

Школа – Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерного топливного цикла

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<p>Обобщённая реализация конечно-разностного метода для решения дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка</p> <p>УДК 519.633.6:519.633.2:004:41</p>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Б	Потей Артемий Алексеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Алейник А.Н.	к. ф.-м. н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер ИШФВП	Дусаев Р.Р.			

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Латышева Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (КОМПЕТЕНЦИИ ВЫПУСКНИКОВ)

### Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (компетенции)
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно- управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

<i>Профессиональные компетенции</i>	
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.

P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов.
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработке способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Школа ИЯТШ

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) ОЯТЦ

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ Бычков П.Н.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Б	Потею Артемию Алексеевичу

Тема работы:

Обобщённая реализация конечно-разностного метода для решения дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка	
Утверждена приказом директора	От 07.05.2019 №3580/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

30.05.19

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Начальные и граничные условия для одномерного и двумерного случаев уравнения теплопроводности
<b>Перечень подлежащих к исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Изучение литературы по теме работы; освоение программного обеспечения; программная реализация метода конечных разностей для решения дифференциальных уравнений в частных производных; тестирование программы; обработка результатов тестирования; определение критериев сходимости и устойчивости; обобщение алгоритма; финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Обзор литературы. Реализация метода.	Инженер ИШФВП Дусаев Р.Р.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН, к.ф.н. Латышева Е.В.
Социальная ответственность	Ассистент ОЯТЦ, к.ф.-м.н. Гоголева Т.С.

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	12.03.2019
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОЯТЦ	Алейник А.Н.	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А5Б	Потей Артемий Алексеевич		

Школа ИЯТШ  
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
 Уровень образования Бакалавр  
 Отделение школы (НОЦ) ОЯТЦ  
 Период выполнения Весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
31.01.19	Составление и утверждение технического задания	5
09.02.19	Подбор и изучение литературы по теме исследования	5
15.03.19	Освоение языка программирования	5
25.03.19	Реализация алгоритма для одномерной и двумерной однородной задачи с заданным начальным условием	25
20.04.19	Проверка и анализ промежуточных результатов	10
20.05.19	Реализация обобщенного алгоритма	30
25.05.19	Проверка и анализ итоговых результатов	10
30.05.19	Подготовка к защите ВКР	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Алейник А.Н.	к.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А5Б	Потей Артемий Алексеевич

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ЯТЦ</b>
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Заработная плата устанавливается в соответствии с должностными окладами ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Тариф на промышленную электроэнергию в соответствии с нормативами Томской области
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Размер страховых взносов - 30%. Пониженная ставка - 27,1%.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– структура работ в рамках научно-технического исследования;</li> <li>– оценка трудоемкости выполнения работ;</li> <li>– составление графика выполнения научно-технического исследования;</li> <li>– расчет бюджета научно-технического исследования</li> </ul>
2. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Матрица SWOT. График проведения и бюджет НИ. Диаграмма Ганта. Бюджет затрат научно-технического исследования

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Латышева Е.В.	к.ф.-м.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А5Б	Потей Артемий Алексеевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А5Б	Потей Артемий Алексеевич

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии / Физика атомного ядра и частиц

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, ионизирующее излучение);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
2. <i>Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ;</li> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> </ul>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul>
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	10.04.19
---	----------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А5Б	Потей Артемий Алексеевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 74 с., 29 рисунков, 13 таблиц, 21 источник, 1 приложение

Ключевые слова: конечные разности, FTCS, вычислительная устойчивость, обобщенная реализация, уравнение теплопроводности.

Цель работы – реализация обобщенного прототипа программы для решения нестационарных дифференциальных уравнений методом конечных разностей.

В результате выполнения работы был реализован алгоритм для численного решения одномерного и двумерного уравнения теплопроводности.

Степень внедрения: устройство алгоритма оставляет возможность изменить тип схемы или уравнения.

Область применения: сверхпроводимость, вихри Абрикосова, моделирование процессов теплопередачи

Экономическая эффективность работы на данный момент не может быть полностью установлена, так как предложенная реализация находится на стадии прототипирования.

Основная часть пояснительной записки была оформлена в системе компьютерной верстки LaTeX, экономическая и социальная часть были оформлены в текстовом процессоре Word 2018.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	12
1 Теория . . . . .	14
1.1 Уравнение теплопроводности . . . . .	14
1.2 Метод конечных разностей . . . . .	15
1.3 Разностные схемы . . . . .	15
1.4 Вычислительная устойчивость . . . . .	18
2 Реализация метода . . . . .	20
2.1 Проектирование программы. Структуры данных и процедуры . . . . .	20
2.2 Результаты работы алгоритма . . . . .	30
2.3 Анализ устойчивости алгоритма . . . . .	37
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение . . . . .	40
4 Социальная ответственность . . . . .	56
Заключение . . . . .	68
Список литературы . . . . .	69
Приложение А . . . . .	71

## Введение

Дифференциальные уравнения в частных производных часто возникают во многих областях науки и техники. Решения дифференциальных уравнений позволяют описать процессы различной природы: теплопроводности, диффузии[1], ценообразования[2], социальной динамики[3] и т.д., однако их нахождение не всегда является достаточно простой задачей. Точное аналитическое решение имеют узкий круг уравнений с простыми начальными и граничными условиями, поэтому нередко оказывается, что у задачи не существует аналитического решения, либо оно слишком громоздко для непосредственного применения[4, 5]. В таких ситуациях используются численные методы, позволяющие получить количественную оценку решения с заданной точностью. Существенную роль играет то, что при вычислениях на компьютере в результатах появляются ошибки, вызванные формой представления действительных чисел в виде числа с плавающей точкой[6]. Это может привести к тому, что численное решение будет значительно отличаться от истинного. Наиболее широкое применение среди численных методов решения дифференциальных уравнений нашли методы конечных элементов и конечных разностей[7]. Несмотря на обширное использование метода конечных элементов, существует класс задач, где применение этого метода осложнено, в силу сложностей с подбором базисной функции и разбиением расчетной области на домены[8], или неосуществимо из-за математических особенностей уравнения или граничного условия. Нередко в таких случаях алгоритмически более простой метод конечных разностей позволяет получить удовлетворительное численное решение задачи[9, 10]. Таким образом, целью данной работы была реализация обобщенного прототипа программы для решения нестационарных дифференциальных уравнений методом конечных разностей.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- Изучить релевантную литературу(разностные схемы, ДУ в ЧП, императивные языки программирования и т.д.);
- Вывести критерий численной устойчивости для многомерного случая;
- Написать программу для решения одномерного и двумерного уравнения теплопроводности;
- Продемонстрировать согласованность численного решения с аналитическим;
- Продемонстрировать нарушение численной устойчивости.

Предлагаемая обобщенная реализация метода конечных разностей была выполнена для схемы FTCS (англ. Future Time Central Space) для уравнения теплопроводности, при этом позволяя сравнительно легко перейти к другим схемам, например BTCS (англ. Backward Time Cental Space), схеме Кранка-Николсона или их комбинациям, а так же использоваться для решения прочих нестационарных уравнений.

# 1. Теория

## 1.1. Уравнение теплопроводности

Уравнение теплопроводности - ДУ в ЧП второго порядка, описывающее как некоторое температурное поле в твердом веществе будет изменяться во времени. Однородное уравнение теплопроводности может быть записано как

$$\dot{u} = \alpha \nabla^2 u \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплопроводности,  $\dot{u}$  - производная функции  $u$  по времени,  $\nabla^2 u$  - лапласиан функции  $u$ , равный сумме производных по координатам второго порядка

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \dots$$

Аналитическое решение уравнения теплопроводности можно получить, используя метод разделения переменных Фурье[11], после чего решение уравнение в частных производных сводится к задаче Штурмя-Лиувилля. Для решения задачи теплопроводности нужно параметризовать её условия: выделить начальное и граничные условия, определить стоки и истоки тепла.

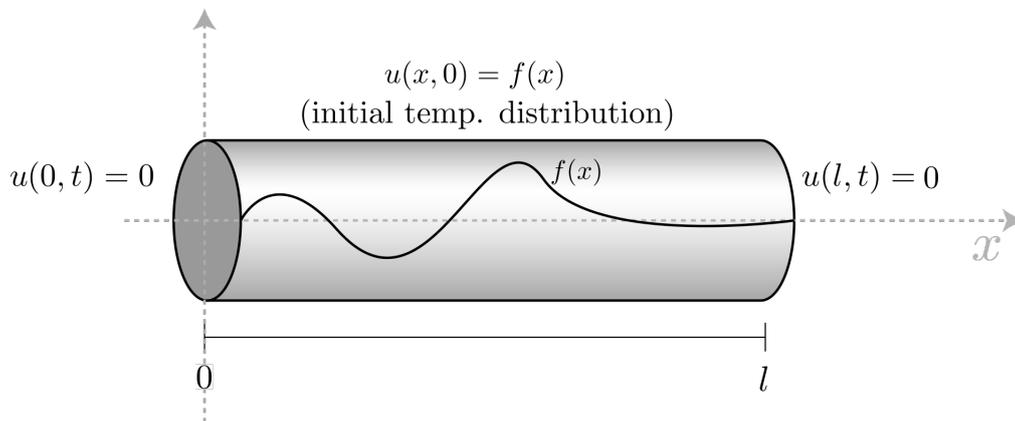


Рисунок 1.1 — иллюстрация к однородной одномерной задаче

В случае если условия задачи не могут быть выражены в аналитическом виде, либо решение включает в себя расходящуюся сумму, удобно воспользоваться численными методами решения ДУ, одним из которых является метод конечных разностей.

## 1.2. Метод конечных разностей

Методы конечных разностей – численные методы решения дифференциальных уравнений путем аппроксимации их с помощью рекуррентных соотношений, которыми являются разностные схемы. Таким образом методы конечных разностей позволяют заменить решение обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных решением систем алгебраических уравнений. Такая замена делает возможным применение технических средств с дискретной логикой, например компьютеров. В основе методов конечных разностей лежит теорема Тейлора[12], согласно которой функцию в точке  $x_0 + h$  можно определить по значению функции в точке  $x_0$  путем разложения её в ряд Тейлора

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}h + \frac{f''(x_0)}{2!}h^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}h^n + R_n(x) \quad (1.2)$$

где  $n$  - количество аппроксимирующих членов суммы (порядок аппроксимации);  $R_n(x)$  - функция ошибки, определяющая ошибку аппроксимации порядка  $n$ . Для первого порядка аппроксимации формула (1.2) примет следующий вид

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}h + R_1(x)$$

Если отбросить функцию  $R_1(x)$ , то производная первого порядка в точке  $x_0$  будет приблизительно равна

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} \quad (1.3)$$

Данное выражение фактически является разностной схемой, при этом очевидно, что величина  $R_1(x)$  пропорциональна величине шага  $h$ .

## 1.3. Разностные схемы

В формуле (1.3) расчет производной происходит по двум соседним элементам в положительном направлении оси  $x$ . Помимо такой, «прямой» схемы, можно использовать предыдущий элемент с тем же шагом, тогда

конечноразностная схема будет «обратной», либо использовать оба крайних элемента с шагом между ними, такая схема будет называться «центральной». В зависимости от выбора схемы и величины шага, получаемые значения могут существенно отличаться. На 1.2 представлен наглядный пример выбора этих величин и построения по ним линейной аппроксимации

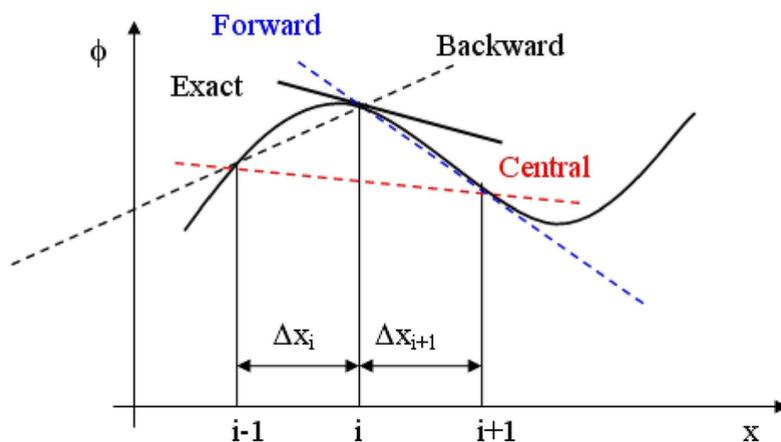


Рисунок 1.2 — конечноразностные схемы

Для сеточных функций эти 3 выражения будут записаны следующим образом

- "прямая" схема:

$$\frac{u_{i+1} - u_i}{h}$$

- "обратная" схема:

$$\frac{u_i - u_{i-1}}{h}$$

- "центральная" схема:

$$\frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2h}$$

где  $i$  - номер узла функции,  $u_i, u_{i+1}, u_{i-1}$  - значения функции в соответствующих узлах,  $h$  - шаг дискретизации (расстояние по  $x$  между узлами функции)

В случае производных старших порядков возникают различные комбинации данных функций, к примеру последовательное взятие «прямой» и «обратной» производной дает центральную производную 2-го порядка. Для дифференциальных уравнений, содержащих производные разных порядков

(как правило это уравнения, описывающие нестационарные процессы), существуют три основных типа схем:

- Явные схемы (пример – FTCS), которые производят расчет элемента в новом слое по предыдущим элементам;
- Неявные схемы (пример – BTCS), которые производят расчет элемента в новом слое по соседним элементам;
- Полу неявные схемы (пример – схема Кранка-Николсона), в которых для расчетов используются оба слоя.

Неявные и полу неявные схемы требуют решения систем уравнений на каждом слое, опираясь на граничное условие, из-за чего имеют высокую вычислительную стоимость. Самой простой и как в плане реализации, так и в плане трудоемкости вычислений, является схема FTCS, далее представлен её вид

$$u_j^{n+1} = r(u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n) + u_j^n \quad (1.4)$$

Шаблон, по которому происходит расчет выглядит так

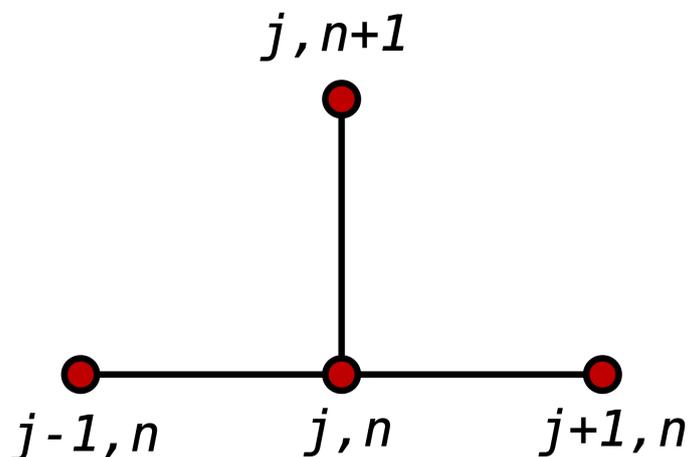


Рисунок 1.3 – шаблон формулы (1.4)

$n, j$  - индексы временного и координатного слоя соответственно,  $r$  - коэффициент, пропорциональный отношению  $\frac{\Delta t}{\Delta x^2}$ . Данный коэффициент является узким местом схемы FTCS, так как влияет на её вычислительную устойчивость, накладывая ограничения на величину временного шага и увеличивая число итераций для достижения нужного момента времени.

## 1.4. Вычислительная устойчивость

При численных расчетах на ЭВМ всегда возникают ошибки машинного округления. Это возникает из-за особенностей хранения данных в памяти устройства. Множество действительных чисел представлено в ЭВМ как число с плавающей запятой, которое хранит переданное значение с заданной точностью. Погрешность машинного округления имеет различную величину на разных устройствах, однако в любом случае при многократном обращении к этим данным ошибка имеет свойство накапливаться. В [13] для иллюстрации накопления ошибки приводится задача, в которой нужно составить таблицу значений интеграла на 6-разрядной десятичной ЭВМ.

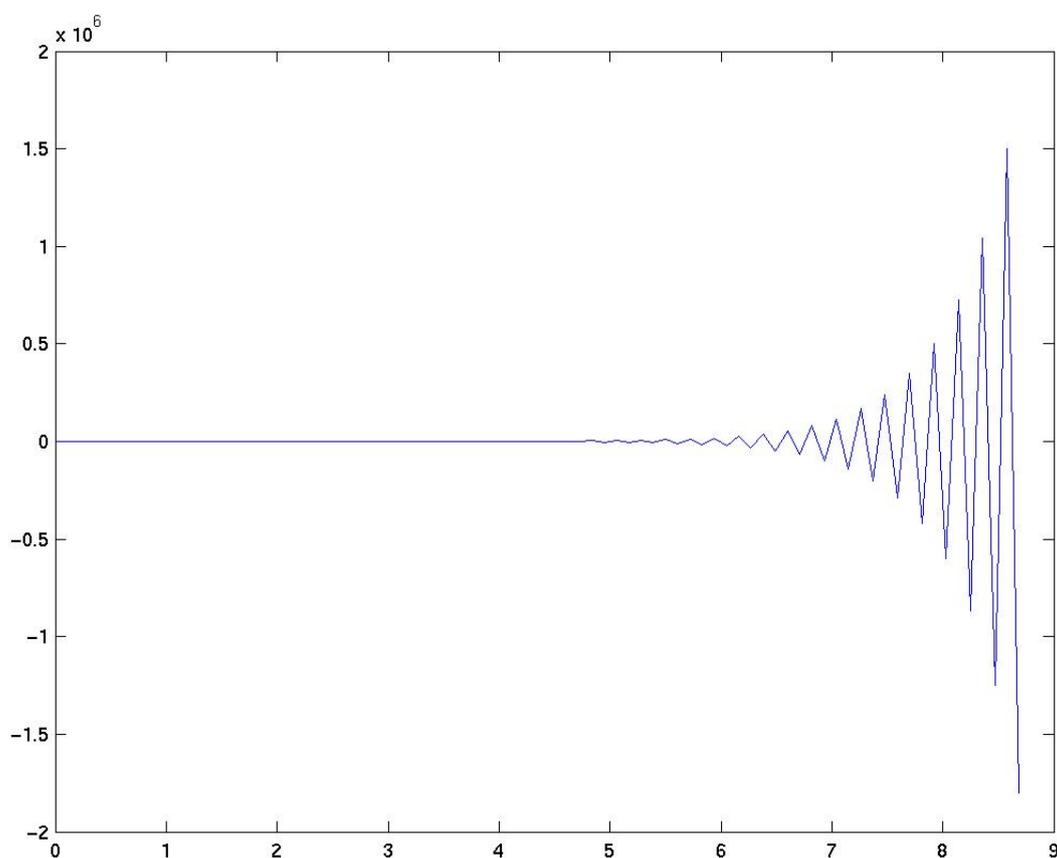


Рисунок 1.4 — возрастание абсолютной ошибки вычисления с течением времени

Алгоритм называется *вычислительно устойчивым*, если погрешность результата вычисления стремится к нулю при стремлении машинной точности к нулю. Наоборот, алгоритм называется *вычислительно неустойчивым*, когда накопление ошибки приводит к "взрыву вычислений".

По определению, ошибка округления равна

$$\epsilon_j^n = N_j^n - u_j^n \quad (1.5)$$

где  $N_j^n$  - вычисленное значение функции;  $u_j^n$  - реальное значение функции. Для одномерной разностной схемы FTCS ошибка  $\epsilon_j^{n+1}$  в следующем слое вычисляется таким же образом, что и значение функции в данной точке:

$$\epsilon_j^{n+1} = \epsilon_j^n + r(\epsilon_{j+1}^n - 2\epsilon_j^n + \epsilon_{j-1}^n) \quad (1.6)$$

Схема будет вычислительно устойчивой, когда  $\epsilon_j^{n+1} \leq \epsilon_j^n$  отношение этих двух величин называется *Фактором приращения*:

$$G \equiv \frac{\epsilon_j^{n+1}}{\epsilon_j^n}, \quad |G| \leq 1$$

Если разложить  $\epsilon_j^n$  в ряд Фурье, то путем несложных преобразований можно получить условие устойчивости в величинах шагов по времени и координатам

$$|1 - 4r \sin^2(k_m \Delta x / 2)| \leq 1 \quad (1.7)$$

где

$$r = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2}$$

Принимая во внимание, что в (1.7) вычитаемая величина всегда  $> 0$  и не превышает единицы, получим верхнюю границу условия устойчивости

$$\frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \quad (1.8)$$

Для многомерного случая аналогичным образом выводится следующее соотношение

$$\alpha \Delta t \sum_{i=1}^n \frac{1}{\Delta x_i^2} \leq \frac{1}{2} \quad (1.9)$$

Можно заметить, что с увеличением числа измерений на временной шаг накладываются все более строгие ограничения, поэтому уже в случае трех измерений использование схемы FTCS может быть довольно трудоемким.

## 2. Реализация метода

### 2.1. Проектирование программы. Структуры данных и процедуры

Важной чертой реализации любого алгоритма, являются её прозрачность и структурированность [14, 15]. Помимо упрощения понимания принципа работы, это позволяет облегчить дальнейшее развитие реализации как во время разработки, так и во время использования. На начальном этапе разработки была выполнена реализация метода конечных разностей для одномерного уравнения теплопроводности, выявившая основные требования к организации кода в случае обобщенного алгоритма:

1. Поддержка пользовательского типа данных значений функции (типы с плавающей запятой различной точности, комплексные числа);
2. Зафиксированные типы функций обратного вызова для задания начальных и граничных условий и вида решаемого уравнения;
3. Интеграция с внешними средствами анализа и визуализации данных через стандартные средства командной оболочки;

Обеспечить выполнение требований 1. и 2. возможно посредством объявления следующих типов данных:

```
typedef double Value ;  
typedef Value (*DiffCallback)(Value *, int , int , double );  
typedef Value (*CallbackF)(Value *, int , int , double , double , double );  
typedef Value (*initCallback)(double x, double y);
```

Тип Value определяет с множеством каких чисел работает алгоритм. При разработке программы верификация производилась на уравнении теплопроводности, имеющем решение на множестве действительных чисел, поэтому тип Value определен как double, который может быть изменен при решении другой задачи. Типы DiffCallback, CallbackF, initCallback являются указателями на функции, что обеспечивает возможность модульной реализации.

В блоке 1 заданы разностные схемы для расчета производных. В нем присутствуют процедуры для вычисления производных 1-го и 2-го порядка для разностных схем "вперед" "назад" и центральной. Такое представление

позволяет пользователю добавлять нужные функции в программу, используя подготовленные реализации расчетных процедур для производных.

Структура кода процедур из блока 1 одинаковая, поэтому для примера можно рассмотреть центральную производную 2-го порядка. Она имеет следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{h^2} \quad (2.1)$$

Заметим, что в силу организации хранения значений сеточной функции в одномерного массива значений типа Value данная функция допускает обобщение на случай большего числа размерностей путем введения множителя шага  $N_d$ :

$$N_d = \prod_{i=1}^{i < d} n_i \quad (2.2)$$

где  $d$  - число измерений;  $n_i$  число разбиений сетки вдоль размерности под номером  $i$ .

Таким образом, формулу (2.1) можно записать как

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1*N_d} - 2u_i + u_{i-1*N_d}}{h^2} \quad (2.3)$$

В языке Си формулу (2.3) можно записать следующим образом:

```
Value fbdu2_dq2(Value *u, int i, int N, double h)
{
    return (u[i+1*N] - 2*u[i] + u[i-1*N]) / (h*h);
}
```

Её блок-схема имеет такой вид

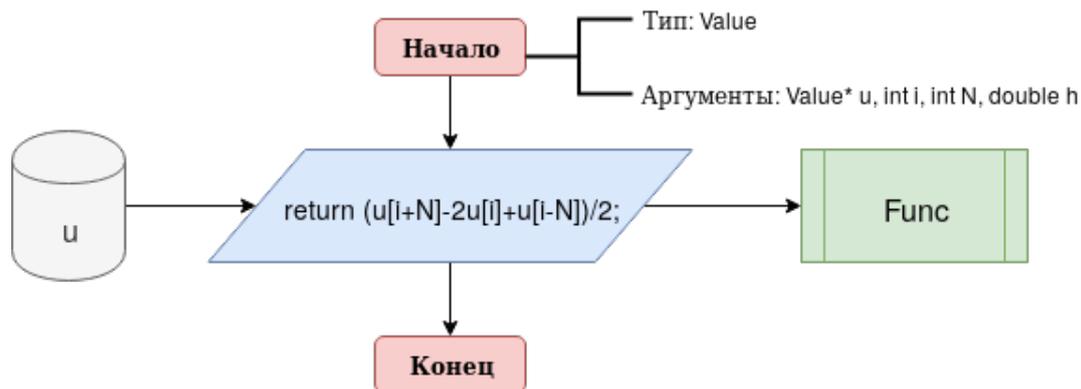


Рисунок 2.1 – Блок-схема процедуры fbdu2\_dq2

В аргументы данной процедуры передается сеточная функция  $u$ , номер элемента  $i$  функции  $u$ , множитель шага по элементам  $N$  и шаг по координате  $h$ . Процедура возвращает значение линейной аппроксимации производной 2-го порядка по координате, определяемой множителем шага, в точке координат, соответствующей узлу  $i$  функции.

Для облегчения доступа к используемым процедурам была произведена их группировка в структуру данных, реализованную массивом `dUdq`

```
DiffCallback dUdq[2][3] = {
    { bdu_dq,    cdu_dq,    fdu_dq },
    { bbdu2_dq2, fbdu2_dq2, ffdu2_dq2 }
};
```

Такой подход позволяет оперировать индексами массива `dUdq`, вместо имен процедур. Например, `dUdq[1][1](Uinit, i, N, h)` будет соответствовать `fbdu2_dq2(Uinit, i, N, h)`.

В блоке 2 приводится процедура, блок-схема которой представлена ниже

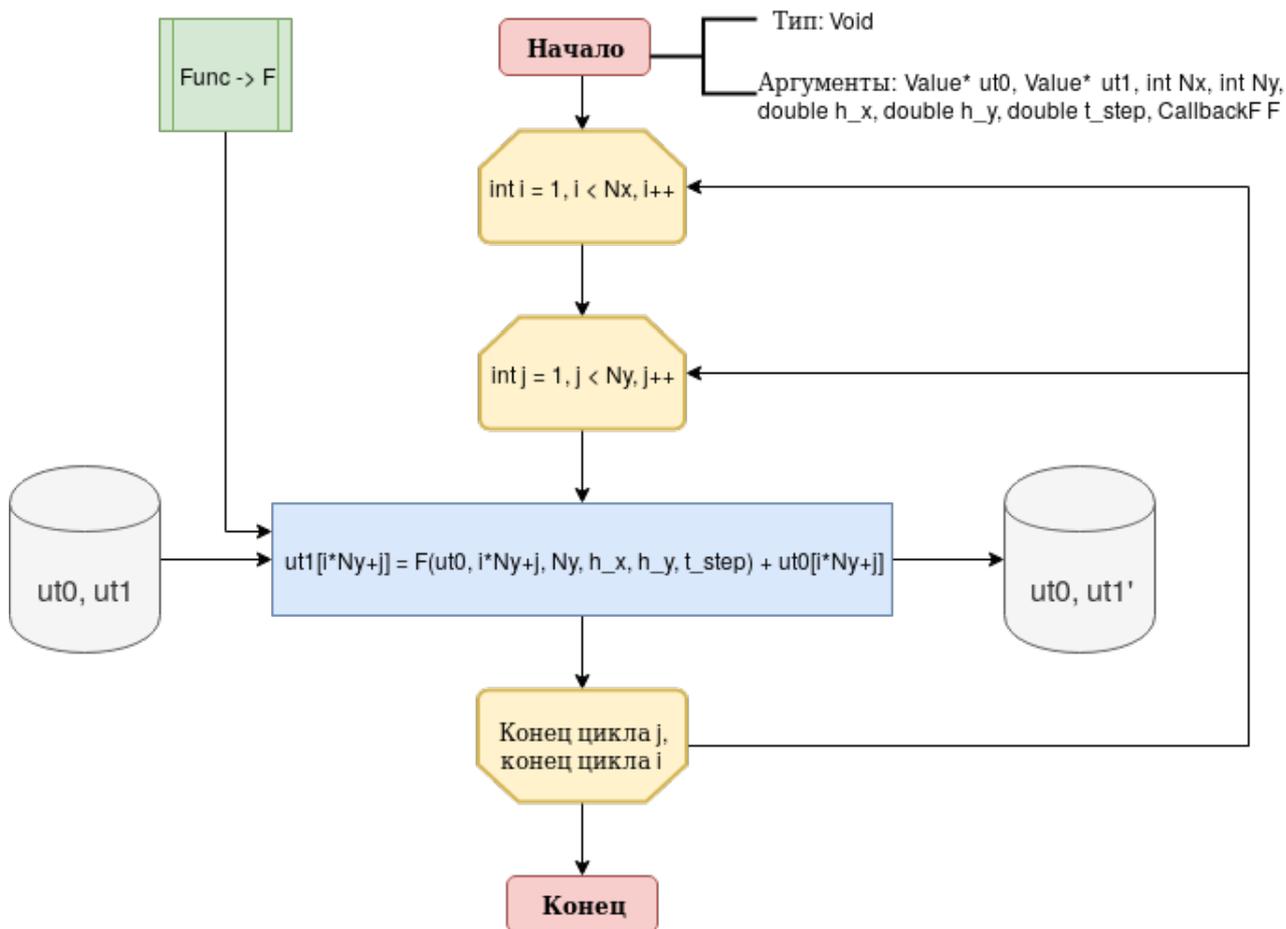


Рисунок 2.2 — Блок-схема процедуры find\_differ

в процедуру передаются массивы  $ut_0$ ,  $ut_1$ , соответствующие предыдущему и текущему слою, число точек  $N_x$  и  $N_y$ , шаги по координатам и времени  $h_x$ ,  $h_y$  и  $t_{step}$  и функционал  $F$ . Процедура `find_differ` выполняет преобразование предыдущего слоя по правилу, которое задается  $F$ .

В блоке 3 определяется начальное условие

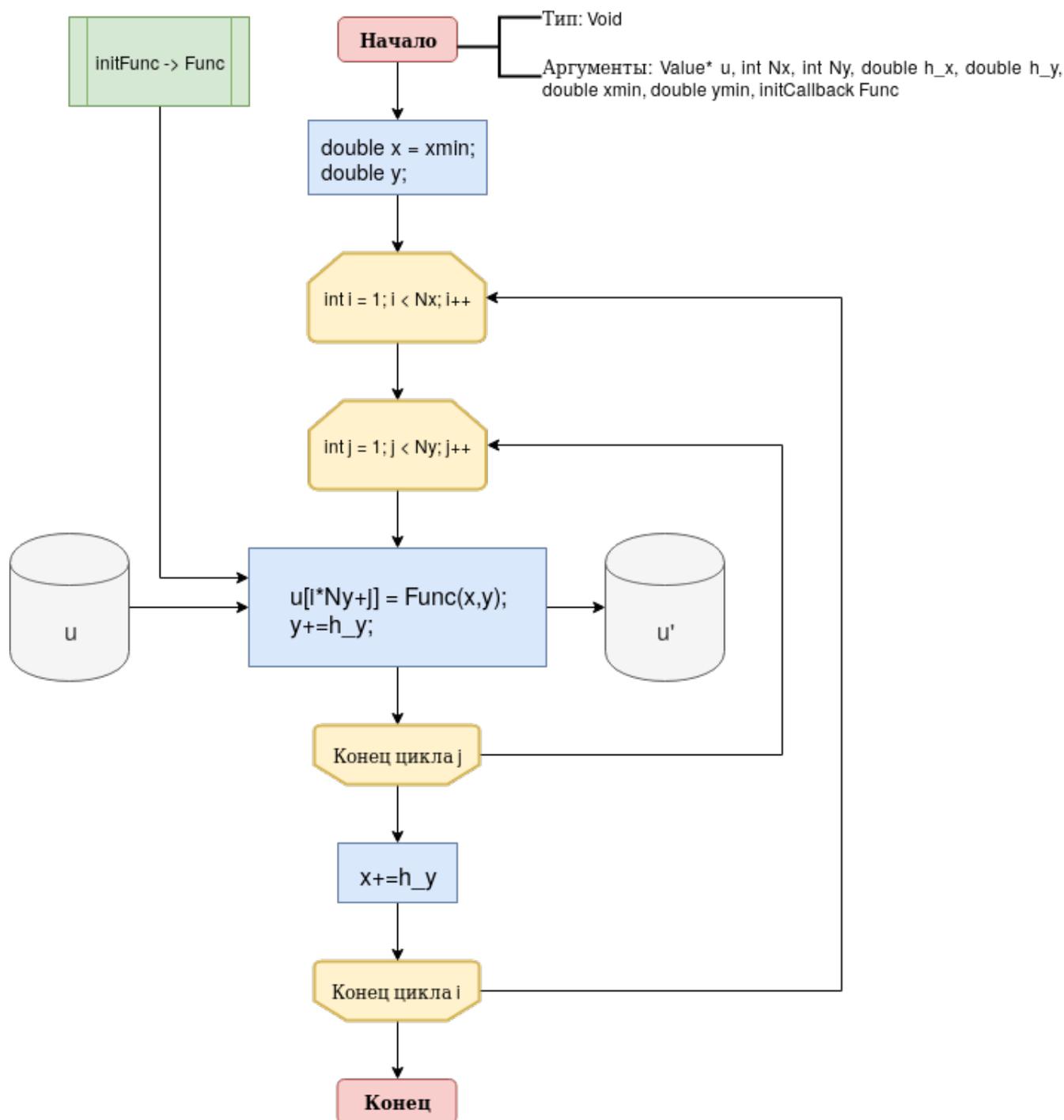


Рисунок 2.3 — Блок-схема процедуры initCond

Данный блок заполняет массив  $u$  дискретными значениями передаваемой функции, обеспечивая процедуру из предыдущего блока входными данными. Вместо  $Func(x,y)$ , которая задана в блоке 3.1, могут использоваться данные произвольного массива.

Блок 3.1 задает функционал  $\text{Func}(x,y)$ , возвращающий значение заданного выражения в точке  $(x, y)$

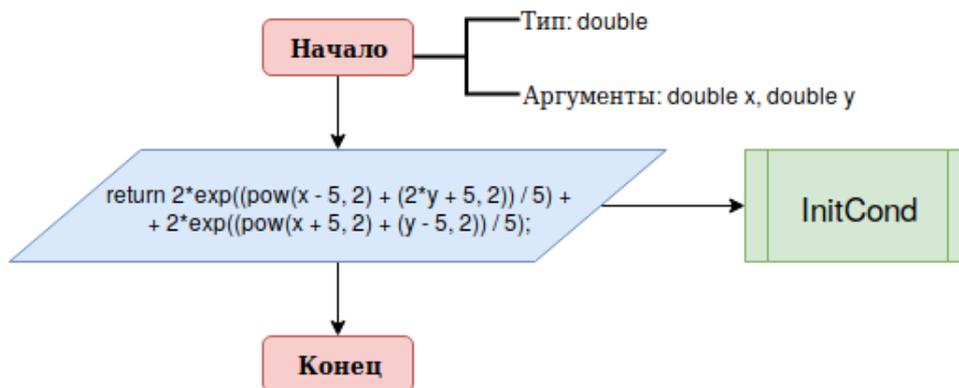


Рисунок 2.4 — Блок-схема процедуры `initFunc`

Блок 4 определяет граничные условия.

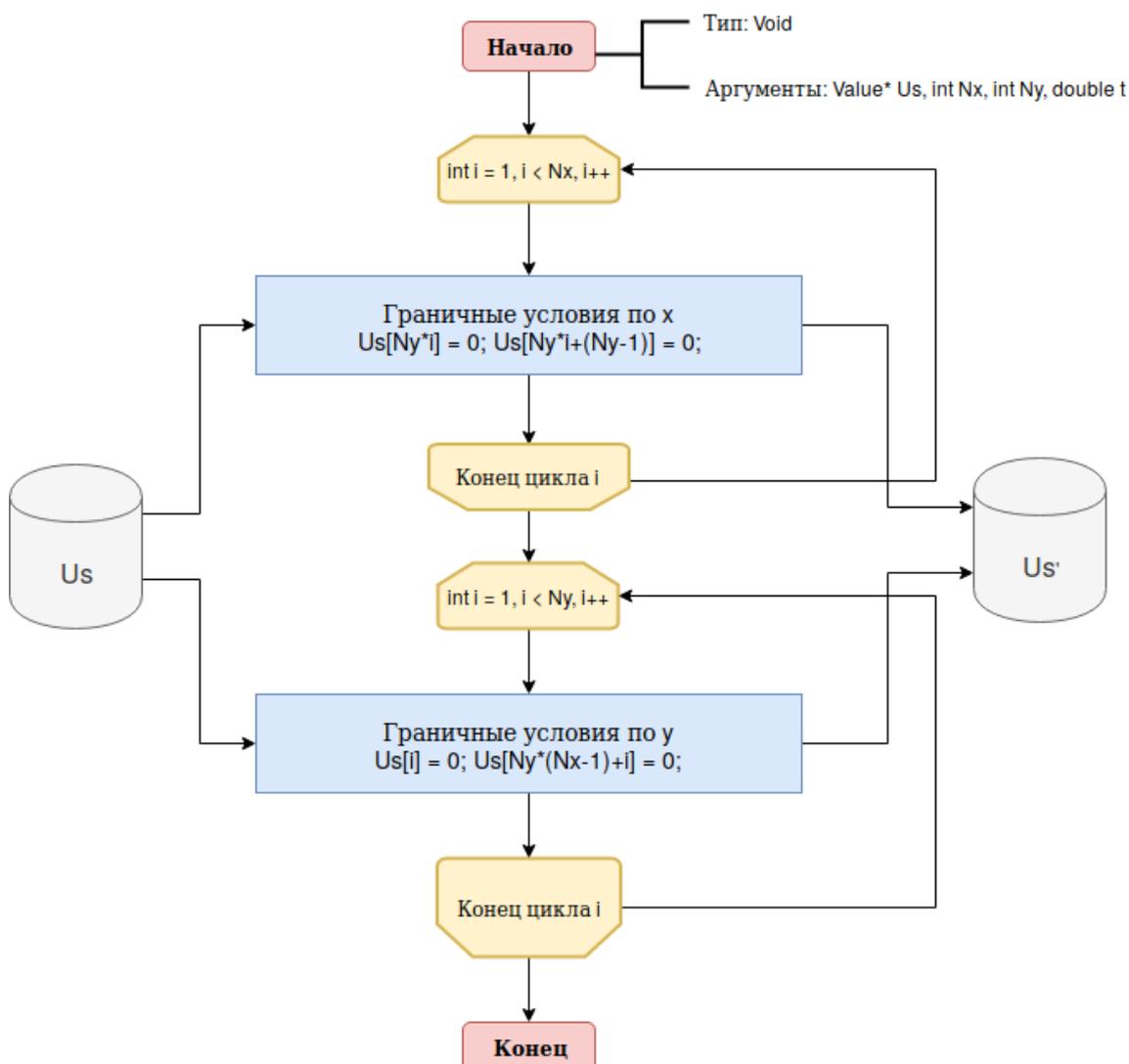


Рисунок 2.5 — Блок-схема процедуры `boundCond`

В общем случае граничные условия зависят от времени, поэтому такой способ представления позволяет производить их преобразование на каждую временную итерацию.

Блок 5 задает функционал, по которому процедура `find_differ` из блока 2 выполняет преобразование входных данных

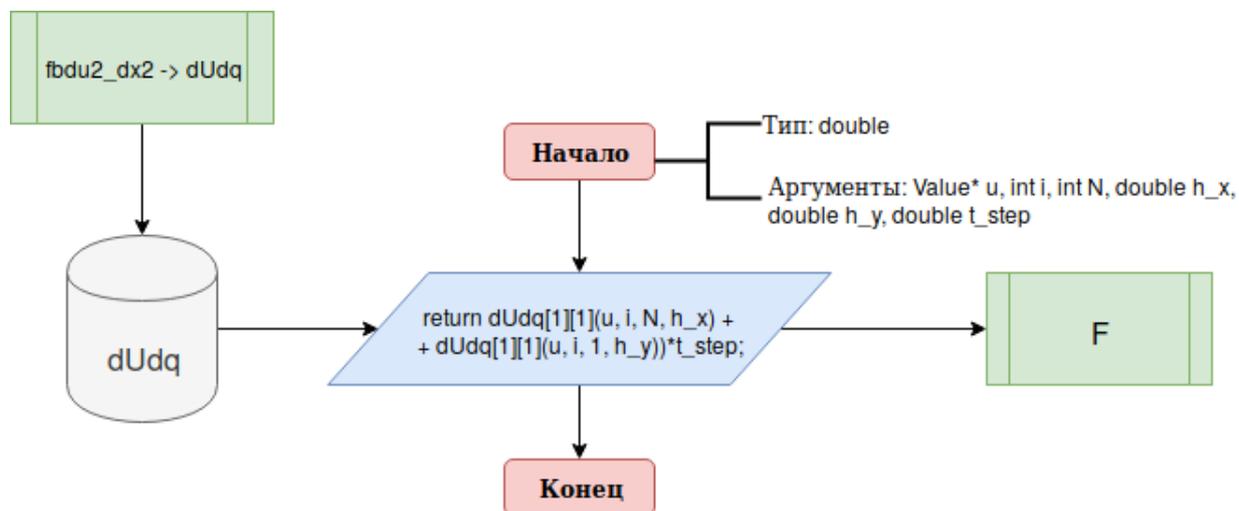


Рисунок 2.6 — Блок-схема процедуры Func

Вид данного функционала определяется видом уравнения, к которому применяется метод конечных разностей.

В последнем блоке 6 находится реализация функции `main`, точки входа, производящие использующая реализации функций, объявленных в предыдущих блоках. Она состоит из трех частей: инициализации, преобразования и вывода данных.

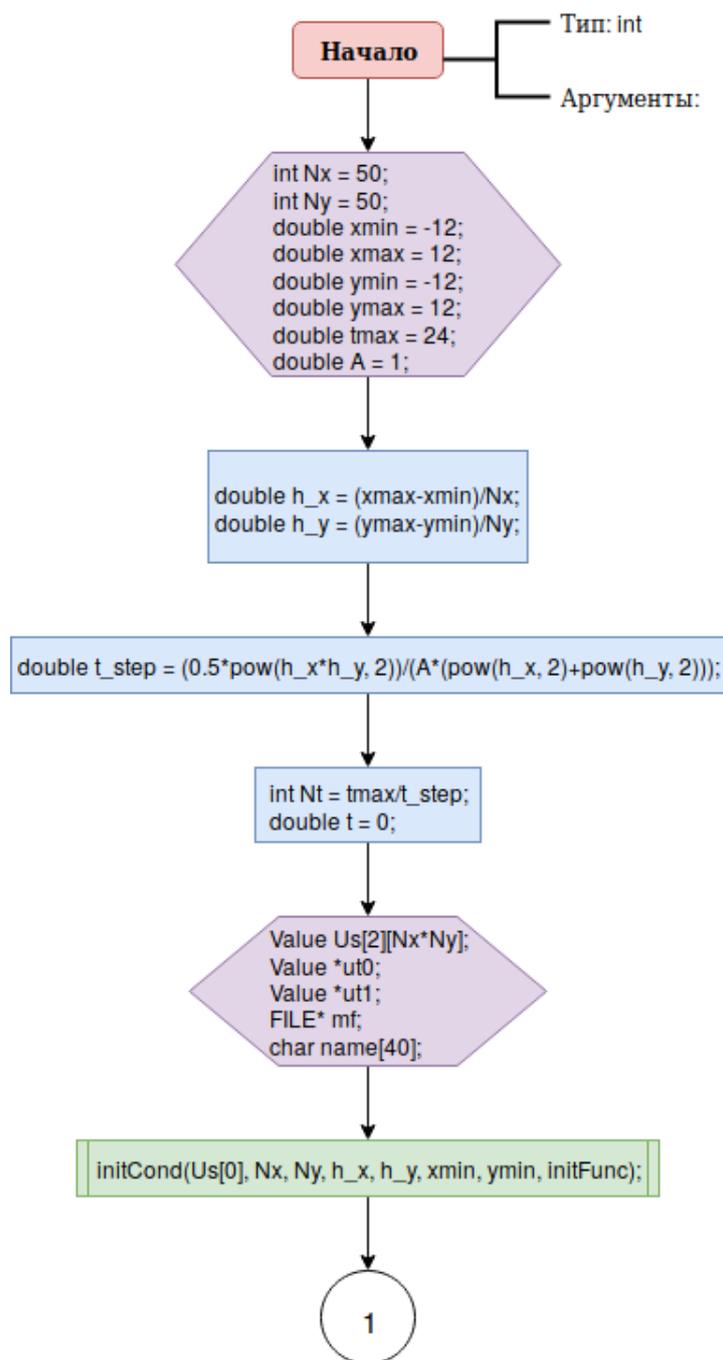


Рисунок 2.7 — Блок-схема процедуры main. Инициализация

В данной части происходит инициализация функции. Здесь присутствуют пара интересных моментов: способ задания шага по времени и массива, в котором производятся расчеты. Шаг по времени задается из соображений вычислительной устойчивости, по нему же рассчитывается число итераций по времени. Такой подход, позволяя не рассчитывать самостоятельно эти величины, не дает возможности контролировать непосредственно число временных итераций.

Способ представления массива  $Us$  в виде двух строк, являющимися соседними временными слоями, как уже было сказано ранее, позволяет обобщение программы на старшие размерности без изменения его структуры, лишь увеличением числа позиций в строках, а так же возможна замена используемой разностной схемы.

На блок-схеме 2.8 изображен процесс преобразования значений, записанных в массив  $Us$

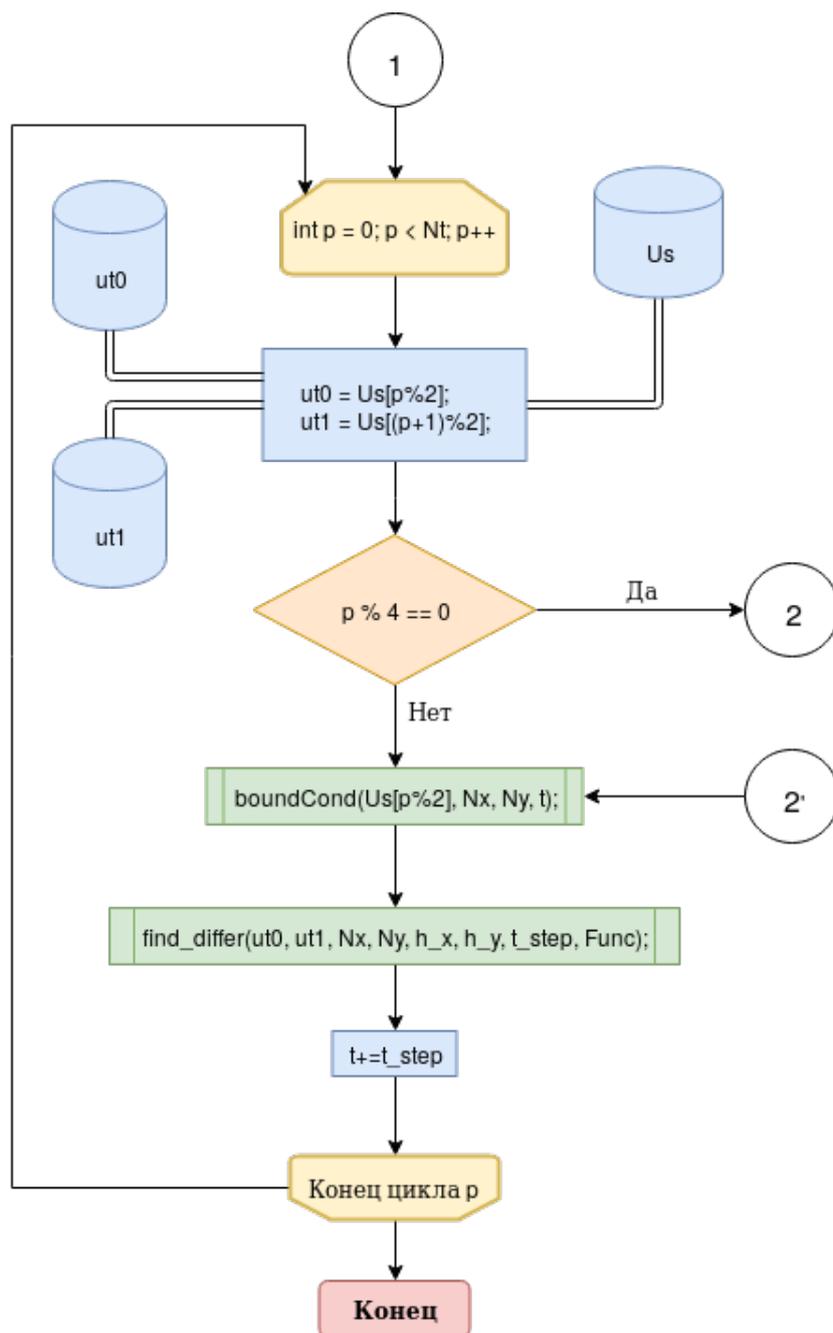


Рисунок 2.8 — Блок-схема процедуры main. Преобразование

Важным элементом данной части является присваивание адресов слоев массива  $Us$ , которое зависит от значения шага по времени  $p$ . Такое действие обеспечивает на каждой итерации передачу второго временного слоя из предыдущей итерации в первый.

Часть, ответственная за вывод данных представлена на блок-схеме 2.8

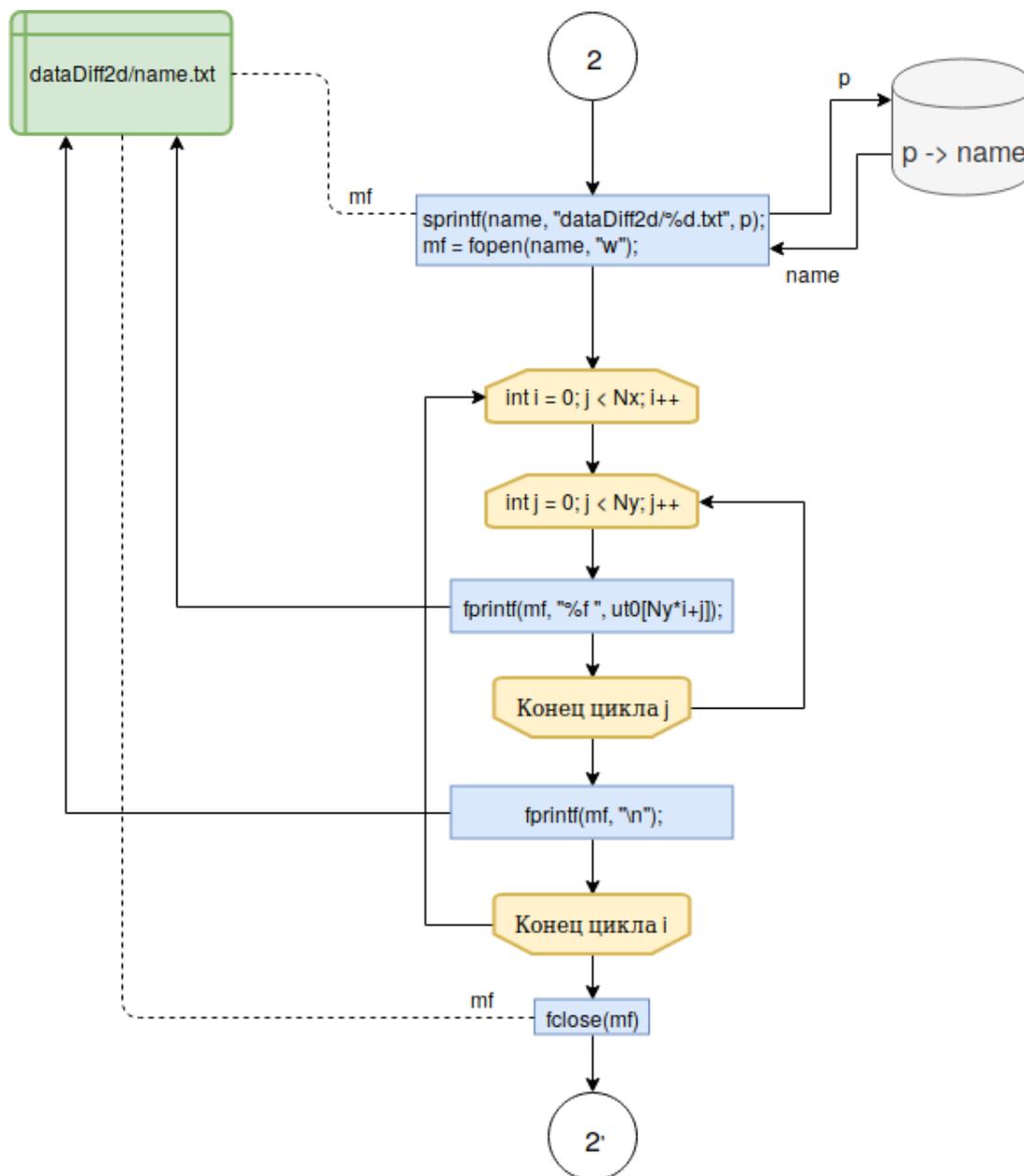


Рисунок 2.9 — Блок-схема процедуры main. Вывод данных

Данная часть по сути является отдельным блоком, который обеспечивает выгрузку рассчитываемых значений. На блок-схеме 2.8 можно было заметить, что из программы выгружаются не все значения, так как из-за малого шага по времени из возникает большое множество.

Основная трудность, возникшая при разработке данной части возникла с автонаименованием файлов выхода. Она была реализована с помощью функции `sprintf`, которая на каждой итерации производила конвертацию величины индекса  $p$ , из типа `int` в тип `char`, который в свою очередь использовался уже как заголовок для файла.

## 2.2. Результаты работы алгоритма

Работа алгоритма была проверена на одномерной и двумерной однородной задаче теплопроводности, а так же был проведен анализ невязки для этих двух случаев

- Одномерное уравнение: число точек  $N_x = 40$ , интервал  $x \in [0; 2]$ , начальное условие

$$f(x) = 6 \sin \frac{3\pi x}{2}$$

Шаг по координате был вычислен на основании числа точек и интервала, равен  $h = \frac{x_{max} - x_{min}}{N_x - 1} \approx 0.0513$ . Шаг по времени на основании (1.8) для предельного случая равен  $\Delta t \approx 0.00132$

Ниже представлены графики функции  $u(x)$  и невязки

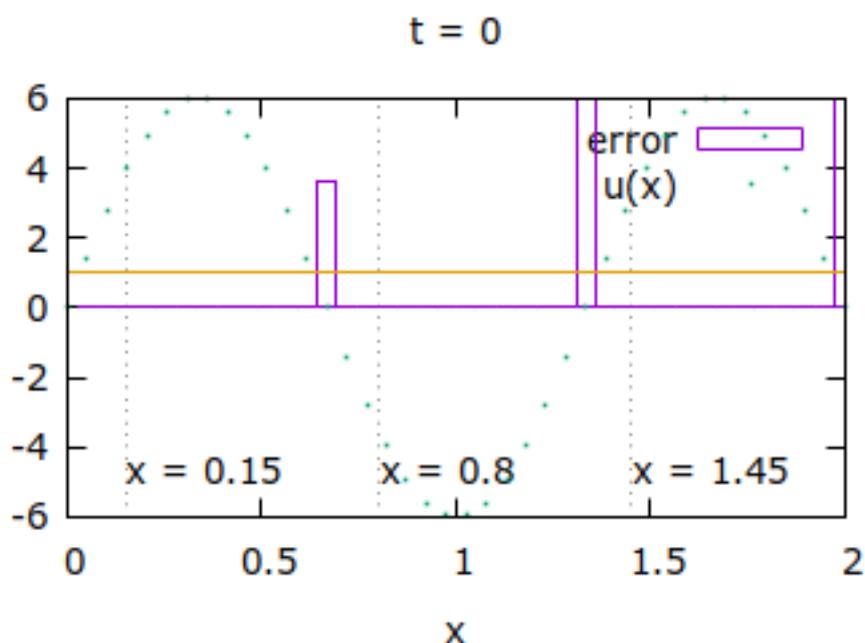


Рисунок 2.10 — График уравнения 1-мерного теплопроводности и невязки, шаг по времени 0

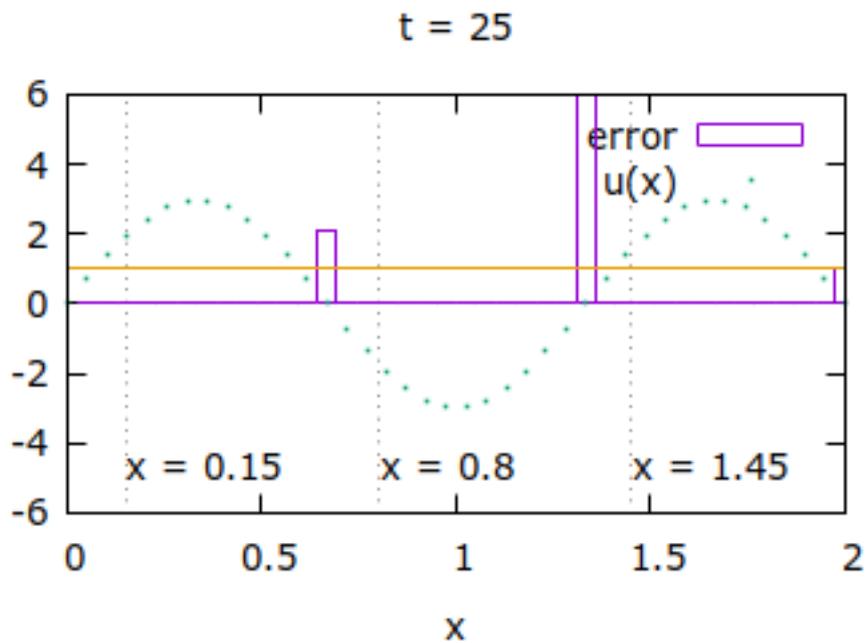


Рисунок 2.11 — График уравнения 1-мерного теплопроводности и невязки, шаг по времени 25

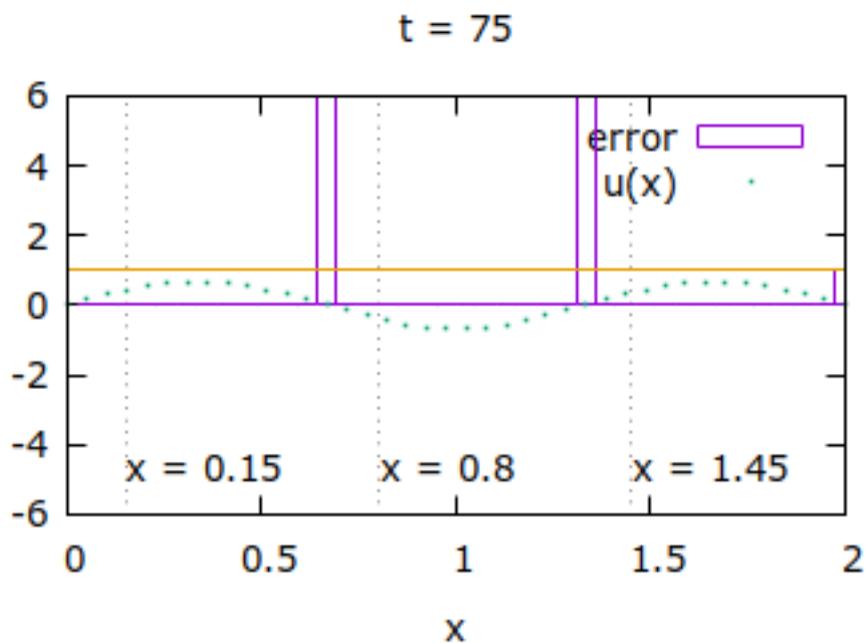


Рисунок 2.12 — График уравнения 1-мерного теплопроводности и невязки, шаг по времени 75

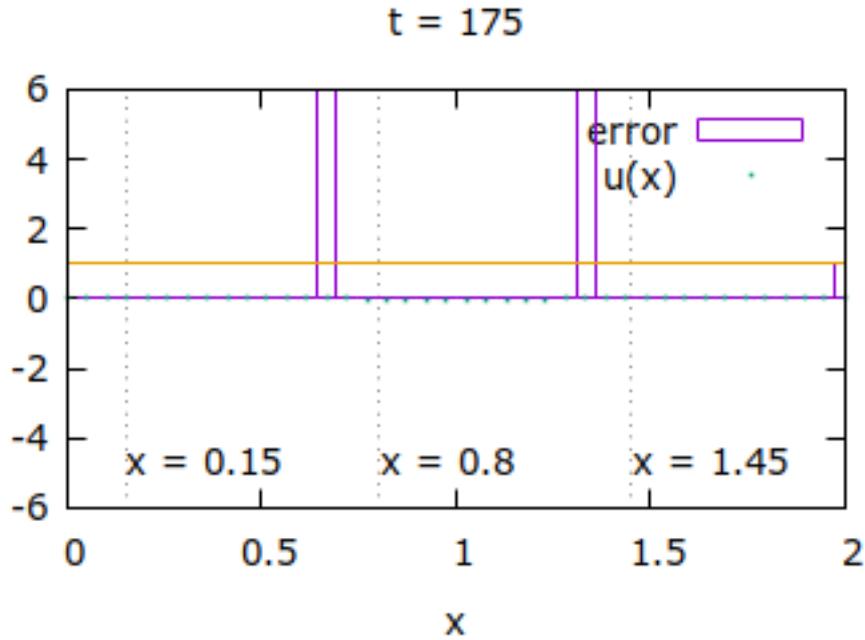


Рисунок 2.13 — График уравнения 1-мерного теплопроводности и невязки, шаг по времени 175

В таблице 2.1 представлены численные значения невязки в точках  $x = 0.15; 0.8; 1.45$ , отмеченных на графике пунктирными линиями

Таблица 2.1 — Невязка численного и аналитического значения для 1-мерного случая

$x \backslash t$	0	25	75	175
0.15	-	$2.25 \cdot 10^{-2}$	$7.87 \cdot 10^{-3}$	$2.08 \cdot 10^{-2}$
0.8	-	$2.25 \cdot 10^{-2}$	$7.87 \cdot 10^{-3}$	$2.08 \cdot 10^{-2}$
1.45	-	$2.25 \cdot 10^{-2}$	$7.87 \cdot 10^{-3}$	$2.08 \cdot 10^{-2}$

- Двумерное уравнение: число точек  $N_x = 61, N_y = 61$  интервал  $x \in [-12; 12], y \in [-12; 12]$  начальное условие

$$f(x, y) = 5 \sin \frac{\pi x}{12} \sin \frac{\pi y}{12}$$

Шаг по координатам  $h_x = 0.4, h_y = 0.4$ , по времени, на основании (1.9)  $\Delta t = 0.04$

Решение и невязка выглядят следующим образом

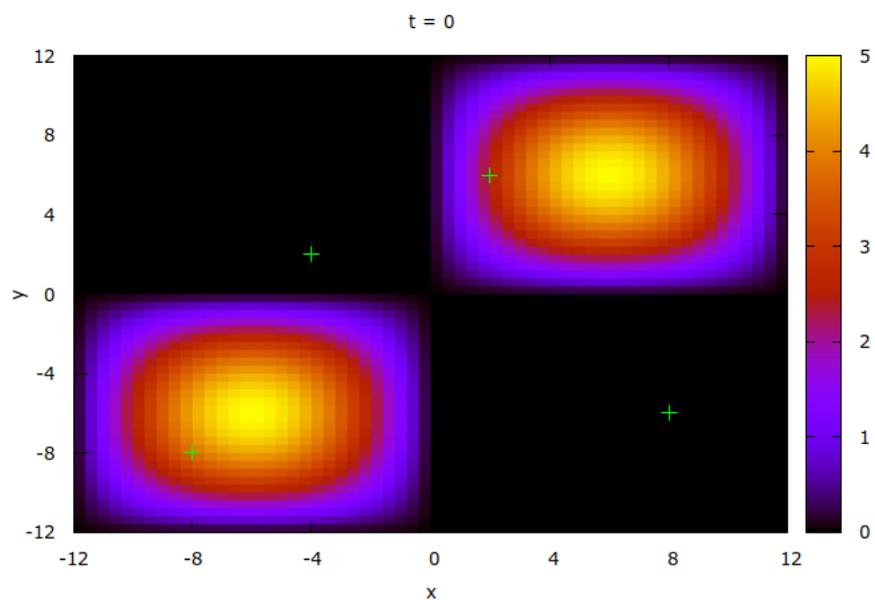


Рисунок 2.14 — Решение 2-мерного уравнения теплопроводности, шаг по времени 0

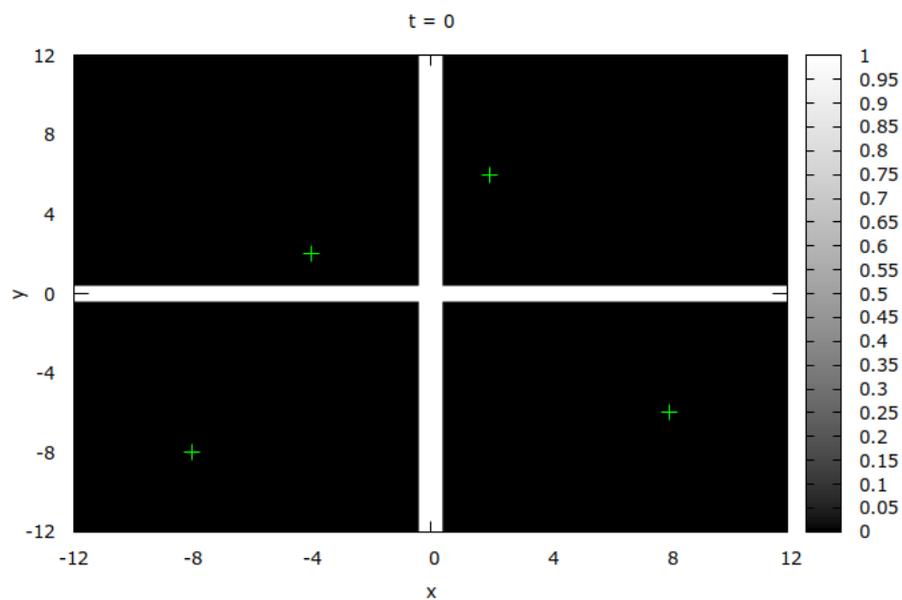


Рисунок 2.15 — Невязка решения, шаг по времени 0

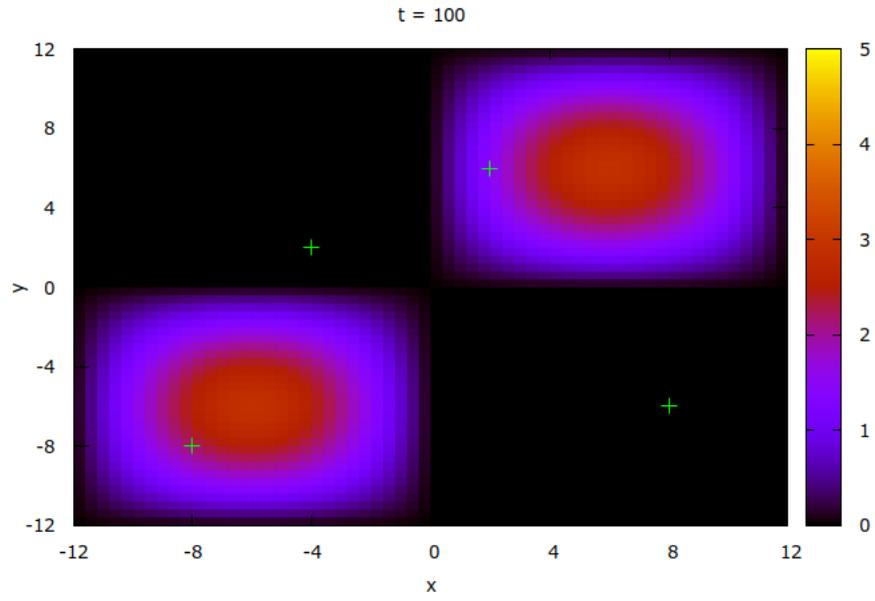


Рисунок 2.16 — Решение 2-мерного уравнения теплопроводности, шаг по времени 100

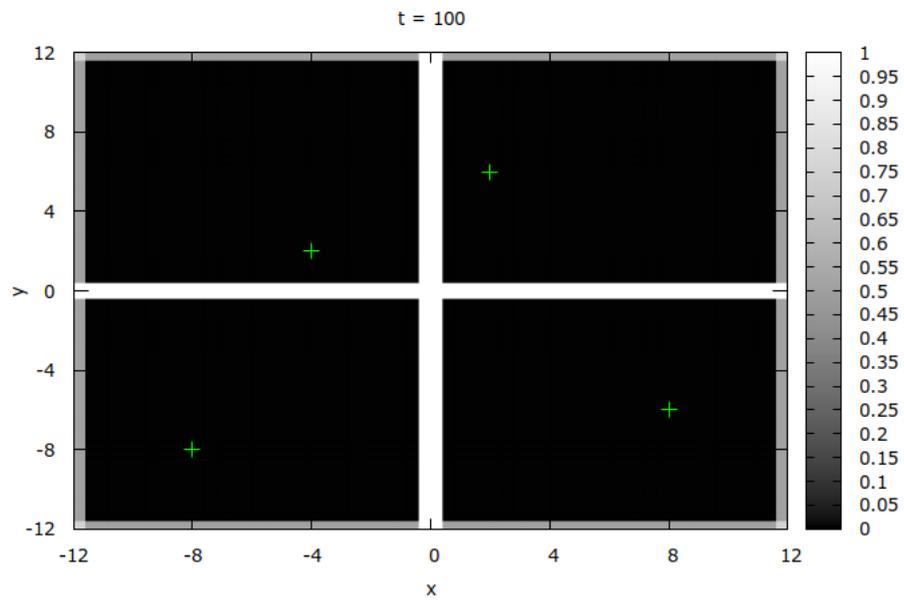


Рисунок 2.17 — Невязка решения, шаг по времени 100

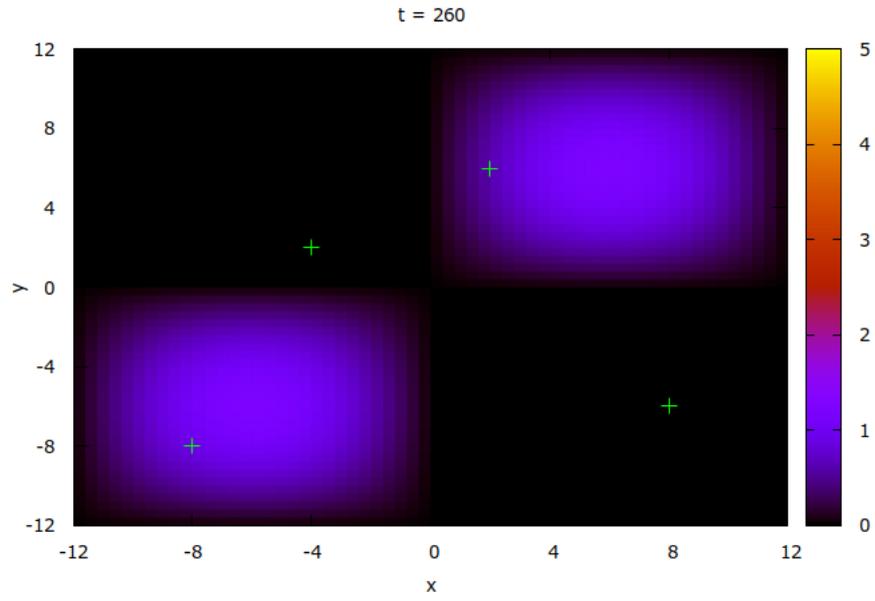


Рисунок 2.18 — Решение 2-мерного уравнения теплопроводности, шаг по времени 260

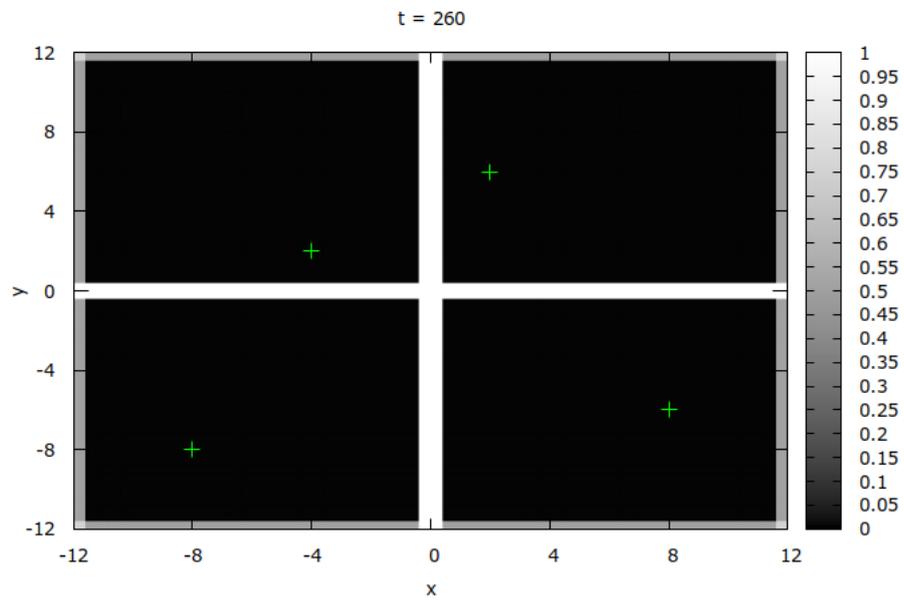


Рисунок 2.19 — Невязка решения, шаг по времени 260

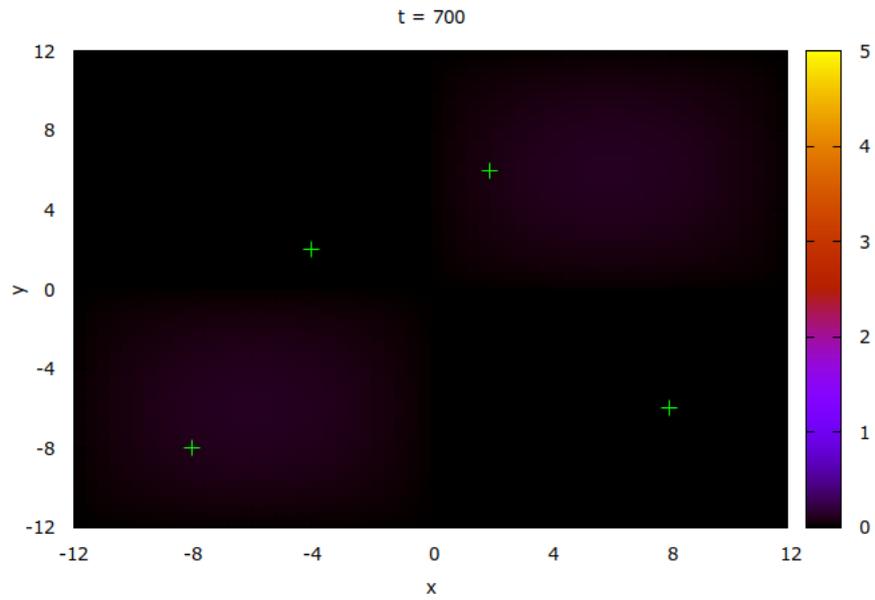


Рисунок 2.20 — Решение 2-мерного уравнения теплопроводности, шаг по времени 700

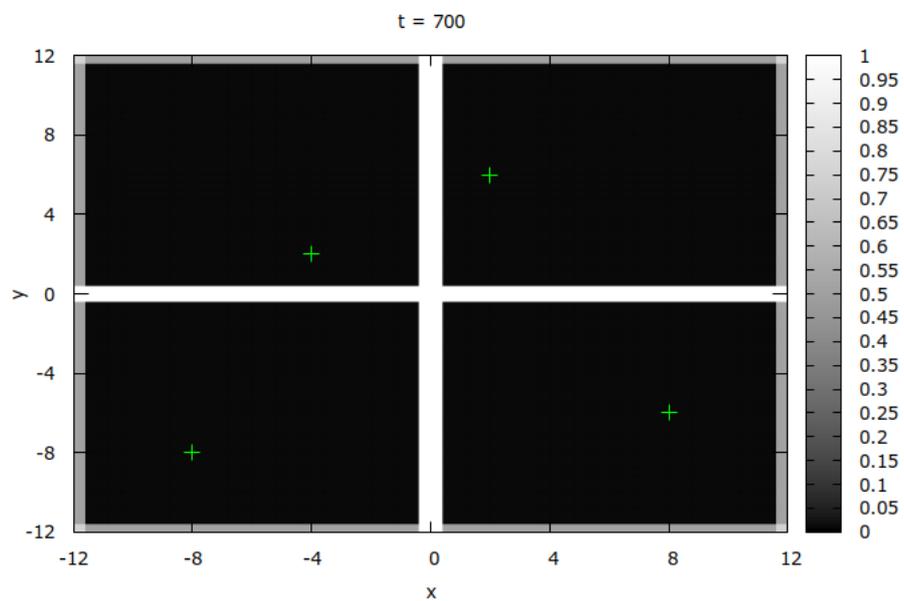


Рисунок 2.21 — Невязка решения, шаг по времени 700

Численные значения невязки для отмеченных точек представлены в таблице 2.2

Таблица 2.2 — Невязка численного и аналитического значения для 2-мерного случая

(x; y) \ t	0	100	260	700
(-8; -8)	-	$1 \cdot 10^{-3}$	$2.61 \cdot 10^{-3}$	$7.01 \cdot 10^{-3}$
(-4; 2)	-	$1 \cdot 10^{-3}$	$2.61 \cdot 10^{-3}$	$7.01 \cdot 10^{-3}$
(8; -6)	-	$1 \cdot 10^{-3}$	$2.61 \cdot 10^{-3}$	$7.01 \cdot 10^{-3}$
(2; 6)	-	$1 \cdot 10^{-3}$	$2.61 \cdot 10^{-3}$	$7.01 \cdot 10^{-3}$

В полученных результатах величина невязки не превышает 5 процентов, что свидетельствует о хорошей согласованности численного решения с аналитическим.

### 2.3. Анализ устойчивости алгоритма

В разделе 2.2 вычисления производились с использованием условия устойчивости, которое было получено из соображений, приведенных в статье [16], кратко описанных в разделе 1.4. Поскольку ограничение на шаг, устанавливаемое соотношением (1.9) определяет верхнюю границу шага по времени, возможна установка такого ограничения, при котором будет уменьшена вычислительная стоимость, а решение будет сходиться до определенной временной итерации. Объектом исследования является временной шаг, после которого происходит "взрыв вычислений при котором эволюция решения принимает хаотический характер.

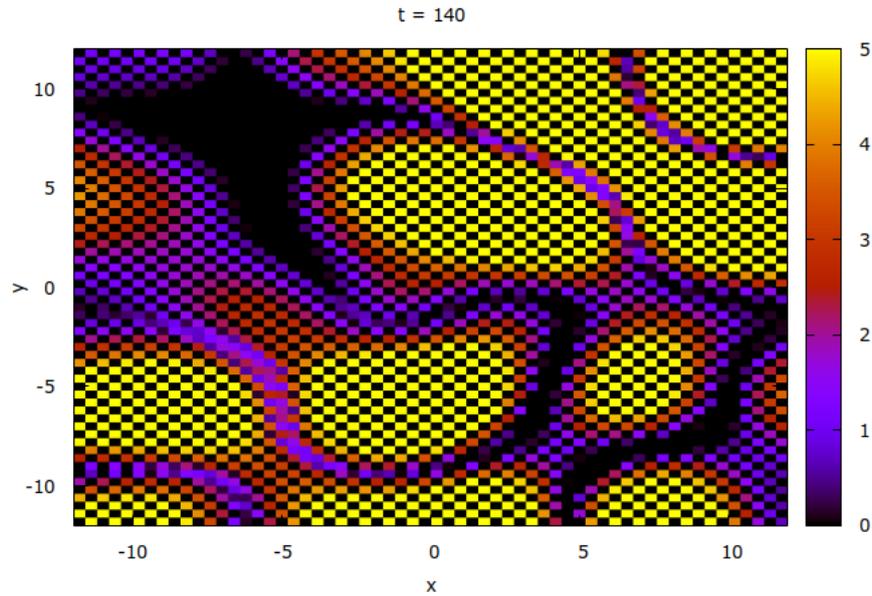


Рисунок 2.22 — Иллюстрация нарушения вычислительной устойчивости при шаге  $\Delta t = 0.08$

Проверка производилась для значений временного шага  $\Delta t$  в промежутке от 0.04 до 0.08. Результат представлен на рисунке 2.23

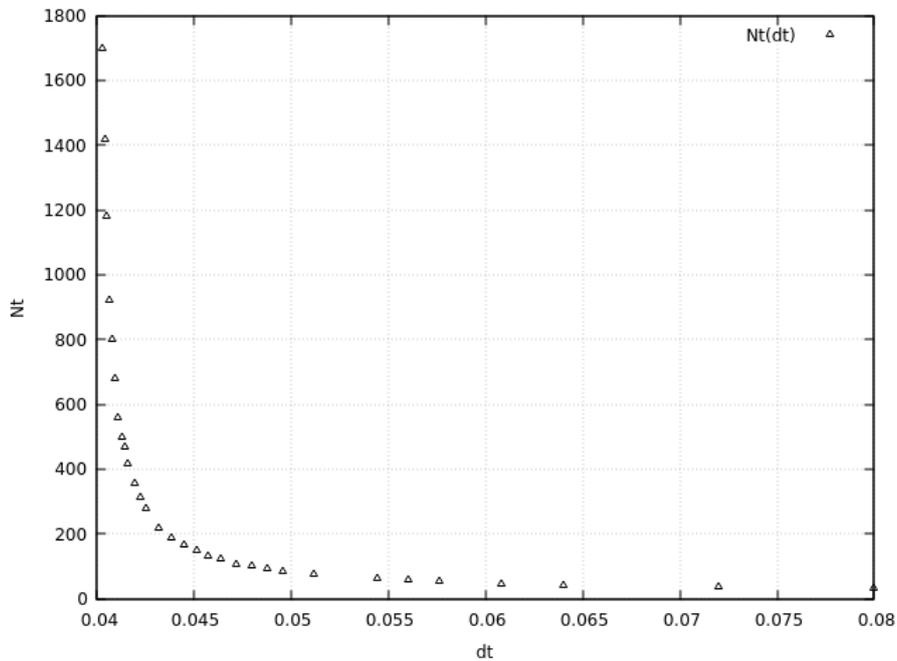


Рисунок 2.23 — Зависимость  $N_t(\Delta t)$

Очевидно, что зависимость  $N_t(\Delta t)$  имеет гиперболический характер, из-за чего невозможно эффективное уменьшение вычислительной стоимости.

Для наглядности на рисунке 2.24 представлена зависимость момента времени, когда происходит нарушение устойчивости, от временного шага

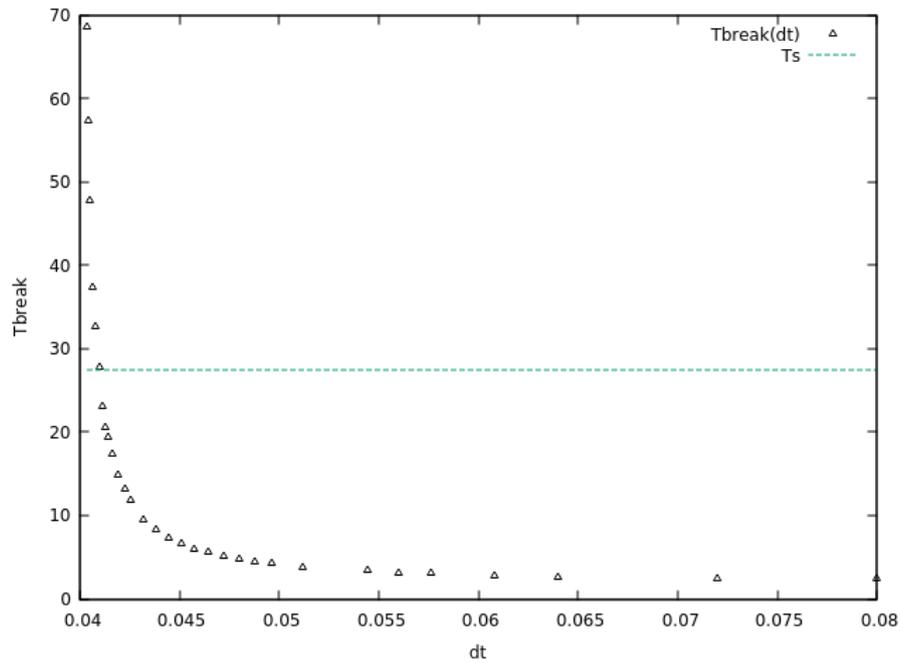


Рисунок 2.24 — Зависимость  $T_{break}(\Delta t)$

Пунктирной линией отмечено время, при котором решение обращается в 0. Таким образом, решение имеет условную сходимость в промежутке от 0.04 до 0.041.

### **3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В наше время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, масштаб которого оценить на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсноэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой пользой разработки. Оценка коммерческой ценности, или иначе потенциала, разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научных исследований и коммерциализации их результатов. Это важно для разработчиков, которые должны иметь представление о состоянии и перспективах проводимых научных исследований. При помощи таких оценок научный сотрудник может найти партнера для проведения дальнейших исследований, коммерциализации результатов исследований и реализации производства.

Цели главы: определить коммерческий потенциал и успешность научно-исследовательского проекта; разработать механизмы управления и сопровождения проектных решений на этапе реализации.

Для достижения целей необходимо решить следующие задачи:

- разработать общую экономическую идею проекта, сформировать концепцию проекта;
- определить возможные альтернативы проведения научных исследований;
- совершить планирование научно-исследовательских работ;
- произвести оценку коммерческого потенциала и перспективности научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определить ресурсную, финансовую, бюджетную, социальную и экономическую эффективность исследования.

3.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

### 3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является обобщенная реализация конечноразностного метода для решения дифференциальных уравнений параболического типа. Оценка практической применимости производилась на решении задач теплопроводности для одномерного и двумерного случаев. О коммерческом потенциале данного исследования на данном этапе работы говорить рано. Данная обобщенная реализация конечноразностного метода может быть полезной при исследовании нестационарных процессов, таких как диффузия или сверхпроводимость, а также может быть использована в разработке программного обеспечения, моделирующего физические процессы. В качестве заинтересованных лиц могут выступать организации и специалисты, сфера деятельности которых затрагивает следующие области:

- Моделирование физических процессов;
- Вычислительная математика;
- научные исследования в области сверхпроводимости.

### 3.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ внутренних и внешних факторов научно- исследовательского проекта, направленный на оценку рисков и конкурентоспособности проекта на рынке.

Сильными сторонами данной научно-исследовательской работы можно назвать следующие особенности:

- С1: высокая производительность алгоритма
- С2: алгоритм позволяет решать широкий спектр задач параболического типа;
- С3: согласованность получаемых результатов с теоретическими расчетами;
- С4: отсутствует необходимость высокого уровня знаний языков программирования;
- С5: отсутствует необходимость применения стороннего программного обеспечения для получения результатов.

Слабыми сторонами данной научно-исследовательской работы можно назвать следующие свойства и особенности:

- Сл1: неполная универсальность предложенной реализации;
- Сл2: для визуализации результатов требуется стороннее программное обеспечение;
- Сл4: отсутствие кроссплатформенности.

К возможностям данной работы можно отнести:

- В1: включение алгоритма в состав большего пакета для физического моделирования;
- В2: запуск на универсальной операционной системе;
- В3: использование бесплатного программного обеспечения для визуализации

К угрозам данной работы можно отнести:

- У1: сбои в работе ЭВМ;
- У2: грубые ошибки при использовании алгоритма;
- У3: отсутствие коммерческого интереса к работе.

Для более подробного рассмотрения перспектив разработки в таблице 3.1 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон проекта с его возможностями.

Таблица 3.1 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	+	0	0
	B2	+	-	-	0	0
	B3	-	-	0	+	+
Угрозы проекта	У1	0	0	-	0	-
	У2	0	-	-	0	0
	У3	+	+	+	-	+
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3		
	B1	-	0	-		
	B2	-	+	+		
	B3	0	-	+		
Угрозы проекта	У1	0	+	-		
	У2	+	-	-		
	У3	+	+	+		

В таблице 3.2 представлена итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 3.2 – Матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>  С1: высокая производительность алгоритма;  С2: алгоритм позволяет решать широкий спектр задач параболического типа;  С3: согласованность получаемых результатов с теоретическими расчетами;  С4: отсутствует необходимость высокого уровня знаний языков программирования;  С5: отсутствует необходимость применения стороннего программного обеспечения для получения результатов.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>  Сл1: неполная универсальность предложенной реализации;  Сл2: для визуализации результатов требуется стороннее программное обеспечение;  Сл3: отсутствие кроссплатформенности.</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1: включение алгоритма в состав большего пакета для физического моделирования;  В2: запуск на универсальной операционной системе;  В3: использование бесплатного программного обеспечения для визуализации.</p>	<p>1. Создание модульного пакета физического моделирования, который будет включать в себя данную реализацию;  2. Добавление к данному алгоритму инструментов визуализации результатов для создания единой программы.</p>	<p>1. Доработка алгоритма для обеспечения большей универсальности и возможности его применения на различных платформах;  2. Реализация своего метода визуализации результатов.</p>
<p><b>Угрозы:</b>  У1: сбои в работе ЭВМ;  У2: грубые ошибки при использовании алгоритма;  У3: отсутствие коммерческого интереса к работе.</p>	<p>1. Тестирование алгоритма на простых аналитических задачах;  2. Создание методических указаний к работе с программой.</p>	<p>Привлечение специалистов в области программирования для выявления и исправления проблемных мест в реализации</p>

## 3.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и инженеры, техники и лаборанты, при этом численность групп может варьироваться от 3 до 15 человек. В рамках данной научно-исследовательской работы была сформирована рабочая группа, в состав которой вошли:

- научный руководитель;
- научный консультант;
- студент.

Порядок следования этапов и работ, а также распределение обязанностей по данным видам работ, приведен в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследования	2	Выбор направления исследования	Научный руководитель; Научный консультант
	3	Разработка методики проведения исследования	Научный руководитель; Научный консультант;
	4	Календарное планирование работ по теме исследования	Научный руководитель
Теоретические исследования	5	Подбор и изучение литературы по теме исследования	Научный консультант; Студент
	6	Освоение языка программирования	Студент
	7	Реализация алгоритма для одномерной и двумерной задачи с заданным начальным условием	Студент
	8	Промежуточная оценка полученных результатов	Научный консультант; Студент
Практическая часть:	9	Реализация обобщенного алгоритма	Студент
	10	Тестирование алгоритма	Студент
Оценка результатов и оформление отчета по НИР	11	Проверка и анализ итоговых результатов	Научный руководитель; Студент
	12	Оформление итогов работы	Студент
	13	Составление пояснительной записки	Студент
	14	Подготовка работы к защите	Студент

### 3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

В большинстве случаев, трудовые затраты образуют основную часть стоимости проекта, поэтому важно определить трудоемкость работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования выражается в человеко-днях, и носит вероятностный характер. Ожидаемое значение трудоемкости  $t_{ож_i}$  вычисляется по формуле:

$$t_{ож_i} = \frac{3t_{\min_i} + 2t_{\max_i}}{5},$$

где  $t_{ож_i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{min_i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{max_i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Из  $t_{ож_i}$  определяются продолжительность каждой из работ в рабочих днях, учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i},$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;  $Ч_i$  – количество исполнителей, выполняющих одну и ту же  $i$ -ю работу.

### 3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Гантта – это вид столбчатых диаграмм, используемые для иллюстрации графика работ по проекту. Работы по проекту представляются в виде отрезков, расположенных на горизонтальной шкале времени. Начало, конец и длина отрезка характеризуют начало, конец и срок выполнения работы.

Для построения диаграммы, длительность каждого из этапов работ переводится в календарные дни по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{кал},$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях;  $k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности вычисляется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

где  $T_{кал}$  – количество календарных дней в году;  $T_{вых}$  – количество выходных дней в году;  $T_{пр}$  – количество праздничных дней в году.

Результаты вычислений, полученные по вышеприведенным формулам, представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Временные показатели проведения научного исследования.

Название работы	Трудоемкость работ									Длительность в раб. днях, $T_{p_i}$			Длительность работ в календарных днях, $T_{k_i}$		
	$t_{\min_i}$ , чел.-дни			$t_{\max_i}$ , чел.-дни			$t_{\text{ож}_i}$ , чел.-дни								
	С	К	Р	С	К	Р	С	К	Р	С	К	Р	С	К	Р
1. Составление и утверждение технического задания	-	-	1	-	-	3	-	-	1,8	-	-	2	-	-	3
2. Выбор направления исследования	2	1	1	3	2	2	2,4	1,4	1,4	1	0,5	0,5	1,5	1	1
3. Разработка методики проведения исследования	-	3	2	-	7	6	-	4,6	3,6	-	2	2	-	3	3
4. Календарное планирование работ по теме исследования	-	-	1	-	-	3	-	-	1,8	-	-	2	-	-	3
5. Подбор и изучение литературы по теме исследования	7	4	-	10	7	-	8,2	5,2	-	4	2,5	-	6	4	-
6. Освоение языка программирования	4	-	-	8	-	-	5,6	-	-	5,5	-	-	8	-	-
7. Реализация алгоритма для одномерной и двумерной задачи с заданным начальным условием	10	-	-	16	-	-	12,4	-	-	12,5	-	-	18,5	-	-
8. Промежуточная оценка полученных результатов	2	1	-	5	2	-	3,2	1,4	-	1,5	1	-	2	1,5	-
9. Реализация обобщенного алгоритма	14	-	-	19	-	-	16	-	-	16	-	-	23,5	-	-
10. Тестирование алгоритма	3	-	-	5	-	-	3,8	-	-	4	-	-	6	-	-

Продолжение таблицы 3.4

11. Проверка и анализ итоговых результатов	2	-	1	3	-	2	2,4	-	1,4	1	-	1	1,5	1,5	-
12. Оформление итогов работы	1	-	-	2	-	-	1,4	-	-	1,5	-	-	2	-	-
13. Составление пояснительной записки	2	-	-	3	-	-	2,4	-	-	2,5	-	-	4	-	-
14. Подготовка работы к защите	3	-	-	6	-	-	4,2	-	-	4	-	-	6	-	-

На основе данных таблицы 3.4 строится календарный план-график в виде диаграммы Гантта. График строится для максимального по времени исполнения работ в рамках проекта и представлен в таблице 3.5 с разделением по неделям и месяцам за период дипломирования.

Таблица 3.5 – Календарный план-график проведения ВКР

Название работы	Исполнитель	$T_{k_i}$ , кал. дни	Продолжительность выполнения работ													
			Февраль			Апрель			Май							
			1	2	3	1	2	3	1	2	3					
1. Составление и утверждение технического задания	Руководитель	3	■													
2. Выбор направления исследования	Руководитель	1	■													
	Науч. Конс.	1	■													
	Студент	1,5	■													
3. Разработка методики проведения исследования	Руководитель Науч. Конс.	6	■	■												
4. Календарное планирование работ по теме исследования	Руководитель	3	■													
5. Подбор и изучение литературы по теме исследования	Науч. Конс.	10		■												
	Студент			■	■											
6. Освоение языка программирования	Студент	8			■											



### 3.2.4 Бюджет научно-технического исследования

При формировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе планирования бюджета НТИ затраты группируются по следующим статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных исследований;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- научные затраты и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

#### 3.2.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 11. Затраты составили, амортизационные издержки, так как написание программы производилось самостоятельно, а также расходы на электроэнергию и печать.

Стоимость ноутбука составляет 58 тыс. рублей. Срок службы ноутбуку в днях 1825 (5 лет). Получаем, что за 52 дня выполнения работы амортизационные издержки составят 2543 рублей. Затраты на бумагу и электроэнергию приведены в разделе накладных расходов.

#### 3.2.4.2 Основная заработная плата исполнителей работы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме.

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} * T_p,$$

где  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата;  $T_p$  – количество рабочих календарных дней.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m * M}{F_d}$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно- технического персонала, раб. дни (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	52
– праздничные дни.	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	48	48
– больничный отпуск.	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = k_p * Z_{тс}$$

где  $k_p$  – районный коэффициент (для г. Томска равен 1,3);  $Z_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.

Аналогичные вычисления проводятся для студента бакалавра. Для студента заработная плата берется в размере 9893 рублей. Результаты расчетов представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$ , руб.	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Научный руководитель	33664	1.3	43763	1813	10	18133
Студент	9893	1.3	12861	533	52	27710
Итого, руб.:						45843

#### 3.2.4.3 Дополнительная заработная плата исполнителей работы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей работы учитывают величину предусмотренных ТК РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} * Z_{осн}$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы. Выберем коэффициент  $k_{доп}$  равным 0,12. Тогда дополнительная заработная плата для научного руководителя будет следующей:

$$Z_{доп} = 2176 \text{ руб.}$$

#### 3.2.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые фонды)

В данном разделе расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} * (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}})$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30% в 2018 от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением НИОКР [17]. На основании пункта 1 ст.58 закона № 212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, водится пониженная ставка – 27,1 %.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды от затрат на оплату труда научному руководителю представлен в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Отчислений во внебюджетные фонды

Наименование	Научный руководитель	Студент
Основная заработная плата, руб.	18133	27710
Дополнительная заработная плата, руб.	2176	—
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0.271	0.271
Итоговая сумма отчислений, руб.	5504	7510

#### 3.2.4.5 Накладные расходы

Затраты на электроэнергию во время выполнения ВКР составили:

$$C = C_{\text{эл}} * P * F_{\text{об}} = 5,8 * 0,7 * 312 = 1267 \text{ руб.}$$

где  $C_{\text{эл}}$  – тариф на промышленную электроэнергию, руб.;  $P$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;  $F_{\text{об}}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на использование бумажного носителя составили  $200 * 1 = 200$  руб.

### 3.2.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование	Сумма, руб.
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	45843
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	2176
Отчисления во внебюджетные фонды	13014
Накладные расходы	1267
Бюджет затрат НИИ	62300

### 3.2.5 Выводы по разделу финансовый менеджмент

Изучение потенциальных потребителей разработки показало, что основной областью применения является моделирование физических процессов и вычислительная математика, а именно численные расчеты ДУ в ЧП. В меньшей степени разработка может быть применена в области теоретической экономики.

Анализ конкурентоспособности и SWOT-анализ наглядно демонстрируют преимущества разработки. Также в данном разделе были распределены обязанности выполнения работ, составлен график проведения работ и затраты на её проведения

#### 4. Социальная ответственность

В связи с различными чрезвычайными ситуациями, возникающими на предприятии, важным является обеспечение безопасности рабочих мест, профилактика и предотвращение возможных опасных ситуаций. Основным направлением профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. Параллельно с этим должно осуществляться последовательное повышение качества и эффективности средств коллективной и индивидуальной защиты от опасных и вредных факторов производства, увеличение объема их выпуска до полного удовлетворения потребностей народного хозяйства, и рациональное их использование.

Охрана труда — это система сохранения жизни и здоровья рабочих в процессе трудовой деятельности, включающая в себя технические, правовые, социально-экономические, организационные, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия [18].

Не существует полностью безвредного и безопасного производства. Задача охраны труда — минимизация рисков травматизма или заболевания рабочего с одновременным обеспечением комфорта на рабочем месте при максимальной производительности труда. Как правило, реальные производственные условия характеризуются наличием опасных и вредных факторов производства.

Согласно статье 209 ТК РФ, опасным называется такой производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме.

Согласно статье 209 ТК РФ, вредным производственным фактором называется такой фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию.

#### 4.1 Анализ опасных и вредных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

В выпускной квалификационной работе была написана обобщенная реализация конечноразностного метода. В таблице 4.1 приведены основные вредные и опасные факторы производственного процесса.

Таблица 4.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ, ОЯТЦ НИ ТПУ	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и так далее)	—	СанПин 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038.-82 ССБТ. Электробезопасность
	—	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р.12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность

На бакалавра, работа которого связана с моделированием на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие ионизирующего излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

## 4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

### 4.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. В случае успешной сдачи, сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту квалификационная группа по технике безопасности, подтверждаемая удостоверением специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки, не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед началом работы.

## 4.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 13.

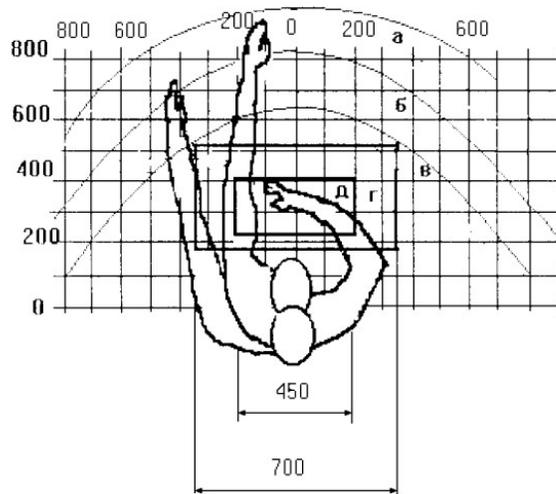


Рисунок 4.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- в центре зоны **а** размещается дисплей;
- клавиатура – в зоне **г/д**;
- слева в зоне **б** размещается системный блок;
- справа в зоне **а** находится принтер;
- документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони **в** (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, постоянно не используемая.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования: рекомендуется высоту рабочей поверхности стола выбирать в пределах 680-800 мм; высота рабочей поверхности, на которой располагается клавиатура, должна быть 650 мм; ширина рабочего стола должна быть не менее 700 мм, длина не менее 1400 мм; должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420–550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор необходимо располагать на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране. Кроме того, должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте + 3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

#### 4.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, ионизирующее излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [19] и приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23–25	40–60	0.1
Теплый	23–25	40	0.1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека — не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20–25 °С, зимой – 13–15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света и высокой яркостью экрана компьютера.

Согласно требованиям [20], освещенность рабочих поверхностей должна быть не менее 200 лк.

#### 4.3 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами.

Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развѐртки.

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает тепловое, химическое и биологическое воздействие.

Тепловое (термическое) действие проявляется в виде ожогов участка кожи, перегрева различных органов, а также возникающих в результате перегрева

разрывов кровеносных сосудов и нервных волокон.

Химическое (электролитическое) действие ведет к электролизу крови и других содержащихся в организме человека растворов, что приводит к изменению их физико-химических составов, а значит, и к нарушению нормального функционирования организма.

Биологическое действие проявляется в опасном возбуждении живых клеток и тканей организма, в результате чего они могут погибнуть.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока зависит от:

- параметров электрического тока, протекающего через тело человека (величины напряжения, частоты, рода тока, приложенного к телу);
- пути тока через тело человека (рука-рука, рука-нога, нога-нога, шея-ноги и др.);
- продолжительности воздействия тока через тело человека;
- условий внешней среды (влажности и температуры);
- состояния организма человека (толщины и влажности кожного покрова, состояния здоровья и возраста).

Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока проявляется в виде электрических ударов и электротравм.

Электрическим ударом называется такое действие электрического тока на организм человека, в результате которого мышцы тела (например, рук, ног и т.д.) начинают судорожно сокращаться.

В результате электрического удара возможен паралич важнейших органов тела человека (сердца, легких, мозга и т.д.).

Электрической травмой называется такое действие электрического тока на организм человека, при котором повреждаются ткани и внутренние органы человека (кожа, мышцы, кости и т.п.).

В результате тяжелых форм электрического удара и электротравм, человек может оказаться в состоянии клинической смерти – у него прекращается дыхание и кровообращение.

Непосредственными причинами смерти человека, пораженного электрическим током, является прекращение работы сердца, остановка дыхания и, так называемый, электрический шок.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

#### 4.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [21], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;

- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные. Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;

- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения — предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководителю;
- позвонить в аварийную службу 112;
- принять меры в соответствии с инструкцией.

## **Заключение**

В ходе данной работы была выполнена реализация обобщенного прототипа программы для решения нестационарных дифференциальных уравнений методом конечных разностей. Был выведен критерий вычислительной устойчивости для одномерного и многомерного случаев. Данный критерий использовался для определения временного шага при задании входных условий в написанную программу. Полученные результаты для имеют хорошую согласованность с аналитическим решением на значимом промежутке времени. В ходе анализа устойчивости алгоритма было установлено, что зависимость точки "взрыва" от шага по времени имеет гиперболический характер, а так же были установлены границы условной сходимости решения для заданной задачи.

Предложенная реализация конечноразностного метода может быть использована в простых физических вычислениях и быть модифицирована в дальнейшем.

## Список литературы

1. Fick A., Ueber Diffusion, Pogg. Ann. Phys. Chem. — 1855. — 170 (4. Reihe 94). — pp. 59-86.
2. Sannikov, Yuliy. “A Continuous- Time Version of the Principal: Agent Problem.” The Review of Economic Studies, vol. 75, no. 3, 2008, pp. 957–984. JSTOR, [www.jstor.org/stable/20185061](http://www.jstor.org/stable/20185061).
3. Burger, Martin et al. “Partial differential equation models in the socio-economic sciences.” Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences vol. 372,2028 (2014): 20130406. doi:10.1098/rsta.2013.0406
4. Dunham Jackson The theory of Approximation, AMS Colloquium Publication Volume XI, New York 1930.
5. Karl R. Stromberg, Introduction to classical analysis, Wadsworth International Group, 1981. ISBN 0-534-98012-0
6. E. Cheney, David Kincaid. Numerical Mathematics and Computing. — Cengage Learning, 2012. — 43– p. — ISBN 1-133-71235-5
7. Randall J. LeVeque, Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations, SIAM, 2007.
8. Finite difference method. Wikipedia. [интернет ресурс] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method);
9. Vladimir García-Morales & Katharina Krischer (2012) The complexGinzburg–Landau equation: an introduction, Contemporary Physics, 53:2, 79-95, DOI:10.1080/00107514.2011.642554 [интернет ресурс] URL: <https://doi.org/10.1080/00107514.2011.642554>;
10. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов — М.: Мир, 1979. — 392 С.
11. Уравнения математической физики: Учеб. Пособие – 6-е изд. испр. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – Гл. III;

12. Теория разностных схем. Самарский А. А.: Учебное пособие. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1983. – 257-267 с.;
13. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров: Учеб. пособие. — М.: Высш. шк., 1994. — 544 с.
14. Skinner, G., Shah, S., Shannon, B., “C Style and Coding Standards”, Sun Internal Paper, Token 2151, Sun Electronic Library, 1990.
15. Керниган Б., Ритчи Д. Язык программирования Си = The C programming language. — 2-е изд. — М.: Вильямс, 2007. — С. 304. — ISBN 0-13-110362-8.
16. E. Isaacson, H. Keller Analysis of Numerical Methods, Courier Corporation, 2012. - 576 p.
17. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.
18. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
19. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
20. Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение" (утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78).
21. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

## Приложение А

### Листинг кода программы

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <assert.h>
//0. Блок, определяющий новые типы.
typedef double Value;
typedef Value (*DiffCallback)(Value *, int, int, double);
typedef Value (*CallbackF)(Value *, int, int, double, double, double);
typedef Value (*initCallback)(double x, double y);
//Конец блока

//1. Блок, задающий возможные производные
Value fdu_dq(Value *u, int i, int N, double h)
{
    return (u[i+1*N] - u[i])/h;
}
Value bdu_dq(Value *u, int i, int N, double h)
{
    return (u[i] - u[i-1*N])/h;
}
Value cdu_dq(Value *u, int i, int N, double h)
{
    return (u[i+1*N] - u[i-1*N])/(2*h);
}
Value ffdu2_dq2(Value *u, int i, int N, double h)
{
    return (u[i+2*N] - 2*u[i+1*N] + u[i])/(h*h);
}
Value fbdu2_dq2(Value *u, int i, int N, double h)
{
    return (u[i+1*N] - 2*u[i] + u[i-1*N])/(h*h);
}
Value ccdu2_dq2(Value *u, int i, int N, double h)
{
    return (u[i+2*N] - 2*u[i] + u[i-2*N])/(h*h);
}
Value bbdu2_dq2(Value *u, int i, int N, double h)
{
    return (u[i] - 2*u[i-1*N] + u[i-2*N])/(h*h);
}
```

```

DiffCallback dUdq[2][3] = {
    {bdu_dq,    cdu_dq,    fdu_dq},
    {bbdu2_dq2, fbdu2_dq2, ffdu2_dq2}
}; //dUdx["0 1 пор-ка, "1 2 пор-ка][0 - произв. назад; 1 - произв. сред; 2 - произв. вперед](u - заданный
    массив, i точки, число элементов в других координатах, шаг)
// Конец блока

//2. Блок, высчитывающий следующий слой в зависимости от предыдущего
void find_differ(Value* ut0, Value* ut1, int Nx, int Ny, double h_x, double h_y,
    double t_step, CallbackF F)
{
    for(int i = 1; i < Nx - 1; i++)
        {
            for(int j = 1; j < Ny - 1; j++)
                {
                    ut1[i*Ny+j] = F(ut0, i*Ny+j, Ny, h_x, h_y,
                        t_step) + ut0[i*Ny+j];
                }
        }
}
//Конец блока

//3. Блок, задающий начальное условие
void initCond(Value* u, int Nx, int Ny, double h_x, double h_y, double xmin,
    double ymin, initCallback Func)
{
    double x = xmin;
    double y;
    for(int i = 0; i < Nx; i++)
        {
            y = ymin;
            for(int j = 0; j < Ny; j++)
                {
                    u[i*Ny+j] = Func(x, y); //Сюда вместо функции можно вставить
                        массив данных
                    y+=h_y;
                }
            x+=h_x;
        }
}
//Конец блока

```

```

//3.1 Блок, задающий функцию для начальных условий (если условие определяется функцией
double initFunc (double x, double y)
{
    return 2*exp ( ( pow((x 5), 2)+pow((2*y+5), 2))/5)+2*exp ( ( pow((x+5), 2)+
        pow((y 5), 2))/5); //
    Записать начальное
    условие
}
//Конец блока

//4. Блок, задающий граничное условие. В случае наличия в пересчетной функции t на каждом шаге данная
процедура будет менять точки;
void boundCond (Value* Us, int Nx, int Ny, double t)
{
    for(int i = 0; i < Nx; i++)
    {
        Us[Ny*i] = 0; // Левое гран. условие по x
        Us[Ny*i+(Ny 1)] = 0; //Правое гран. условие по x
    }
    for(int i = 0; i < Ny; i++)
    {
        Us[i] = 0; //Верхнее гран. условие по y
        Us[Ny*(Nx 1)+i] = 0; //Нижнее гран. условие по y
    }
}
//Конец блока

//5. Блок, задающий функционал F - правило, по которому пересчитывается элемент слоя. Здесь в return нужно
записать вид функции, по которой происходит расчет уравнения;
double Func(Value* u, int i, int N, double h_x, double h_y, double t_step)
{
    return (dUdq[1][1](u, i, N, h_x)+dUdq[1][1](u, i, 1, h_y))*t_step;
}
//Конец блока

//6. Основной блок, содержащий main
int main() {
    int Nx = 60; //Указать число точек по x;
    int Ny = 60; //Указать число точек по y;
    double xmin = 12; //Указать левую границу по x;
    double xmax = 12; //Указать правую границу по x;
    double ymin = 12; //Указать нижнюю границу по y;
    double ymax = 12; //Указать верхнюю границу по y;
    double tmax = 150; //Указать конечный момент времени t;
    double A = 1; //Указать коэффициент при функционале;
    double h_x = (xmax xmin)/Nx; // Шаг по x, рассчитывается автоматически;
}

```

```

double h_y = (ymax - ymin)/Ny; //Шаг по x, рассчитывается автоматически;
double t_step = (0.5*pow(h_x*h_y, 2))/(A*(pow(h_x, 2)+pow(h_y, 2)));
//Шаг по t, рассчитывается автоматически на основании условия
устойчивости;
int Nt = tmax/t_step; //Число точек по t, рассчитывается автоматически;
double t = 0; //Начальный момент времени, всегда равен 0;
Value Us[2][Nx*Ny];
Value *ut0;
Value *ut1;
FILE* mf;
char name[40];
initCond(Us[0], Nx, Ny, h_x, h_y, xmin, ymin, initFunc);
for(int p = 0; p < Nt; p++)
{
    sprintf(name, "dataDiff2d/%d.txt", p);
    remove(name);
}
for(int p = 0; p < Nt; p++)
{
    ut0 = Us[p%2];
    ut1 = Us[(p+1)%2];
    if(p % 4 == 0)
    {
        sprintf(name, "dataDiff2d/%d.txt", p);
        mf = fopen(name, "w");
        for(int i = 0; i < Nx; i++)
        {
            for(int j = 0; j < Ny; j++)
            {
                fprintf(mf, "%f ", ut0[Ny*i+j]);
            }
            fprintf(mf, "\n");
        }
        fclose(mf);
    }
    boundCond(Us[p%2], Nx, Ny, t);
    find_differ(ut0, ut1, Nx, Ny, h_x, h_y, t_step, Func);
    t+=t_step;
}
return 0;
}

```