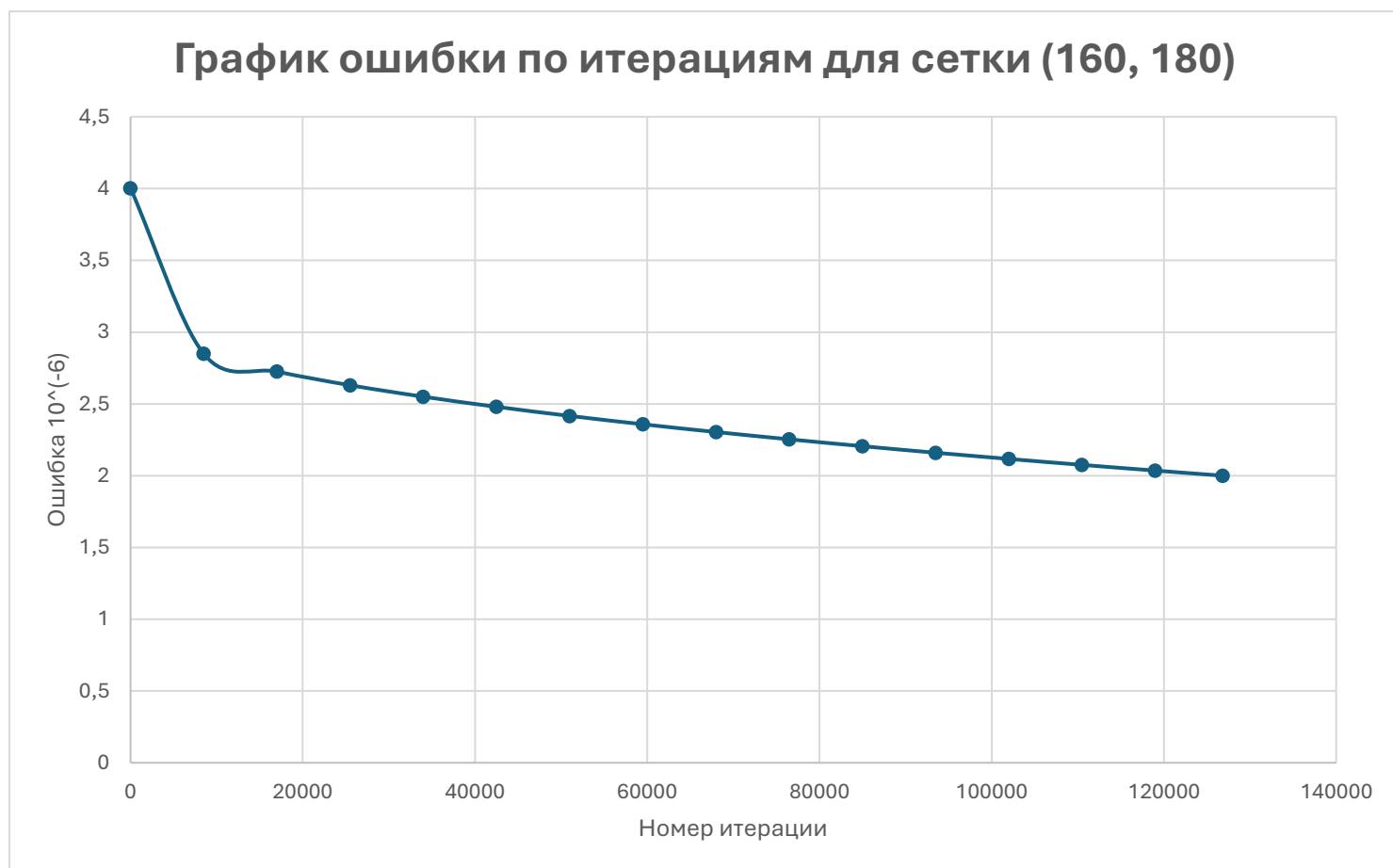
Последовательный запуск сетки 160 x 180:

- Ошибка: 0.0000025
- Время: - 50.1742 мин
- Количество итераций: 126846

Количество OpenMP-нитей	Число точек сетки (M x N)	Число итераций	Время решения, мин	Ускорение
2	80 x 90	126040	3,1832	2,4229
4	80 x 90	126040	1,7395	4,4339
8	80 x 90	126040	1,15037	6,7045
16	80 x 90	126040	0,931231	8,2823
4	160 x 180	126846	2,96871	16,901
8	160 x 180	126846	2,87045	17,4796
16	160 x 180	126846	2,32922	21,5412
32	160 x 180	126846	2,06871	24,2539

Таблица 1: Результаты расчётов на ПВС IBM Polus (последовательный и OpenMP код)

## График ошибки по итерациям для сетки (160, 180)





## Графики ошибки по области для сетки (160, 180)

При старте ошибка максимальная, так как начальное значение шага = 0. Далее ошибка постепенно уменьшается по мере продвижения по алгоритму. Из-за выбранной погрешности и нормализации вектора ошибки она не вышла на 0.

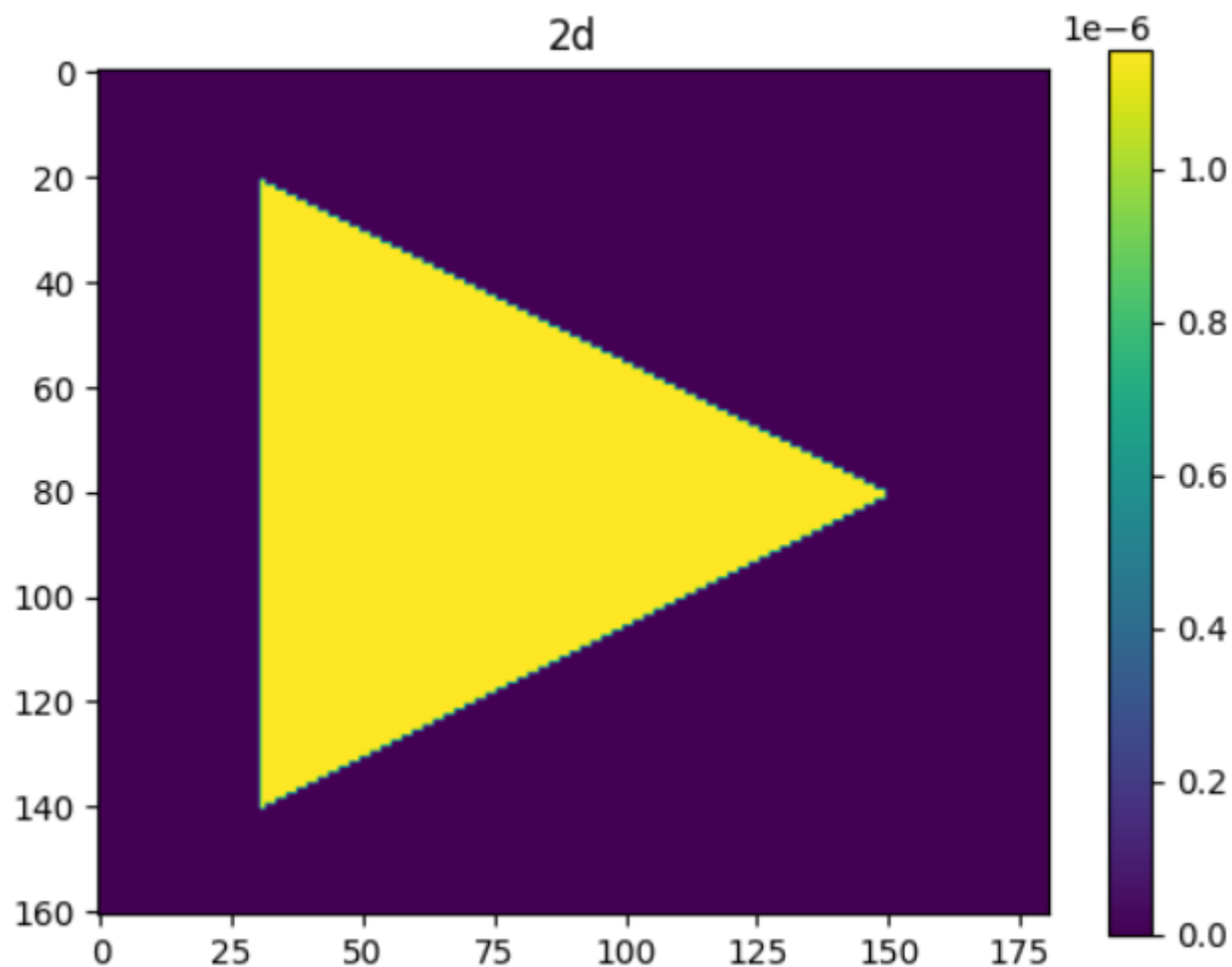


Рис. 1 Ошибка на 0 итерации

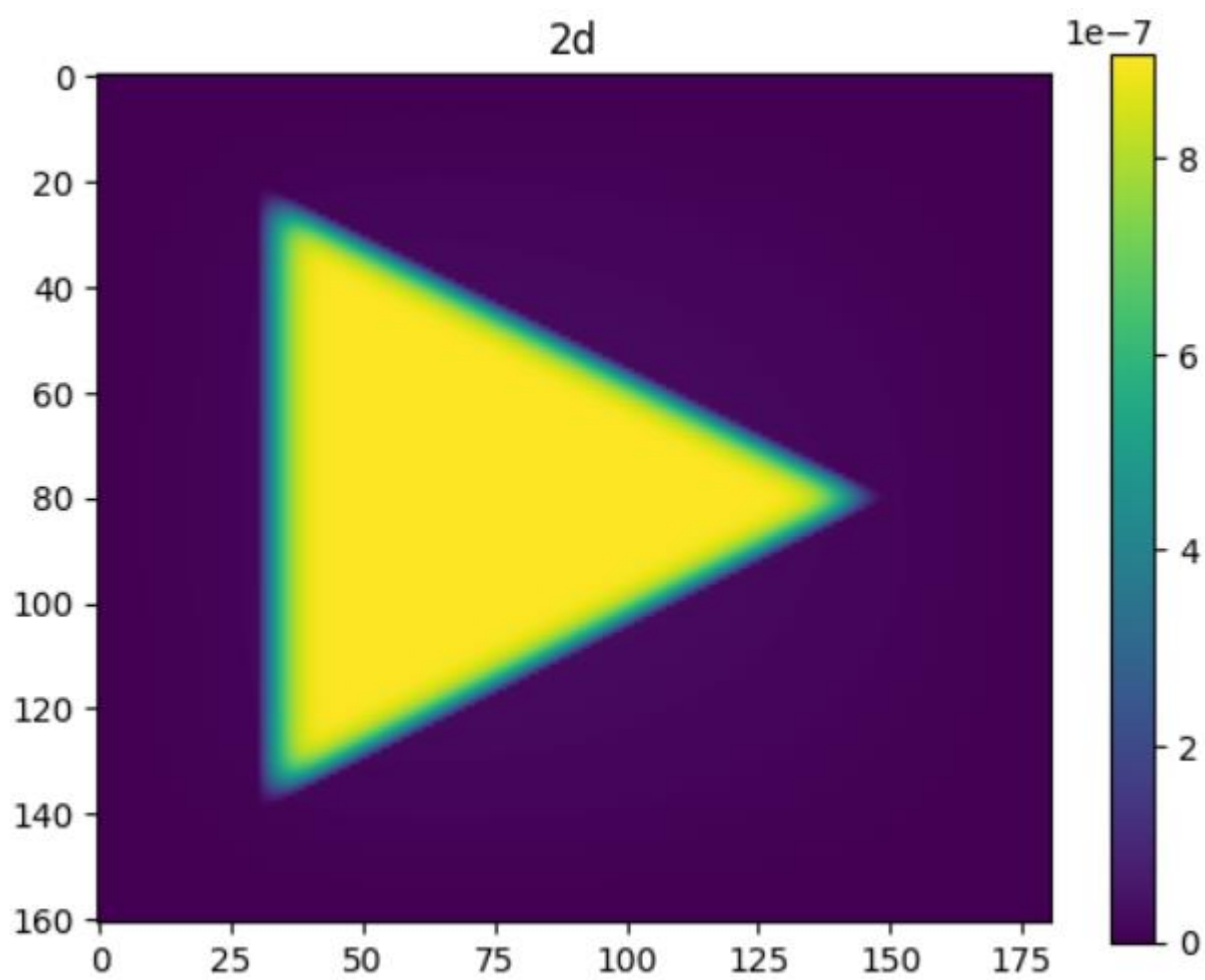


Рис. 2 Ошибка на 12600 итерации

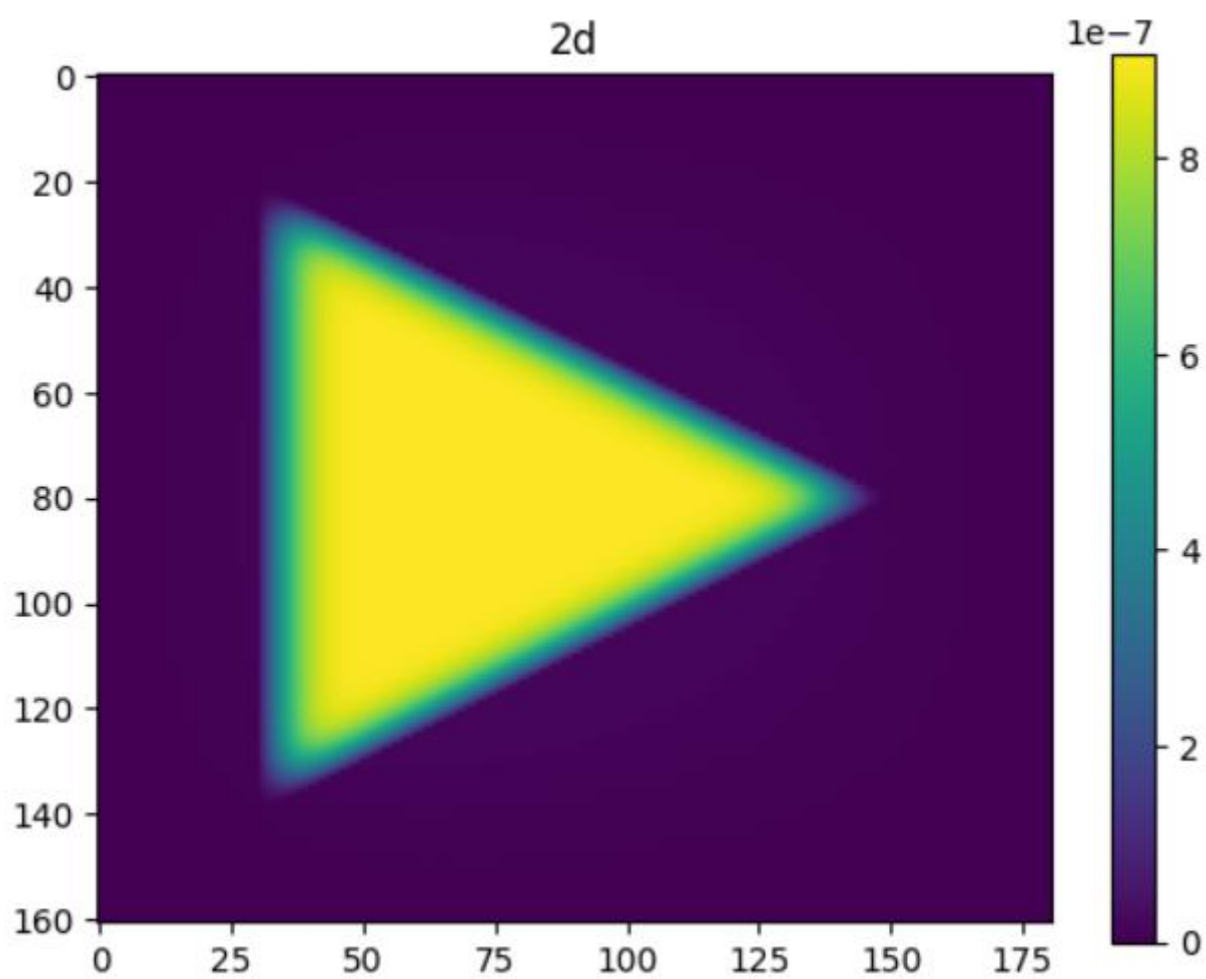


Рис. 3 Ошибка на 25200 итерации

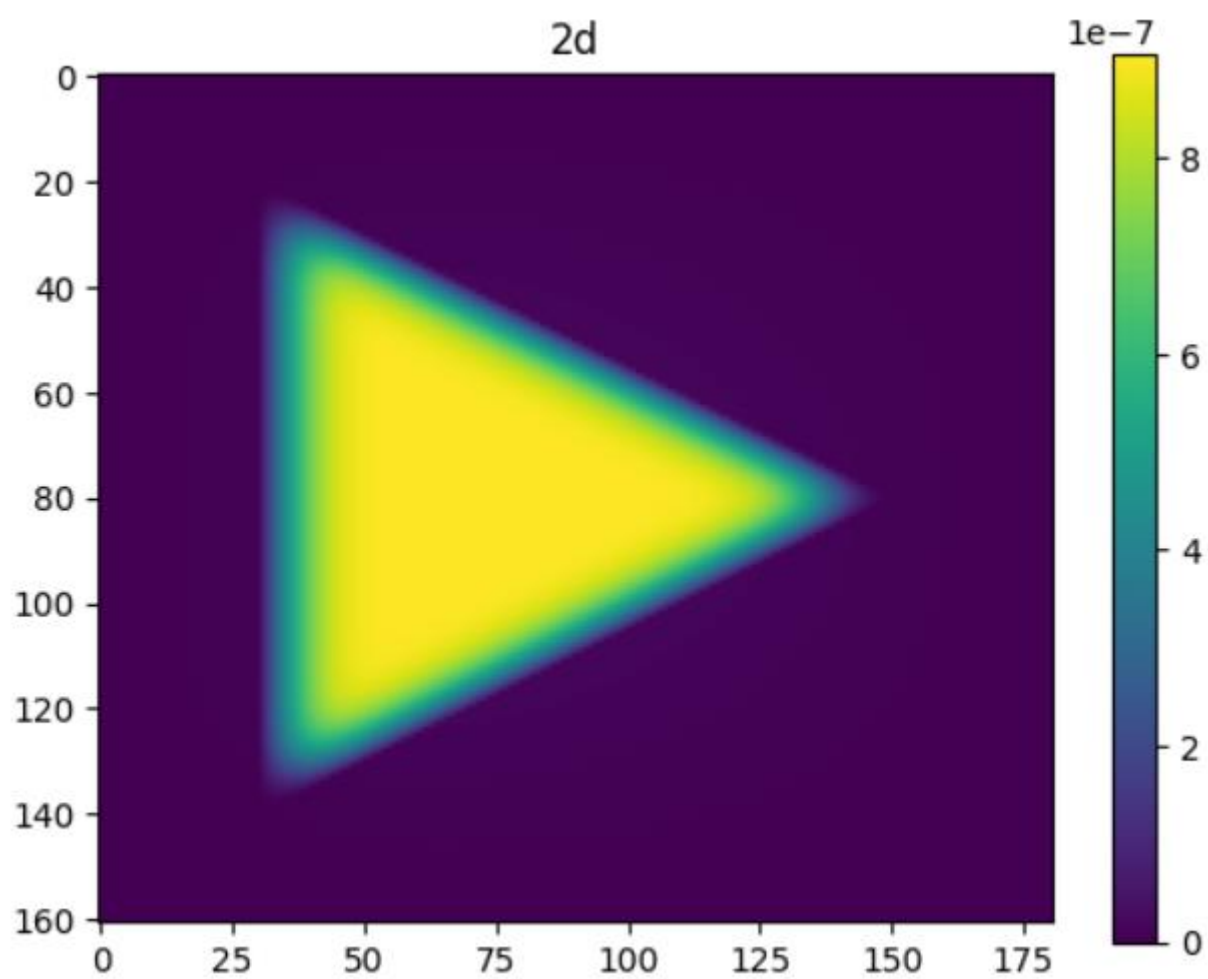


Рис. 4 Ошибка на 37800 итерации

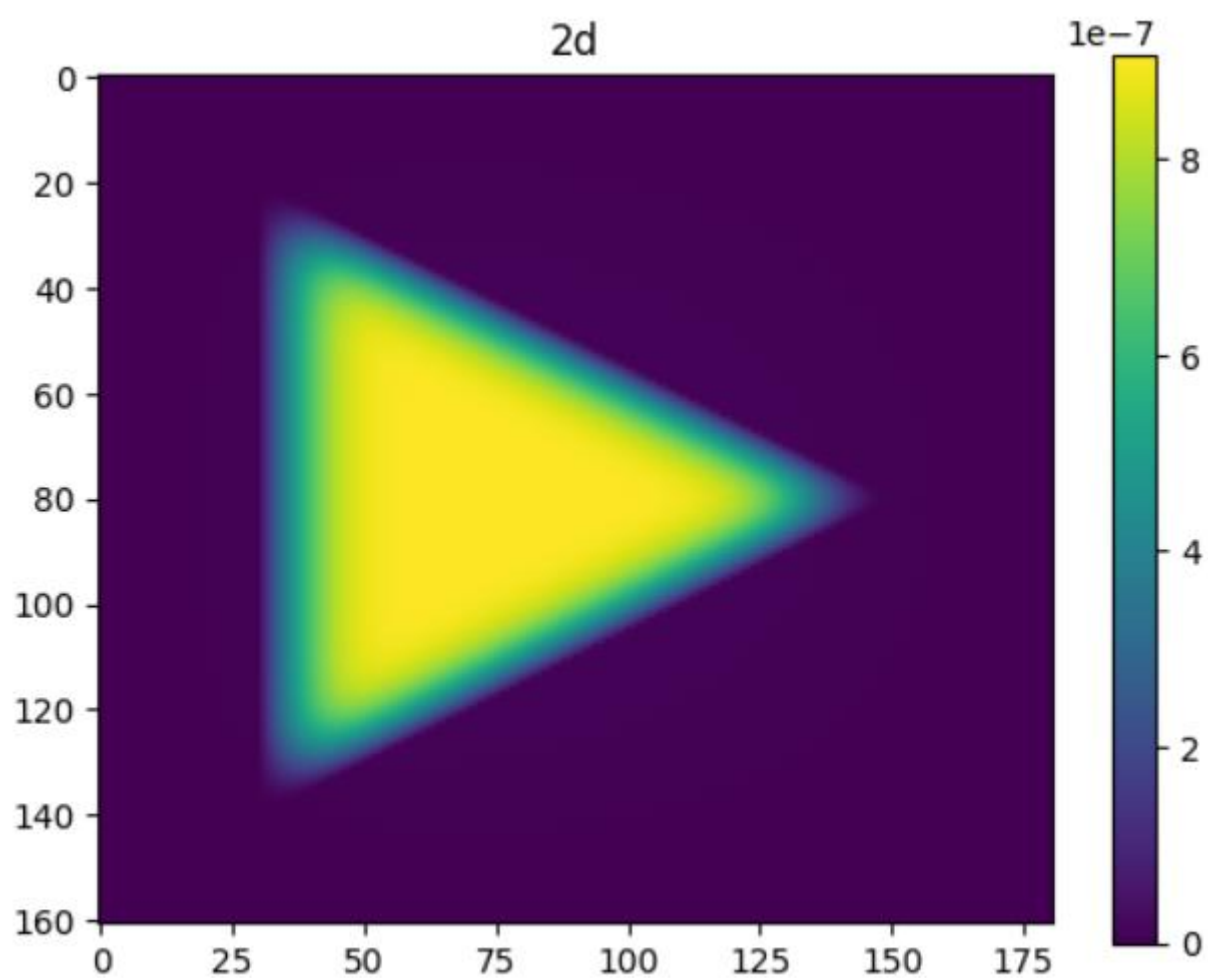


Рис. 5 Ошибка на 50400 итерации

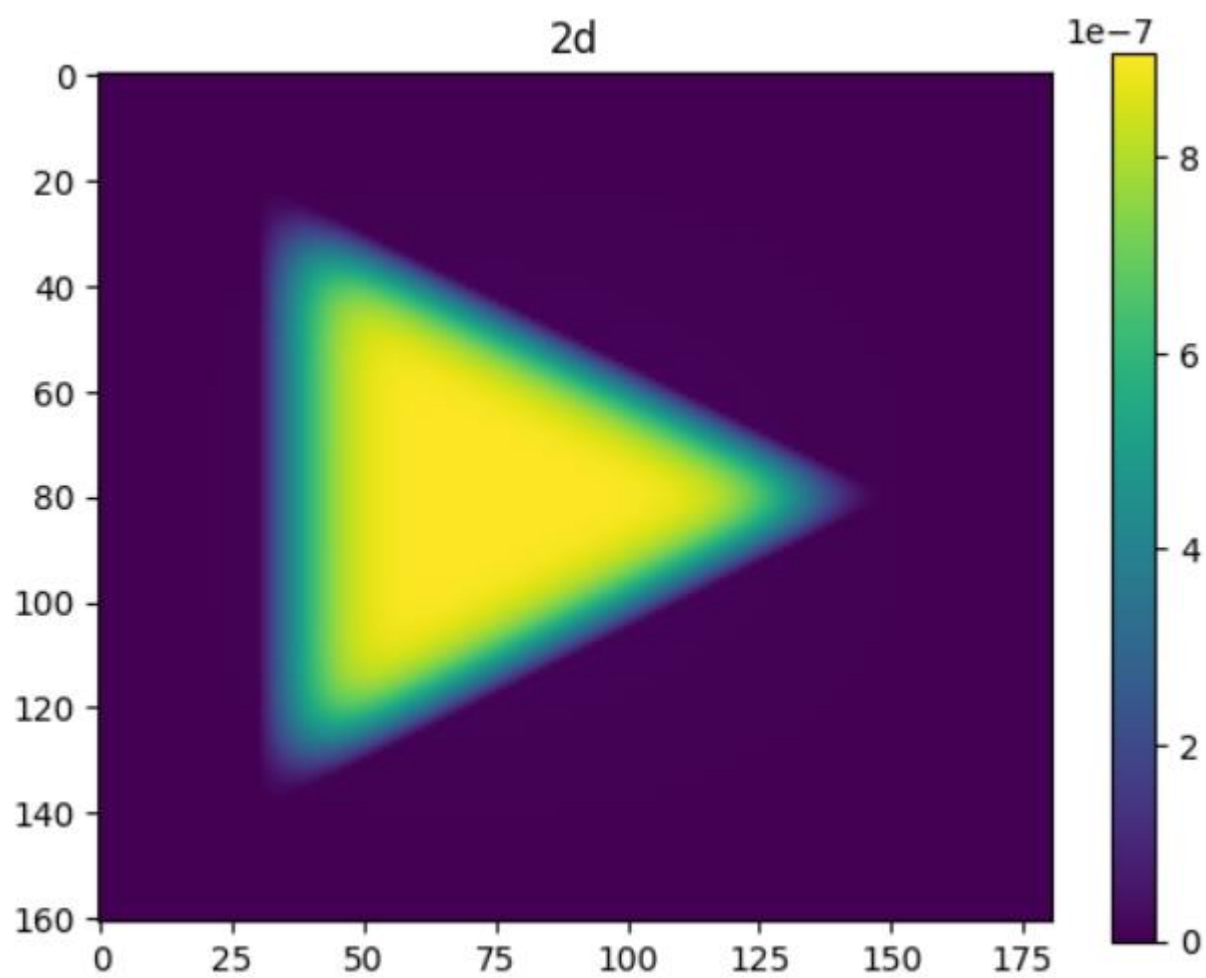


Рис. 6 Ошибка на 63000 итерации

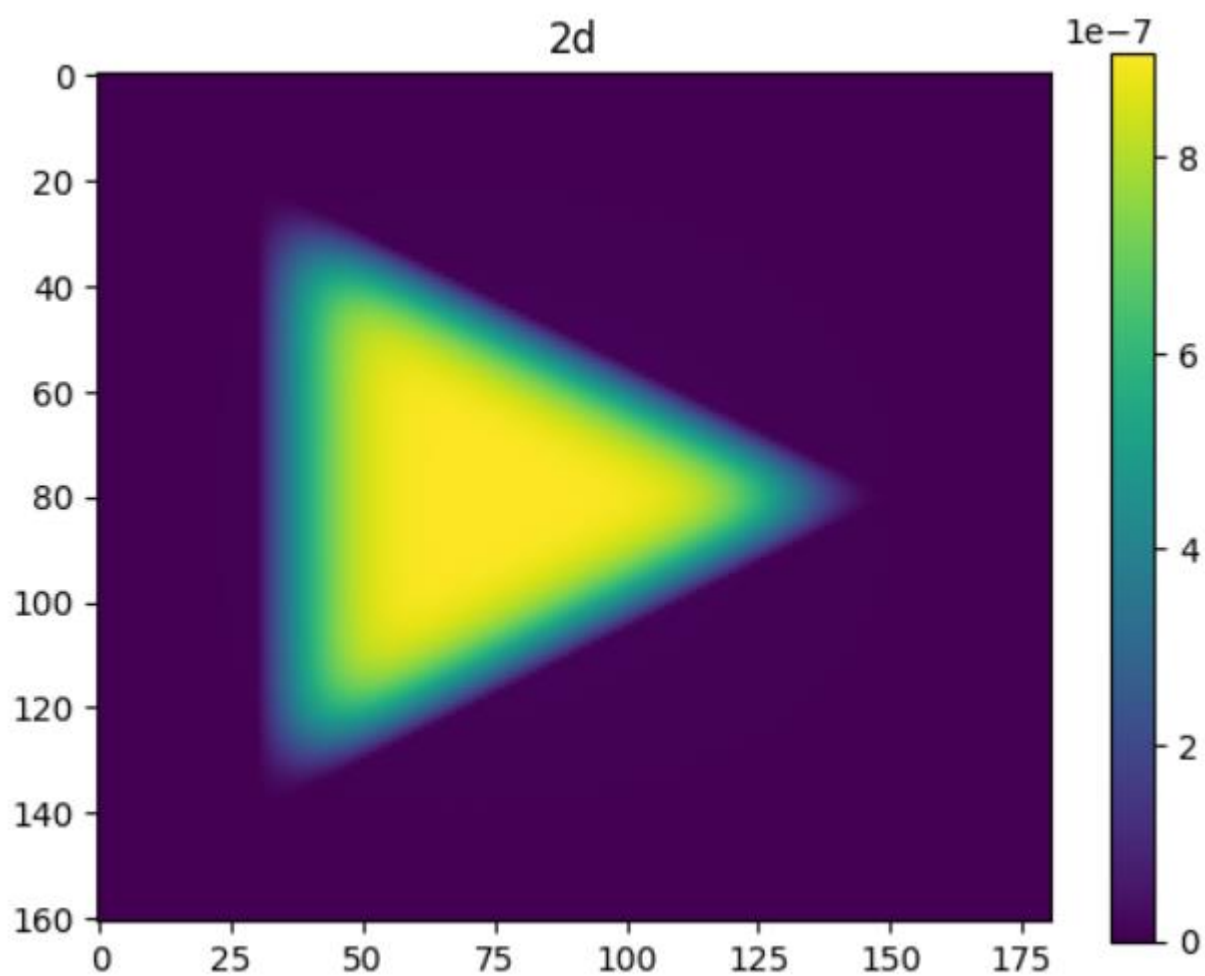


Рис. 7 Ошибка на 75600 итерации

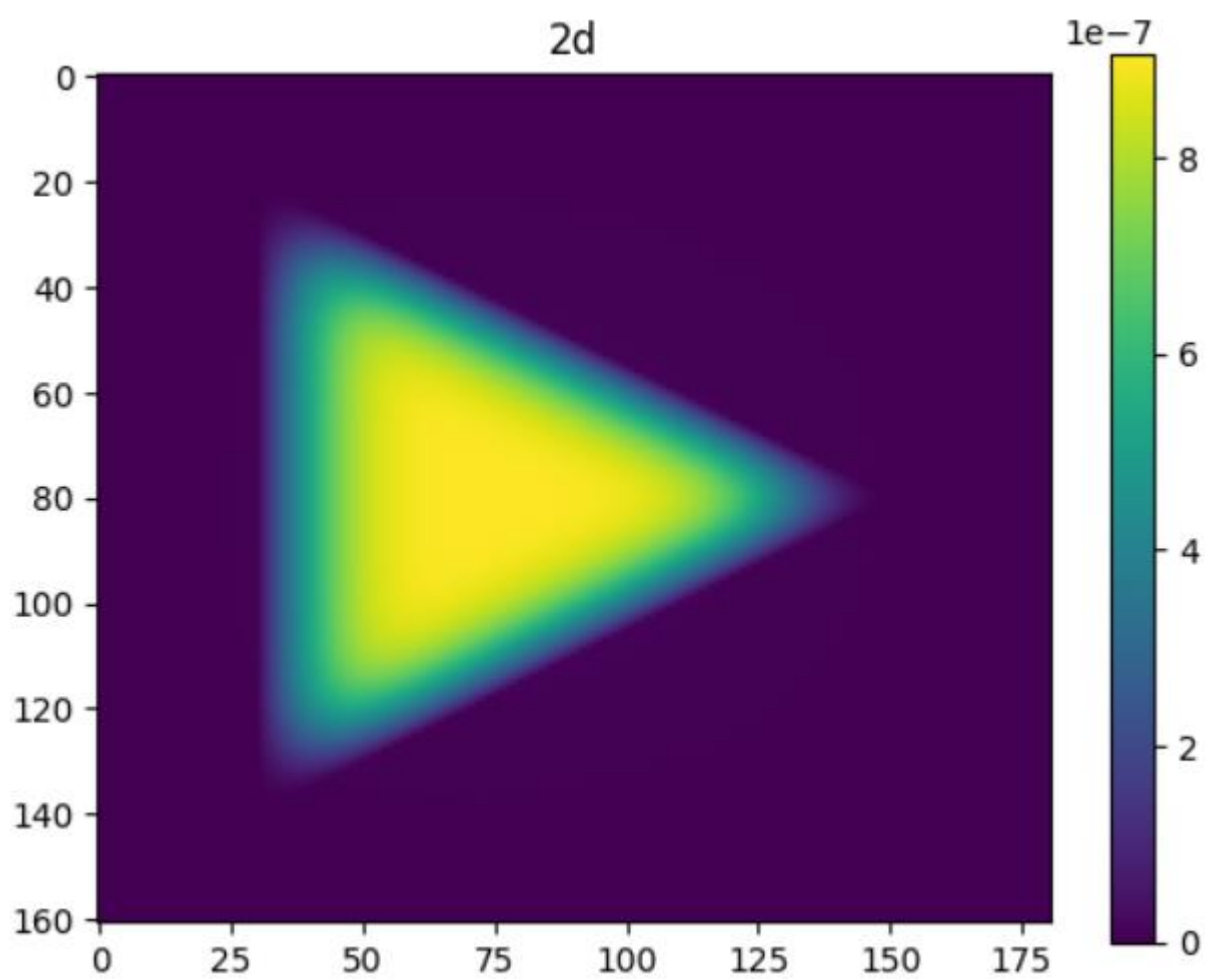


Рис. 8 Ошибка на 88200 итерации



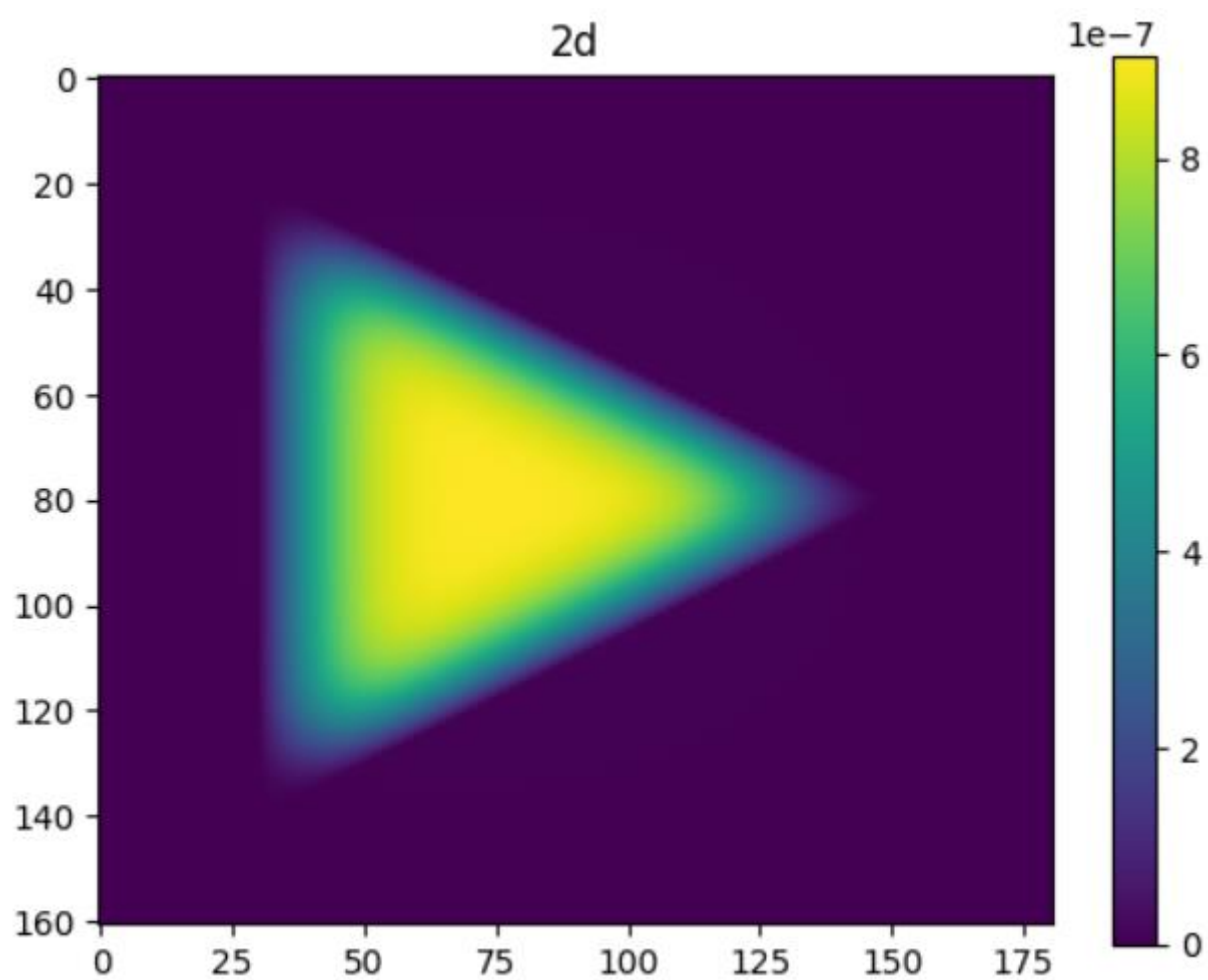


Рис. 9 Ошибка на 100800 итерации

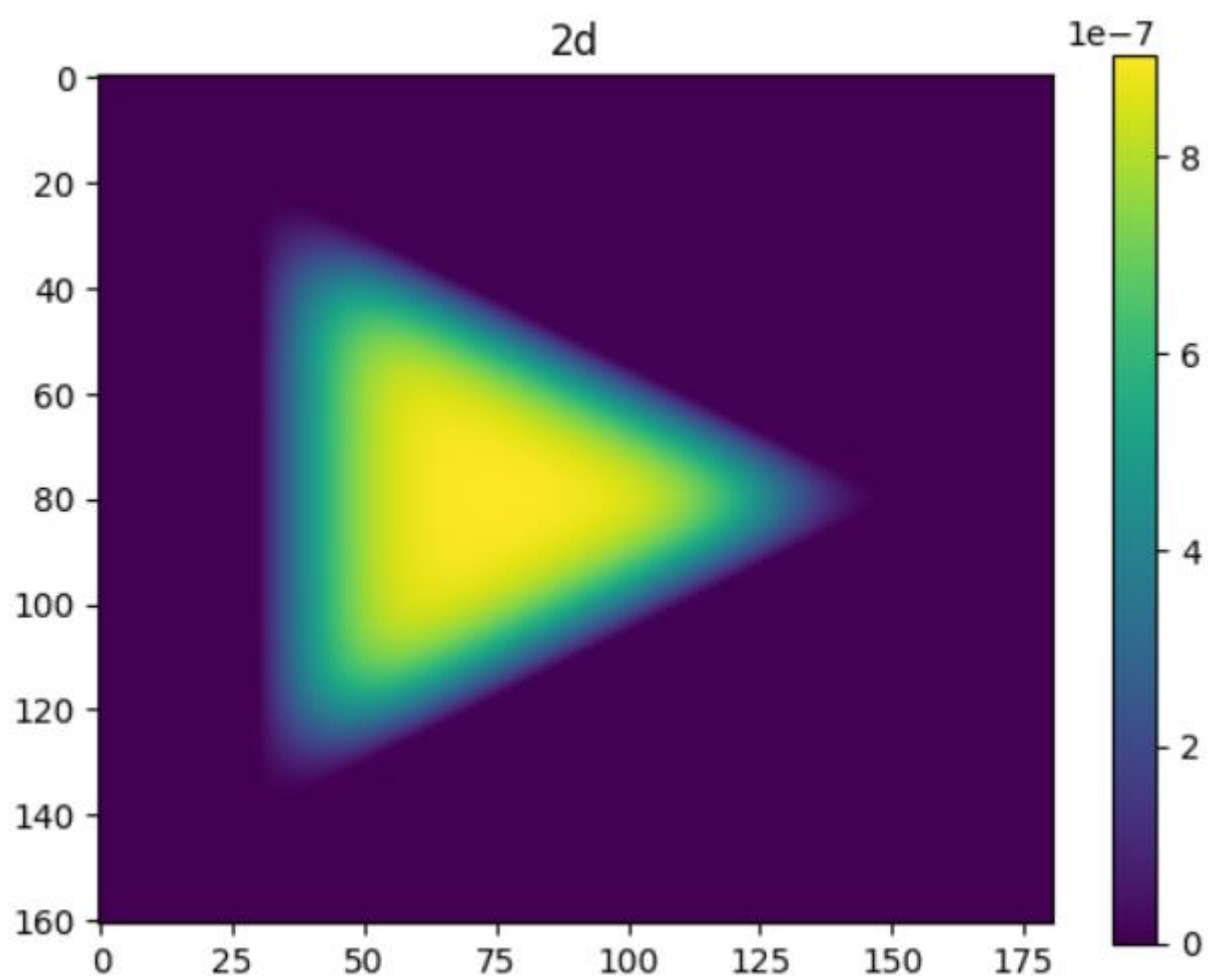


Рис. 9 Ошибка на 113400 итерации

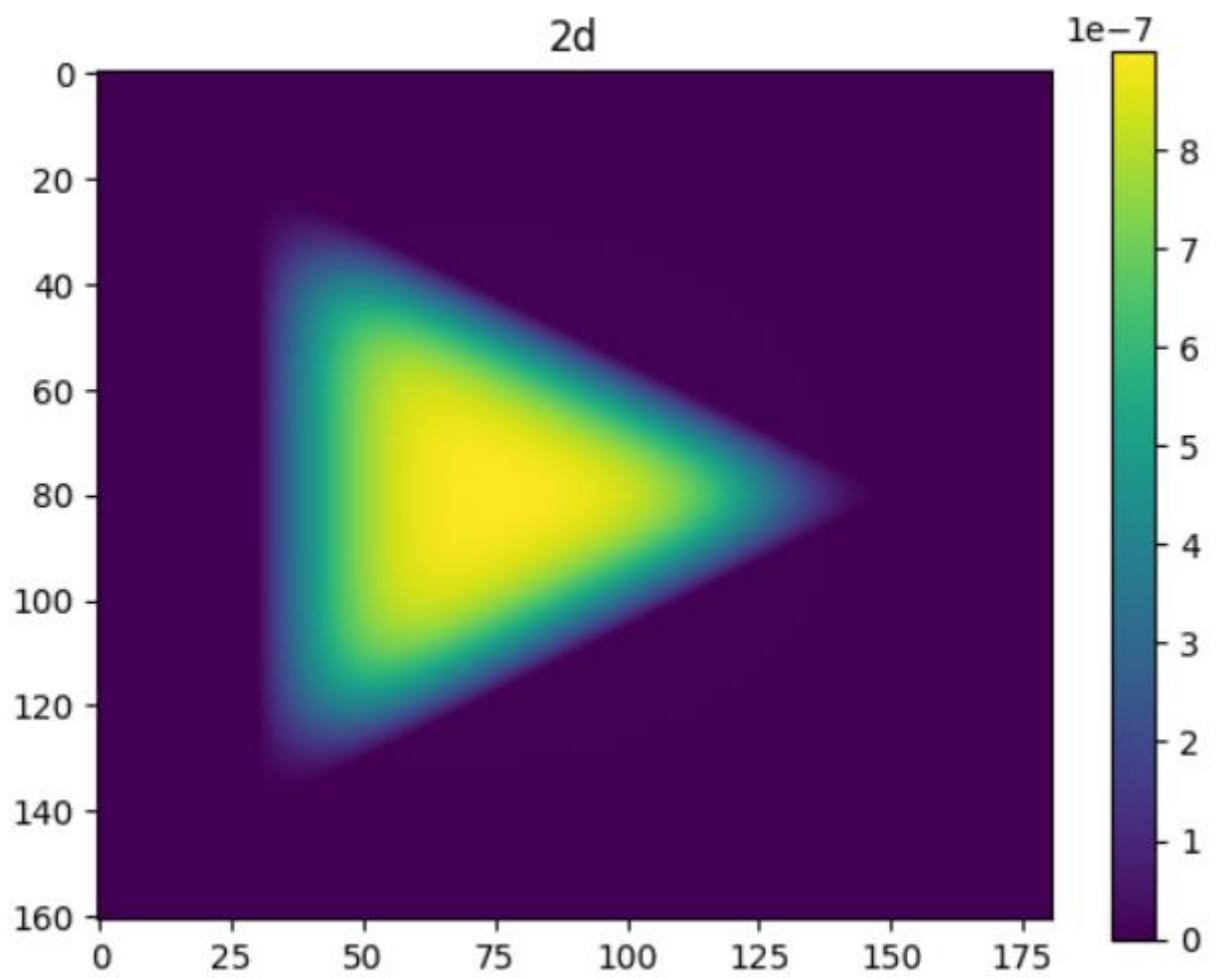


Рис. 9 Ошибка на 126846 итерации

## Графики ускорения для сеток (80, 90) и (160, 180)

