



Школа	<u>Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности</u>
Направление подготовки	<u>20.04.01 Техносферная безопасность</u>
ООП/ОПОП	<u>Управление комплексной техносферной безопасностью</u>
Отделение	<u>Контроля и диагностики</u>

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА**

Тема работы
Математическое моделирование процесса переноса продуктов горения от лесных пожаров в окрестности населенных пунктов

УДК 519.876:614.841.11:630

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM11	Казакова Софья Валерьевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОКД	Перминов В.А.	д.ф.-м.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина В.А.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Антоневич О.А.	к.б.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вторушина А.Н.	к.х.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языках (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определить и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способен самостоятельно приобретать, структурировать и применять математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в области техносферной безопасности, решать сложные и проблемные вопросы
ОПК(У)-2	Способен анализировать и применять знания и опыт в сфере техносферной безопасности для решения задач в профессиональной деятельности
ОПК(У)-3	Способен представлять итоги профессиональной деятельности в области техносферной безопасности в виде отчетов, рефератов, статей, заявок на выдачу патентов, оформленных в соответствии с предъявляемыми требованиями
ОПК(У)-4	Способен проводить обучение по вопросам безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды
ОПК(У)-5	Способен разрабатывать нормативно-правовую документацию сферы профессиональной деятельности в соответствующих областях безопасности, проводить экспертизу проектов нормативных правовых актов

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен ориентироваться в полном спектре научных проблем профессиональной области;
ПК(У)-2	Способен создавать модели новых систем защиты человека и среды обитания;
ПК(У)-3	Способен анализировать, оптимизировать и применять современные информационные технологии при решении научных задач;
ПК(У)-4	Способен идентифицировать процессы и разрабатывать их рабочие модели, интерпретировать математические модели в нематематическое содержание, определять допущения и границы применимости модели, математически описывать экспериментальные данные и определять их физическую сущность, делать качественные выводы из количественных данных, осуществлять машинное моделирование изучаемых процессов;
ПК(У)-5	Способен использовать современную измерительную технику, современные методы измерения;
ПК(У)-6	Способен применять методы анализа и оценки надежности и техногенного риска;
ПК(У)-7	Способен организовывать и руководить деятельностью подразделений по защите среды обитания на уровне предприятия, территориально-производственных комплексов и регионов, а также деятельностью предприятия в режиме чрезвычайной ситуации;
ПК(У)-8	Способен осуществлять взаимодействие с государственными службами в области экологической, производственной, пожарной безопасности, защиты в чрезвычайных ситуациях;
ПК(У)-9	Способен участвовать в разработке нормативно-правовых актов по вопросам техносферной безопасности;
ПК(У)-10	Способен к рациональному решению вопросов безопасного размещения и применения технических средств в регионах;
ПК(У)-11	Способен применять на практике теории принятия управленческих решений и методы экспертных оценок.
ДПК(У)-1	Способен осуществлять технико-экономические расчеты мероприятий по повышению безопасности

Школа	<u>Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности</u>
Направление подготовки	<u>20.04.01 Техносферная безопасность</u>
ООП/ОПОП	<u>Управление комплексной техносферной безопасностью</u>
Отделение	<u>Контроля и диагностики</u>

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ А.Н. Вторушина  
 (Подпись)      (Дата)      (ФИО)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
1ЕМ11	Казакова Софья Валерьевна

Тема работы:

Математическое моделирование процесса переноса продуктов горения от лесных пожаров в окрестности населенных пунктов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	24.12.2021 №358-11/с

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Объект исследования – возникновение и развитие процесса зажигания под воздействием источника светового излучения.</p> <p>Предмет исследования – математическая модель процесса зажигания растительного покрова и переноса продуктов горения.</p>
<p><b>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b>  <i>(аналитический обзор литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Литературный обзор для оценки современного состояния в области мониторинга и прогнозирования экологических последствий при возгорании на опасных производственных объектах.</li> <li>2. Физико-математическая постановка задачи возникновения пожара под воздействием теплового излучения и переноса продуктов горения.</li> <li>3. Разработка алгоритма и программная реализация математической модели.</li> <li>4. Верификация результатов численного исследования и модели программного комплекса с использованием известных данных.</li> </ol>

		5. Анализ результатов математического моделирования.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>		
<b>Раздел</b>		<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение		Маланина Вероника Анатольевна
Социальная ответственность		Антоневич Ольга Алексеевна
Иностранный язык		Устюжанина Анна Константиновна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</b>		
1 Теоретическая часть		

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

**Задание выдал руководитель**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОКД	Перминов В.А.	д.ф.-м.н., доцент		

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM11	Казакова Софья Валерьевна		

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность  
 ООП/ОПОП Управление комплексной техносферной безопасностью  
 Отделение Контроля и диагностики

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
1EM11	Казакова Софья Валерьевна

Тема работы:

Математическое моделирование процесса переноса продуктов горения от лесных пожаров в окрестности населенных пунктов
---

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
30.11.2021	Теоретическая часть – изучение литературы и других источников информации по теме научного исследования	10
21.03.2022	Физико-математическая постановка задачи научного исследования	20
31.09.2022	Разработка алгоритма и программная реализация математической модели	20
10.02.2023	Получение и верификация результатов численного исследования	15
15.03.2023	Оценка и анализ результатов научного исследования	15
20.04.2023	Разработка разделов выпускной квалификационной работы	10
20.05.2023	Оформление пояснительной записки выпускной квалификационной работы	10

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОКД	Перминов В.А.	д.ф.-м.н., доцент		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вторушина А.Н.	к.х.н.		

**Обучающийся**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM11	Казакова Софья Валерьевна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 124 с., 20 рис., 26 табл., 35 источников, 1 прил.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, математическое моделирование, лучистый тепловой поток, огненный шар, теплоперенос, растительный покров, здания и сооружения.

Объектом исследования является – возникновение и развитие процесса зажигания под воздействием источника светового излучения.

Цель работы – определение размеров зон зажигания растительного покрова и анализ распространения загрязняющих веществ в атмосфере, в результате воздействия светового излучения при аварийной ситуации на промышленном объекте.

В ходе работы проводилось математическое моделирование процесса горения при воздействии источника теплового излучения.

В результате численного интегрирования, определен радиуса зажигания растительного покрова, при воздействии лучистой энергии, и рассчитаны показатели, характеризующие процесс переноса продуктов пиролиза и горения на объекты – лесной массив, здания и сооружения.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: применимо к большинству современных операционных систем общего назначения.

Степень внедрения: научно-исследовательский процесс.

Область применения: государственные учреждения, объекты газонефтехимической промышленности и научно-исследовательские организации, занимающиеся мониторингом безопасности (промышленной, экологической и пожарной).

Экономическая эффективность/значимость работы прогноз масштабов вероятных аварий и осуществления превентивных мероприятий. В будущем планируется разработать интерфейс программного комплекса с расширенными функциональными возможностями.

## **Сокращения и определения**

Огненный шар – крупномасштабное диффузное пламя сгорающей массы топлива или парового облака, поднимающееся над поверхностью Земли.

BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion) – взрыв расширяющегося пара кипящей жидкости.

SIP (strongly implicit procedure) – алгоритм решения разреженной линейной системы уравнений.

SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) – итеративный алгоритм решения уравнений.



## Нормативные ссылки

1. ГОСТ Р 12.3.047-2012 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
2. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).
3. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
4. ГОСТ Р 50923-96 Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
5. ГОСТ 21889-76 Система человек-машина. Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования.
6. ГОСТ 22269-76 Система человек-машина. рабочее место оператора. взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.
7. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
8. ГОСТ 12.1.038-82\* ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
9. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
10. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.
11. ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов
12. ГОСТ Р 22.0.02-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях  
Термины и определения

13. ГОСТ 12.1.004-91, ССБТ Пожарная безопасность. Общие требования.

14. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

15. СНиП 23-05-95\* Естественное и искусственное освещение.

16. СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы.

17. СП 1.13130.2020 Системы противопожарной защиты. эвакуационные пути и выходы.

18. СП 9.13130.2009 Техника пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации.

19. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

20. МР 2.2.9.2311 – 07 Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	14
1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	16
1.1 Природные и техногенные чрезвычайные ситуации.....	16
1.2 Аварии на пожаро – и взрывоопасных объектах промышленности.....	18
1.3 Физико-химический процесс горения с образованием огненного шара.....	19
1.4 Зажигание лесного массива при воздействии теплового излучения .....	22
1.5 Распространения загрязняющих веществ в атмосфере при лесных пожарах .....	24
2 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	26
2.1 Физико-математическая постановка задачи.....	26
2.1.1 Физическая постановка задачи .....	27
2.1.2 Математическая постановка задачи .....	30
2.2 Методика численного решения задач двумерной задачи .....	37
2.3 Алгоритм программной реализации математической модели .....	39
2.4 Верификация результатов численного исследования и модели программного комплекса с использованием известных данных.....	42
2.4.1 Численное исследование плотности теплового излучения от огненного шара .....	42
2.4.2 Верификация результатов программного комплекса.....	44
2.4.3 Погрешность результатов.....	45
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	47
3.1 Математическое моделирование возникновения очага горения.....	47
3.1.1 Анализ результатов процесса зажигания при верховом пожаре.....	47
3.1.2 Анализ результатов процесса зажигания при низовом пожаре .....	53
3.2 Математическое моделирование воздействия очага горения на населенные пункты .....	56
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	63

4.1 Предпроектный анализ .....	63
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	63
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений .....	64
4.1.3 SWOT-анализ .....	66
4.2 Инициация проекта .....	70
4.2.1 Цели и результат проекта .....	70
4.2.2 Организационная структура проекта .....	71
4.3 Планирование научно-исследовательской работы .....	72
4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	72
4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ .....	73
4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования .....	74
4.4 Бюджет научно-технического исследования .....	78
4.4.1 Расчет затрат на оборудование для научных работ .....	78
4.4.2 Основная заработная плата исполнителей темы .....	79
4.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	81
4.4.4 Накладные расходы .....	81
4.4.5 Формирование бюджета затрат научно проекта .....	82
4.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	83
4.5.1 Оценка социальной эффективности исследования .....	83
4.5.2 Оценка сравнительной эффективности исследования .....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....	88
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	91
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	92
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства .....	92
5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны .....	92
5.2 Производственная безопасность .....	95

5.2.1 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий.....	96
5.2.2 Производственные факторы, связанные с электромагнитными полями, неионизирующими ткани человека (повышенным образованием электростатических зарядов) .....	97
5.2.3 Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего .....	98
5.2.4 Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения .....	98
5.2.5 Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума) .....	101
5.2.6 Производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека (нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса; длительность сосредоточенного наблюдения .....	102
5.3 Экологическая безопасность.....	103
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ» .....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	109
Приложение А Theoretical part .....	113

## ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно увеличивается количество пожаров, которые влекут за собой не только значительные материальные потери, но и вносят серьезные изменения в динамику экосистемы планеты. Крупномасштабный процесс горения происходит при аварийных ситуациях на промышленных объектах, деятельность которых связаны применением горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей. Одним из основных факторов, вызывающих разрушение опасного производственного объекта, является образование «огненного шара».

Переход на более новую, усовершенствованную стратегию, которая основана на принципах прогнозирования аварийных ситуаций, позволит повысить уровень пожарной безопасности промышленных объектов и минимизировать негативное воздействие на экосистему. Реализация научно-обоснованных методов мониторинга дает возможность защитить территории и окружающие объекты от природных и техногенных чрезвычайных ситуаций.

Математическая модель исследует динамику возникновения и распространения процесса горения в результате зажигания лесного массива при различных параметрах системы. Появляется возможность спрогнозировать последствия от теплового излучения, создаваемого почти мгновенным выбросом перегретых легковоспламеняющихся жидкостей и газов.

Цель научно-исследовательской работы – определение размеров зон зажигания растительного покрова и анализ распространения загрязняющих веществ в атмосфере, в результате воздействия светового излучения при аварийной ситуации на промышленном объекте.

Задачи исследования:

6. Литературный обзор для оценки современного состояния в области мониторинга и прогнозирования экологических последствий при возгорании на опасных производственных объектах.

7. Физико-математическая постановка задачи возникновения пожара под воздействием теплового излучения и переноса продуктов горения.

8. Разработка алгоритма и программная реализация математической модели.

9. Верификация результатов численного исследования и модели программного комплекса с использованием известных данных.

10. Анализ результатов математического моделирования.

Объект исследования – возникновение и развитие процесса зажигания под воздействием источника светового излучения.

Предмет исследования – математическая модель процесса зажигания растительного покрова и переноса продуктов горения.

Разработанная математическая модель является частью программного комплекса, который может использоваться для прогнозирования масштабов вероятных аварий и осуществления превентивных мероприятий.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Природные и техногенные чрезвычайные ситуации

Чрезвычайные ситуации негативно влияют на жизнь людей и осложняют нормальное функционирование различных социальных институтов, что приводит не только к материальному ущербу, но и наносит вред экосистеме Земли. Уровень аварийности остается достаточно высоким, несмотря на принимаемые меры.

Согласно комплексному статистическому анализу, большую значимость приобретают проблемы при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. В соответствии с государственным докладом о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, на долю от общего числа чрезвычайных ситуаций техногенные аварии составляют 49,2 %, природные – 28,5 % и биолого-социальных 22,3 % [1].

Изменение технологии производства, расширение производственных мощностей и низкие темпы внедрения ресурсо-энергосберегающих и других технически совершенных и безопасных технологий, вызвали прирост техногенных чрезвычайных ситуаций на 13,8 % за 2021 год [1]. Одним из основных фактором опасности при возникновении отклонений от установленных норм протекания технологического процесса является зона поражения. Негативное влияние распространяется на ближайшие объекты, которые находятся в непосредственной близости к месту аварии.

Аварии на объектах промышленности нарушают равновесие в экосистеме Земли, что является источником чрезвычайных ситуаций природного характера. Данный тип аварий может иметь различную природу: от выбросов опасных веществ в атмосферу, до разлива взрывоопасных, легковоспламеняющихся продуктов в окружающую среду. В результате происходят экологические



катастрофы, которые оказывают влияние на природу, животный и растительный мир, а также на здоровье людей.

Система прогнозирования аварийных ситуаций позволит произвести расчет величины возможного ущерба на основании оптимальных резервных показателей. Оперативно ликвидировать последствий чрезвычайной ситуации и провести аварийно-восстановительные работы.

Комплексный анализ для прогнозирования величины потерь является важным компонентом при исследовании объекта. Структурная схема со встроенным программным модулем представлена на рисунке 1.1.

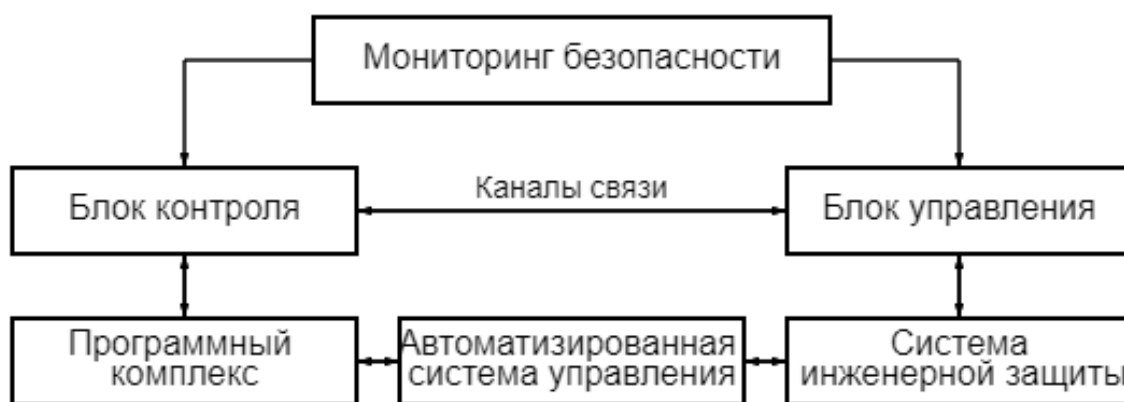


Рисунок 1.1 – Структурная схема мониторинга среды

Основными компонентами системы являются блоки контроля и управления, которые связаны между собой каналами передачи информации. Формирование и пополнения базы данных осуществляется при проведении регулярных наземных и дистанционных наблюдений. Дополнительным источником для корректной работы автоматизированной информационной системы и как следствие, для проектирования инженерной защиты является разрабатываемый программный комплекс.

## **1.2 Аварии на пожаро – и взрывоопасных объектах промышленности**

Возникновения крупных пожаров на производственных объектах представляют большую опасность. Высокий показатель пожаро- и взрывоопасности характерен для объектов нефтегазового комплекса. Ввиду особенностей технологического процесса, который включает в себя хранение, переработку и транспортировку значительных объем взрывопожароопасных материалов, при высоких показателях давления и температуры.

Аварийные ситуации техногенного характера на данных объектах характерны для систем транспортировки из районов, где расположено месторождение или происходит обработка, к месту потребления [2]. Магистральный трубопровод отличается высокой производительностью и большой протяженностью. Следовательно, происходят изменения эксплуатационных условий, конструктивных и технологических параметров.

Поражающими факторами процесса горения при быстропротекающих физико-химических реакциях, является ударное, вибрационное и тепловое воздействие на окружающую среду. Параметры сформировавшегося крупномасштабного диффузного пламени определяются количеством, выброшенного в атмосферу газообразного горючего и воздействием теплового излучения. Радиус зоны поражения, при аварии, выходит за пределы места происшествя, что приводит к катастрофическим последствиям [3].

Экологические стандарты и нормативно-правовые акты в области охраны окружающей среды регламентируют наличие охранной зоны и зоны минимальных расстояний газопроводов. Для исключения возможных случаев повреждения газопроводов предусмотрен санитарный разрыв (санитарные полосы отчуждения) протяженностью 25 метрах, в обе стороны [4]. Согласно «Правилами охраны магистральных газопроводов» данное расстояние необходимо для обеспечения защиты от воздействия особо опасного объекта на население в случае возникновения аварии. Зона минимальных расстояний газопроводов регламентируется СП 36.13330.2012 «Свод правил.

Магистральные трубопроводы». Расстояние магистральных газопроводов варьируется от 10 до 350 метров в зависимости от диаметра газопровода и степени ответственности объектов. Хвойные и лиственных породы располагаются на расстоянии от 20 до 75 метров, а расстояние до населенные пункты варьируется от 100 до 350 метров.

Для решения вопросов о масштабах последствий от теплового воздействия огненного шара в настоящем исследовании смоделирован процесс зажигания объектов, расположенных вблизи аварийной ситуации.

### **1.3 Физико-химический процесс горения с образованием огненного шара**

Аварии техногенного характера на объектах высокой потенциальной опасности сопровождаются потерей герметичности, что вызывает мгновенное разрушительное действие и образование мощной ударной волны. Высокотехнологичные процессы добычи и переработки включают в себя транспортировку и хранение углеводородного ресурса. Основным видом топлива на промышленных и магистральных газо- продуктопроводах является природный газ, который на 90% состоит из метана – предельного углеводорода, при нормальных условиях бесцветный газ без запаха, крайне легко воспламеняющийся [5].

Природный газ в своем естественном агрегатном состоянии занимает огромные объемы и при утечке быстро смешивается с воздухом. Поднимаясь в атмосферу молекулы метана, образуют облако взрывоопасной смеси, вместе с тем другие углеводородные соединения природного газа оседают в приземном слое. В результате разрушения трубопровода образуется огромная масса токсичных паров.

Минимизировать объемы природного газа возможно в процессе сжиживания. Данное агрегатное состояние имеет ряд коммерческих, экологических и энергетических преимуществ. В процессе сжатия и

последующее охлаждение происходит образованием жидкой и паровой фаз, что значительно уменьшает объемы [6,7].

Однако, в результате потере герметичности, происходит резкое падение давления над поверхностью раздела фаз. Термодинамическая нестабильность достигает области локального перегрева, при которой происходит мгновенное вскипание перегретой жидкости. Данное явление носит название BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion) [8]. Формируется аэрозольное облако, которое содержит сжиженный природный газ в виде аэрозоля. Расширяющиеся пары распространяется по поверхности земли в виде струйных потоков. Скорость испарения быстро падает до постоянного значения, за счет тепловых характеристик грунта и притока тепла, получаемого от окружающего воздуха. Разбавление теплым воздухом повышает температуру и снижает молекулярную массу паровоздушной смеси. В результате дальнейшего смешивания с воздухом происходит полное испарение мелких капель жидкости. Образовавшейся углеводородный газ в процессе естественной регазификации содержит метан, который начинает подниматься в атмосферу, создавая облако взрывоопасной смеси [9].

Сформированное облако вне зависимости от агрегатного состояния топлива, способно к воспламенению в неограниченном пространстве, при помощи постороннего источника зажигания. Данный источник обладает энергией, превосходящей минимальную энергию зажигания данной среды. Взаимодействия частиц газа с металлом и твердыми высокодисперсными частицами грунта приводит к ионизации газа и образованию плазмы, что сопровождается изменением электропроводности. Выделение энергии за короткий промежуток приводит к мгновенным физико-химическими изменениям, в результате которых происходит искровой разряда [10].

Воспламенение, происходящее в атмосфере воздуха, состоит из двух следующих друг за другом процессов: диффузии и химического взаимодействия. Молекулы метана диффундируя в зону горения образуют горючую смесь. В результате взаимодействия горючего вещества с окислителем, происходит

химическая реакция характеризующаяся выделением тепла, света, и образованием продуктами горения [11]. Интенсивное образование новых химических веществ приводит к появлению больших пространственных неоднородностей.

Главной химической реакцией во время процесса горения, является реакция окисления. Она возникает на границах пламени и является ключевым фактором в процессе. Истекающие с поверхности вещества газовой смеси препятствуют проникновению кислороду воздуха вглубь пламени. Данное взаимодействие горючего вещества с окислителем на границе со средой формирует фронт пламени. Непосредственно перед данной зоной концентрация запасов реагентов резко падает в результате разбавления с продуктами реакции. Фронт пламени представляет узкую светящуюся трехмерную область. В зоне фронта пламени выделяется огромное количество потенциальной энергии, которая нагревает окружающие материалы и формирует зону физического прогрева. (рис.1.2) [11,12].

Формирование области теплового прогрева характеризуется процессом диффузии химически активных частиц.

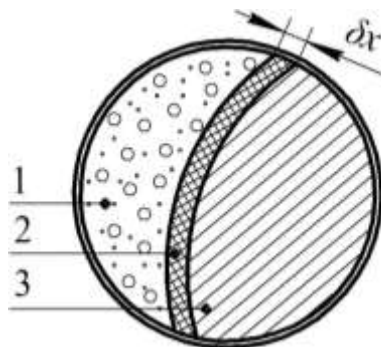


Рисунок 1.2 – Схема распространения пламени, где 1 – исходная горючая смесь; 2 – фронт пламени; 3 – продукты горения;  $\delta r$  – толщина фронта пламени

Высококонцентрированное облако горючего газа, не способно к детонированию, что является причиной горения вокруг своей внешней оболочки. Данное явление представлено крупномасштабным диффузионным горением топлива в переобогащенной смеси на границе с атмосферой. Образование облака горючего газа, приводит к турбулентному смешиванию газа с кислородом

воздуха, что дополнительно распространяет горючую смесь по частично перемешанному газу [13].

Воспламенения парогазовоздушного облака, еще не достигшего концентрации окислителя для полного сгорания, характеризуется развитием «огненного шара». Взаимодействие горючего с кислородом воздуха происходит при высоких температурных показателях, когда скорость горения близка к максимальной, а состав продуктов близок к равновесному.

После окончательного формирования «огненного шара», он отрывается от земли благодаря действующей выталкивающей силы. Образуется грибовидное облако, часть которого состоит из восходящих газовых потоков, вызванных тепловым расширением воздуха. В процессе горения размеры и высота подъема облака увеличиваются, что приводит к разложению на мелкие газовые полости, часть которых продолжает гореть, пока все топливо не будет исчерпано. [14,15].

#### **1.4 Зажигание лесного массива при воздействии теплового излучения**

«Огненный шар» представляет большую опасность за счет интенсивного теплового излучения. Механизм зажигания в результате воздействия лучистых потоков тепла характеризуется выделением энергии в приземном слое атмосферы, что приводит к возникновению очага возгорания. Наиболее подвержены негативному воздействию от теплового излучения растительный покров.

Анализ территории, ее природных особенностей, расположения населенных пунктов, залегания торфяников, а также транспортных путей и коммуникаций позволит спрогнозировать масштабы техногенных аварий, которые сопровождаются пожарами на промышленных и магистральных газопроводах. Классификация лесных пожаров по тому, где распространяется огонь, является важной характеристикой для оценки пожарной опасности. Распространяясь по территории с одним ландшафтом и охватывая

меньшую площадь горения с меньшей мощностью, данный тип пожара носит название ландшафтно-однородного. В случае изменения, ландшафта местности происходит смешанный тип пожара, для которого характерна большая зона поражения [16,17].

Крупномасштабное диффузное пламя способно увеличивать площадь пожаров под действием ветра, распространяя тепловое излучение, согласно траектории движения. Возникновение пожаров на значительных территориях, может привести к такому явлению как «огненный шторм» [17].

Воздействие лучистого потока вызывает тепловой режим, который приводит к расщеплению сухого растительного горючего материала на две фракции: кокс и летучие продукты пиролиза. Кокс остается на месте, создавая твердую фазу, а летучие продукты испаряются и создают газовую фазу. Этот процесс можно охарактеризовать как первый этап воздействия светового излучения на растительный покров.

В момент зажигания температура газовой фазы начинает расти у верхней границы полога. Данный процесс происходит благодаря зажиганию летучих продуктов пиролиза. С течением времени концентрация продуктов пиролиза становится ниже, а концентрация кислорода в центральной зоне процесса горения уменьшается, при этом происходит выгорание угарного газа.

Вблизи эпицентра взрыва и большим выгоранием конденсированных и газообразных продуктов пиролиза, а также значительным расходом кислорода происходит вырожденный режим зажигания. Воздействия высокой теплоты сгорания и скорости сжигаются лесные горючие материалы тепловое излучение от очага горения имеет большую интенсивность. Однако, тепло, которое выделяется при окислении горючих продуктов пиролиза, не оказывает значительного влияния на температуру газовой фазы. В то же время при взаимодействии с конденсированной фазой, температура газовой фазы может повыситься и превысить адиабатическую температуру горения [16].

Плотность лучистого теплового потока, падающий на полог леса, зависит от расстояния, на котором образовался «огненный шар». Снижение температуры

приводит к менее интенсивному окислению газообразных продуктов пиролиза, в результате реализуется нормальный режим зажигания. В данной зоне имеет место сушка и пиролиз горючих материалов, но количества теплового потока недостаточно для воспламенения. Оставшиеся не сгоревшие газообразные и конденсированные продукты, под действием архимедовой силы всплывают над пологом леса, образуя токсичное облако.

### **1.5 Распространения загрязняющих веществ в атмосфере при лесных пожарах**

Одно из главных негативных экологических последствий пожаров – задымление и загрязнение атмосферы. В настоящее время нет данных о зависимости выбросов продуктов сгорания от характеристик леса и метеорологических данных. Как правило, при полном сгорании лесных горючих материалов начинается горение летучих продуктов, происходит испарение и распад. Второй этап представлен конденсированными продуктами, для которых требуется больше времени и тепла для сгорания.

Огромную роль при распространении лесных пожаров играет пиролиз. Под воздействием высоких температур, лесные горючие материалы начинают разлагаться, образуя газообразные продукты, такие как пары воды ( $H_2O$ ) и диоксид углерода ( $CO_2$ ), а также конденсированные продукты горения (зола). Фактически при пиролизе происходит неполное сгорание продуктов горения, что приводит к выбросу оксида углерода ( $CO$ ), частицы сажи и золы из фронта пожара. Вещества, которые образуются во время процесса горения, могут оказать негативное влияние на состояние здоровья человека и окружающую среду.

Среди атмосферных загрязнителей наиболее распространенным является окись углерода. В частности, при пиролизе одного килограмма лесных горючих материалов выделяется порядка 400 мг/л оксида углерода. Концентрация данного вредного вещества внутри пламени составляет от 0,25 до 0,30 кг/м<sup>3</sup>, над факелом от 0,025 до 0,030 кг/м<sup>3</sup>, а у поверхности земли перед зоной горения от



0,0007 до 0,002 кг/м<sup>3</sup>. При этом предельно допустимая концентрация содержания окиси углерода в атмосферном воздухе составляет  $5 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup> [18].

Перенос продуктов горения является одним из ключевых факторов, который оказывает влияние на процесс распространения лесного пожара и его интенсивность. Взвешенные частицы, которые могут быть перенесены на большие расстояния в воздухе представляют большую опасность. Данные частицы содержатся в конденсированных продуктах пиролиза– твердый пористый коксовый остаток, который состоит из почти чистого углерода, воды, смолы, спиртовых продуктов и другие органические соединения.

Угроза массового поражения, в результате техногенной аварии является важным аспектом для разработки системы мониторинга в соответствии с действующим законодательством. Согласно современным представлениям для объективной оценка необходимо учитывать количественный показатель поражающих факторов и уровень негативного воздействия на объекты.

## **2 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **2.1 Физико-математическая постановка задачи**

Техногенные катастрофы на объектах газовой промышленности сопровождаются взрывной волной с образованием огненного шара. В связи с оценкой экологических и климатических последствий возникает интерес для разработки с возможностью прогнозирования воздействия крупных очагов горения на населенные пункты. В связи с ограничениями и рисками, связанными при натуральных исследованиях процесса горения, метод математического моделирования представляет собой эффективную альтернативу. Подобные исследования помогают улучшить понимание о том, как бороться с пожарами и защитить окружающую среду [16].

В данной задаче рассматривается процесс зажигания лесного массива под воздействием лучистой энергии, и последующее распространение продуктов пиролиза и горения в виде токсичного облака. При решении математической модели учтены строительные нормы и правила при прокладке линейной части магистральных трубопроводов согласно географическим особенностям местности. Источником лучистой энергии в рассматриваемой задаче является «огненный шар», который формируется при потере герметичности магистральных трубопроводов, работающих под давлением.

Разрабатываем программный комплекс представляет большой научный и практический интерес для обеспечения безопасности при аварийных ситуациях на взрывопожароопасных объектах промышленности. Математическая модель позволит определить масштабы зоны поражения при заданных параметрах исследуемого объекта.

### 2.1.1 Физическая постановка задачи

Источником теплового излучения является «огненный шар», который расположен на некотором расстоянии  $H$  от поверхности Земли (рис.2.1).

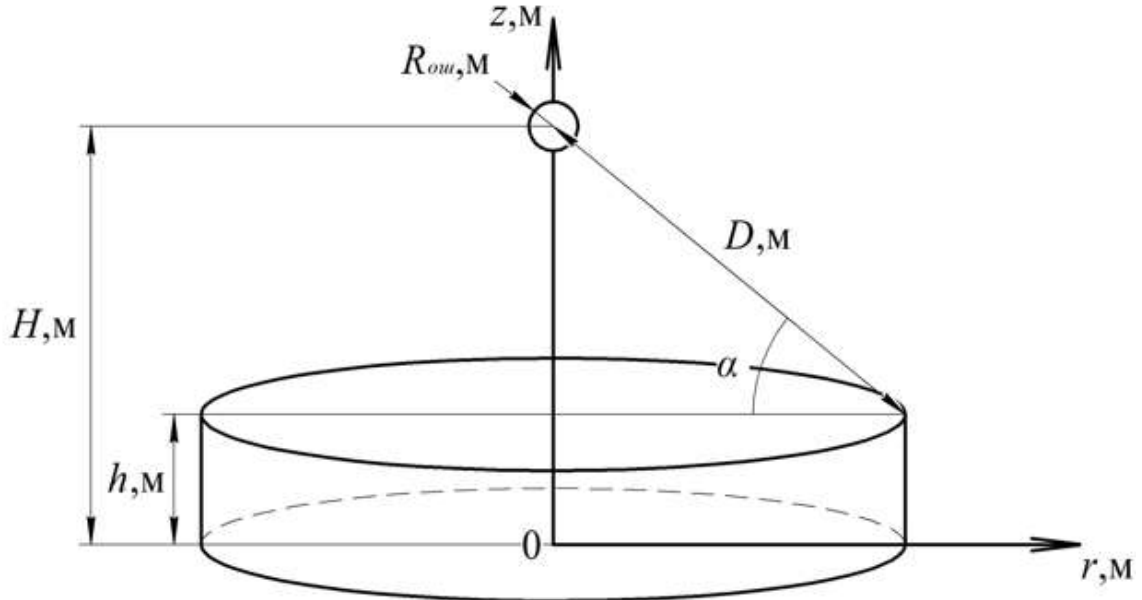


Рисунок 2.1 – Схема процесса зажигания растительного покрова

Интенсивность теплового потока зависит от времени воздействия теплового излучения и радиуса зоны зажигания. Формула, описывающая зависимость интенсивности теплового излучения, может быть приближена следующим образом [16]:

$$q_R(r,t) = \frac{t_p P_m \sin L}{4\pi D^2} \begin{cases} t/t_m, & t < t_m \\ \exp[-k_0(t/t_m - 1)], & t \geq t_m \end{cases} \quad (2.1)$$

$$t_m = 0,032 w_0^{0,5}, \quad P_m = 4 w_0^{0,5}$$

где  $t_m$  – время максимального теплового излучения, с;

$D$  – расстояние от центра источника излучения до полога растительного массива, м;

$t_p$  – коэффициент пропускания атмосферы;

$P_m$  – максимальная величина светового импульса в момент времени  $t_m$ , кТ/с;

$L$  – угол между направлением вектора плотности потока излучения и верхней границей растительного покрова;

$w_0$  – мощность источника, кВт;

$k_0$  – аппроксимационный коэффициент ( $k_0 = 0,75$ ).

Поток тепловой энергии, падающий на растительный покров ( $z_0 \leq z \leq h$ ) вызывает, нагрев лесных горючих материалов, испарение влаги и последующее термическое разложение твердого материала с выделением летучих продуктов пиролиза. Наличие силы тяжести способствует перемещению нагретых объемов воздуха вверх, что приводит к гидродинамическому течению. В свою очередь, это может привести к процессам объемного зажигания лесной растительности. Интенсивность лучистого потока ослабевает с расстоянием от эпицентра аварии, и это может привести к формированию зоны первоначального зажигания лесного массива. Эта зона может быть определена взаимодействием восходящих потоков с полем ветра [16,17].

Физико-математическая постановка задачи учитывает, что скорость ветра в атмосфере относительно невысока. Используя уравнение Навье-Стокса, учитывается энергию, которая в основном переносится излучением, что позволяет решать задачу в осесимметричной постановке [19].

Описание процесса зажигания растительного покрова целесообразно проводить на различных уровнях сложности. Физическая и математическая модель тепло- и массопереноса при лесных пожарах включают физические допущения и представления об объекте исследования. В центре рассматриваемой области течение однонаправленно и симметрично относительно вертикальной оси  $z$ , при этом развитый турбулентный характер течения позволяет пренебрегать молекулярным переносом [20,21].

Предполагаем, что полог леса считается недеформируемой, двухтемпературной, многофазной пористой реагирующей средой. Преобразование описания реакции горения растительных горючих материалов в математические уравнения, используя уравнения массового баланса и законы

сохранения массы и энергии, позволит получить уникальные данные о процессах, происходящих в данной среде.

С точки зрения гидродинамики, рассматриваемая пористая среда, оказывает сопротивление любому перемещению воздушных масс с силой равной [16]:

$$\vec{F} = \rho s c_d |\vec{v}| \vec{v} \quad (2.2)$$

где  $s$  – удельная поверхность фитомассы;

$\vec{v}$  – вектор скорости перемещения воздушных масс;

$c_d$  – эмпирический коэффициент сопротивления полого леса

Считается, что среда находится локально-термодинамическом равновесии. Турбулентный конвективный перенос, обусловленный действием силы тяжести, описывается с использованием уравнений Рейнольдса [16].

Важный механизм для физической постановки задачи заключается в расчете скорости химических реакций, при зажигании растительного покрова. Определяющим процессом при переносе энергии является тепловое излучение от огненного шара. Лучистая энергия находится в постоянном движении, взаимодействуя с окружающей средой. Для описания переноса в такой специфической сплошной среде используется диффузионное приближение, которое является оправданным, так как длина свободного пробега излучения в пологе достаточно мала [16,17]:

$$l_R \ll l_o, l_o \sim 10-15 \text{ м}, l_R \sim 1 \text{ м} \quad (2.3)$$

где  $l_o$  – характерный масштаб высоты.

Образовавшейся очаг горения лесного массива воздействует на объекты, расположенные в непосредственной близости к месту аварии (рис. 2.2).

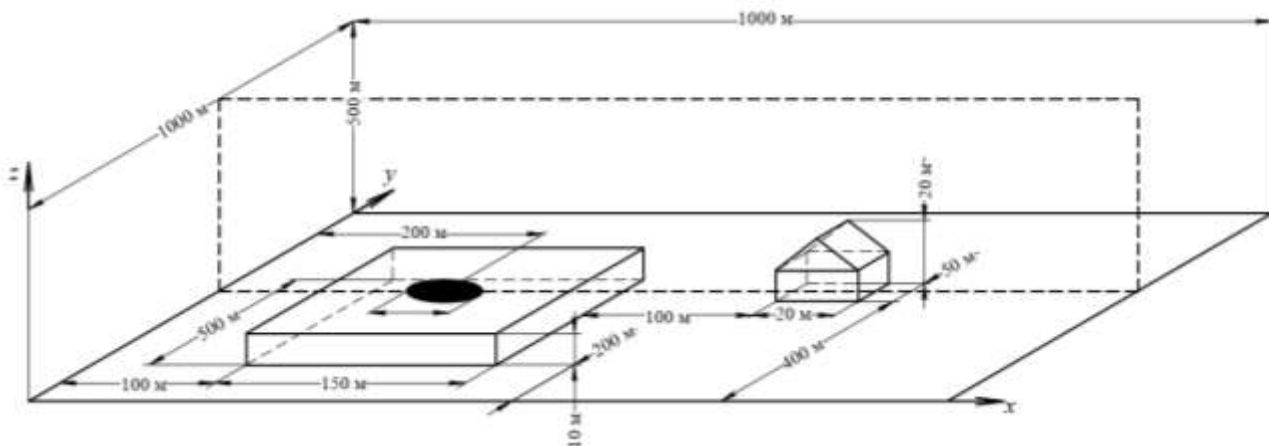


Рисунок 2.2 – Схема процесса переноса продуктов горения при зажигании растительного покрова

Данный процесс обусловлен конвективным переносом продуктов горения и термическим воздействием от фронта пожара на здания и сооружения, которые находятся на территории населенных пунктов.

### 2.1.2 Математическая постановка задачи

Описание гидродинамических характеристик системы и уравнения химической кинетики основаны на законах сохранения для многофазной среды. Согласно данным, решение задачи сводится к решению уравнений в цилиндрической системе координат [16-18].

Уравнение неразрывности, закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = \dot{m} \quad (2.4)$$

где  $\dot{m}$  – массовая скорость образования газодисперсной фазы;

$v$  – компоненты средней скорости в проекции на ось  $r$ ;

$w$  – компоненты средней скорости в проекции на ось  $z$ .

Согласно закону сохранения импульса, уравнение для горизонтальной компоненты скорости имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v w) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(-r\rho \overline{v'^2}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{v'w'}) - \rho s c_d v \sqrt{v^2 + w^2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

где  $p$  – давление;

$v', w'$  – компоненты пульсационной составляющей скорости в проекции на ось  $r$  и ось  $z$  соответственно.

Уравнение для вертикальной компоненты скорости рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w^2) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(-r \rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{w'^2}) - \rho s c_d w \sqrt{v^2 + w^2} - \rho g \end{aligned} \quad (2.6)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Уравнение теплопроводности газовой фазы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_p T) = \\ = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(-r \rho c_p \overline{v'T'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho c_p \overline{w'T'}) + k_g (c U_R - 4\sigma T^4) + q_5 R_5 + \alpha_v (T_s - T) \end{aligned} \quad (2.7)$$

где  $T, T_s$  – температура газовой и конденсированной фаз;

$c$  – скорость света;

$q_i$  – тепловой эффект реакций  $i$ -ого процесса (1 – пиролиз, 2 – испарение, 3 – горение кокса; 4 – несгорающие продукты пиролиза; 5 – газообразные продукты пиролиза);

$\alpha_v = \alpha S - \gamma c_p \dot{m}$  – коэффициент межфазного теплообмена газовой фазы;

$S = 4\phi_s / d_s$  – коэффициент межфазного теплообмена конденсированной фазы;

$\alpha = Nu \cdot \lambda / d_s$  – коэффициент теплообмена для элементов растительного покрова;

$Nu$  – число Нуссельта для цилиндра,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности для хвоинки;

$\gamma$  – параметр, характеризующий отношение между молекулярной массой окружающих и вдуваемых газов;

$c_p$  – удельная теплоемкость газовой фазы;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$k_g$  – коэффициенты поглощения для газодисперсной и фазы;

$U_R$  – плотность энергии излучения.

Уравнение для концентрации компонентов (турбулентная диффузия):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho c_\alpha) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_\alpha) = \\ = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(-r \rho \overline{v'c'_\alpha}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{w'c'_\alpha}) + R_{5\alpha}, \alpha = 1-4 \end{aligned} \quad (2.8)$$

где  $R_{5\alpha}$  – массовая скорость образования компонентов газодисперсной фазы;

$c_\alpha$  – массовые концентрации (где  $\alpha$ : 1 - кислород, 2 – горючие продукты пиролиза, 3 – углекислый газ (CO<sub>2</sub>); 4 – инертные компоненты воздуха).

Уравнение переноса энергии излучения:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{rc}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} \right) - kcU_R + 4\sigma(k_g T^4 + k_s T_s^4) = 0, k = k_g + k_s \quad (2.9)$$

где  $k$  – коэффициент ослабления излучения;

$k_s$  – коэффициенты поглощения для и конденсированной фазы.

Уравнение для теплопроводности твердой фазы:

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \phi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (cU_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s) \quad (2.10)$$

где  $c_{pi}, \rho_i, \phi_i$  – удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли  $i$ -ой фазы (1 – сухое органическое вещество, 2 – вода в жидко-капельном состоянии, 3 – конденсированные продукты пиролиза, 4 – минеральная часть, 5 – газовая фаза).

Уравнение химической кинетике состоят из истинных плотностей:

– продуктов разложения сухого органического вещества:

$$\rho_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial t} = -R_1 \quad (2.11)$$



– продуктов испарения:

$$\rho_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial t} = -R_2 \quad (2.12)$$

– конденсированных продуктов пиролиза:

$$\rho_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3 \quad (2.13)$$

– несгорающих продуктов (зола):

$$\rho_4 \frac{\partial \phi_4}{\partial t} = 0 \quad (2.14)$$

где  $M_c, M$  – молекулярные веса индивидуальных компонентов углерода и воздушной смеси.

Массовые концентрации продуктов горения в сумме равны единице, что позволяет из уравнения состояния получить истинные значения результатов:

$$\sum_{\alpha=1}^4 c_{\alpha} = 1, p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_{\alpha}}{M_{\alpha}} \quad (2.15)$$

Приток в газовую фазу за счет химических реакций (пиролиз, испарение, горение кокса):

$$\dot{m} = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3 \quad (2.16)$$

где  $R_{s1} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5$  – источниковый член для кислорода;

$R_{s2} = \nu(1 - \alpha_c) R_1 - R_5$  – источниковый член для продуктов пиролиза;

$\alpha_c, \nu$  – коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза.

Кинетика химических реакции в зависимости от температуры описаны при помощи закона Аррениуса:

– массовая скорость пиролиза лесных горючих материалов:

$$R_1 = k_1 \rho_1 \phi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right) \quad (2.17)$$

– массовая скорость испарения влаги:

$$R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_s^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right) \quad (2.18)$$

– массовая скорость горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза:

$$R_3 = k_3 \rho \varphi_3 s_\sigma c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right) \quad (2.19)$$

– массовая скорость горения газообразных продуктов пиролиза (газовая фаза):

$$R_5 = k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) \quad (2.20)$$

где  $s_\sigma$  – удельная поверхность элемента лесных горючих материалов;

$E_i, k_i$  - энергии активации и предэкспоненты реакций  $i$ -ого процесса (1 – пиролиза, 2 – испарения, 3 – горения кокса; 4 – несгорающих продуктов пиролиза; 5 – газообразных продуктов пиролиза).

Начальные и граничные условия для системы уравнений (2.4 – 2.20) имеют следующий вид:

$$t = 0: v = 0, w = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, T_s = T_e, \phi_i = \phi_{ie} \quad (2.21)$$

Поскольку задача осесимметричная, при инициализации необходимо задать следующие параметры системы:

$$r = 0: v = 0, \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} = 0, \frac{\partial U_R}{\partial r} = 0 \quad (2.22)$$

$$r = r_e: \frac{\partial v}{\partial r} = 0, \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{c}{3k} \cdot \frac{\partial U_R}{\partial r} + \frac{c}{2} U_R = 0 \quad (2.23)$$

$$z = z_0: \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \therefore -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2} U_R = 0 \quad (2.24)$$

$$z = z_e: \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2} \cdot U_R = 2q_R(r, z) \quad (2.25)$$

Индексы «0» и «e» относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно.

Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют горючим материалам соснового леса. Движение тепла, массы и количества записываются через градиенты среднего течения турбулентных потоков. Балансовые соотношения массы, энергии и количества движения, изложенные в уравнениях (2.4) - (2.20), составляют сложную систему, позволяющую решить важную задачу - определить характеристики лесного пожара. Этот процесс взаимосвязан с многими факторами, и его исследование требует точных расчетов и изучения множества переменных. Результаты такого исследования могут быть использованы для создания более эффективных методов борьбы с возникновением пожаров в лесах. Научно-технический прогресс позволяет применять новые инструменты для анализа данных, что позволяет сделать более точный прогноз возникновения пожаров и составить эффективный план действий для их предотвращения и ликвидации.

Системы уравнений с (2.4) по (2.20) содержит компоненты турбулентной конвекции, которые нуждаются в замыкании. Расчет компонентов тензора турбулентных напряжений, турбулентных потоков тепла и массы записываются через градиенты среднего течения:

$$-\overline{\rho v'w'} = \mu_t \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{2}{3} K \delta \quad (2.26)$$

$$-\overline{\rho c_p v'T'} = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.27)$$

$$-\overline{\rho c_\alpha' w'} = D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial z}, \quad -\overline{\rho c_\alpha' v'} = D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} \quad (2.28)$$

$$\lambda_t = \mu_t c_p / \text{Pr}_t \quad (2.29)$$

$$\rho D_t = \mu_t / \text{Sc}_t \quad (2.30)$$

где  $K$  – кинетическая энергия турбулентности,

$\mu_t, \lambda_t, D_t$  – коэффициенты турбулентной динамической вязкости, турбулентной теплопроводности и диффузии;

$Pr_i, Sc_i$  – турбулентные числа Прандтля и Шмидта;

$\delta$  – символ Кронекера.

Используя локально-равновесную модель турбулентности в плоском двумерном случае, коэффициент турбулентной динамической вязкости определяется по формуле:

$$\mu_t = \rho l^2 \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 - \frac{2}{3} \left[ \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right]^2 - \frac{g}{T Pr_i} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\}^{1/2} \quad (2.31)$$

где  $l$  – длины пути смешения, рассчитывается по формуле:

$$l = z k_i / \left( 1 + 2,5 z \sqrt{c_d s / h} \right) \quad (2.32)$$

$k_i$  – константа Кармана ( $k_i = 0,4$ );

$h$  – размер полога леса.

Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики:

$$\begin{aligned} E_1 / R = 9400 \text{ К}; \quad E_2 / R = 6000 \text{ К}; \quad E_3 / R = 10^4 \text{ К}; \quad E_5 / R = 11500 \text{ К}; \quad k_1 = 3,36 \cdot 10^4 \text{ 1/с}; \\ k_2 = 6 \cdot 10^5 \text{ 1/с}; \quad k_3 = 10^3 \text{ 1/с}; \quad k_5 = 3 \cdot 10^{13} \text{ 1/с}; \quad q_1 = 0 \text{ Дж/кг}; \quad q_2 = 3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}; \\ q_3 = 12 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}; \quad q_5 = 10^7 \text{ Дж/кг}; \quad c_{p1} = 2000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad c_{p2} = 2000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ c_{p3} = 4180 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad c_{p4} = 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad c_{p5} = 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad \rho_1 = 500; \\ \rho_2 = 10^3; \quad \rho_3 = 200; \quad \rho_{5H} = 1,16 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_H = 10^5 \text{ Н/м}^2; \quad h = 10 \text{ м}; \quad T_H = 300 \text{ К}; \\ N = 0,0375 \text{ м}^{-1}; \quad \varphi_{3H} = 0; \quad c_{2H} = 0; \quad \mu_1 = 1 \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}; \quad S_\sigma = 10^3 \text{ м}^{-1}; \quad \rho_4 \varphi_4 = 0,08; \\ \alpha_c = 0,06; \quad Sc_d = 0,01 \end{aligned}$$

## 2.2 Методика численного решения задач двумерной задачи

Разработанная математическая модель процесса горения при техногенных авариях уникальна, так как включает в себя метод контрольного объема Патанкара–Сполдинга, который повышает ее эффективность. Расщепление по физическим и химическим процессам улучшает точность расчета параметров для смеси реагирующих газов и уравнений химической кинетики, а учет химических источников для скалярных функций позволяет решить проблему более точно. Благодаря этим усовершенствованиям, модель может использоваться для детального анализа процесса горения при техногенных авариях и принятия решений по его предотвращению [22].

Метод контрольных объемов позволяет сократить вероятность возникновения ошибок при выполнении интегральных законов сохранения, таких как сохранение массы, количества движения и энергии, в каждом контрольном объеме. Для этого область разбивается на несколько непересекающихся контрольных объемов, где каждая узловая точка находится только в одном из них (рис. 2.3). Выполняется точный интегральный баланс на всей расчетной области, при помощи кусочных профилей, которые описывают изменение искомой функции между узловыми точками. Система дифференциальных уравнений численно решается в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями [16].

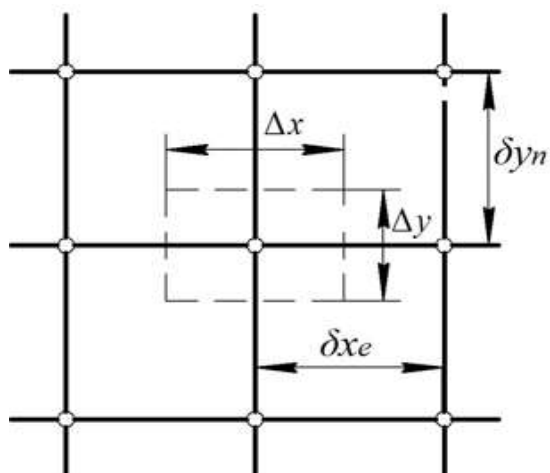


Рисунок 2.3 – Типичный контрольный объем для двумерного случая, где  $\Delta x$  и  $\Delta y$  – размеры контрольного объема;  $\delta x_e$ ,  $\delta y_n$  – расстояния до центров соседних контрольных объемов

Полученный дискретный аналог позволяет выразить закон сохранения для ограниченного количества контрольных объемов рассматриваемой системы. Таким образом, мы можем рассмотреть процессы для бесконечно малого контрольного объема., что дает более точное понимание физических явлений.

В процессе дискретизации возникают сеточные дифференциальные уравнения в частных производных, которые решались при помощи метода строго неявной процедурой – SIP (strongly implicit procedure) [23]. Данный метод не применяется к общей системе уравнений.

Смещенная или шахматная сетка для расчета составляющих скорости лежит в основе процедур SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) [24], что означает полунеявный метод для согласования полей скорости и давления итерационным образом.

### 2.3 Алгоритм программной реализации математической модели

Математическая модель процесса горения при техногенных авариях включает в себя описание физико-химических процессов. Рассчитываются параметры, характеризующие течение смеси реагирующих газов, при этом учитываются химические источники для скалярных функций. Это позволяет повысить точность расчетов и оценить характеристики процесса более детально [25].

Важным критерием при реализации программного комплекса является корректная инициализация, которая включает задание соответствующих начальных и граничных условий в зависимости от входных параметров системы. Алгоритм решения приведенной задачи представлен на рисунке 2.4.

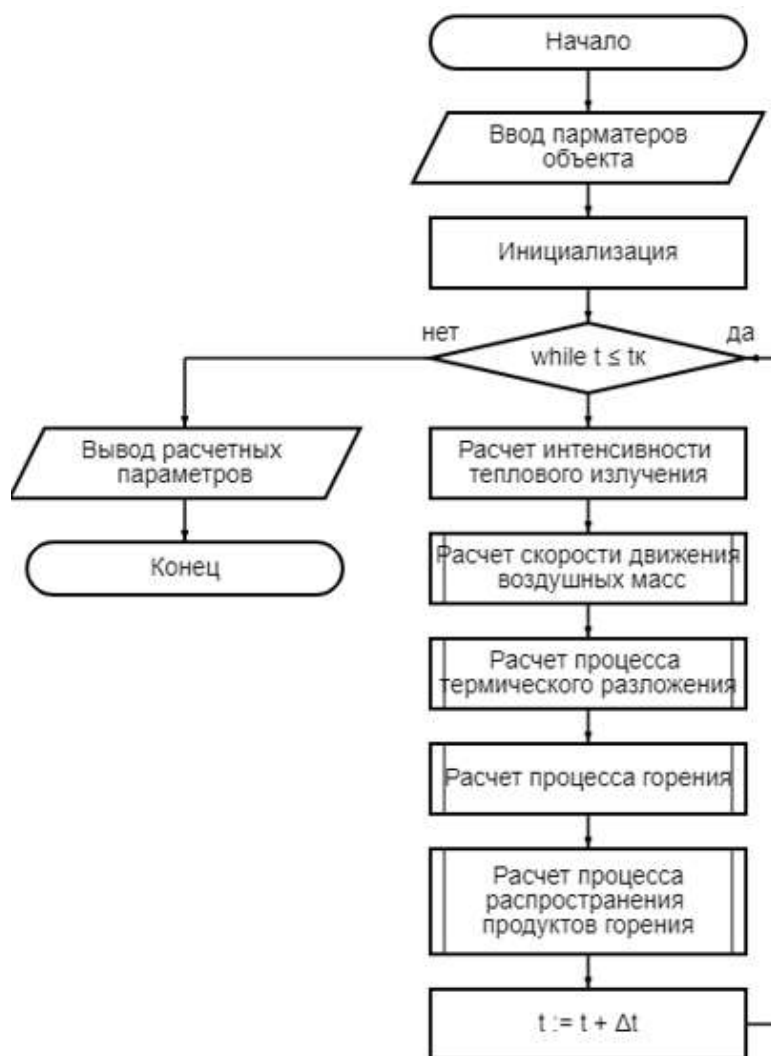


Рисунок 2.4 – Алгоритм работы основной программы

Решению нелинейных уравнений заключается в задании приближенных искомых функций, где используются значения с предыдущего слоя по времени. Для первого итерационного шага – это начальные условия. Интервалы, через которые алгоритм вычисляет неизвестные показатели выбирался автоматически, что позволило осуществлять процесс решения на втором этапе с уменьшенным шагом по времени, если это было необходимо.

Разработанный программный комплекс, содержит внутреннюю верификации, которая удовлетворяет уравнению неразрывности. В процессе расчетов сходимость достигается через ряд полей скорости итерационным образом в рамках алгоритма SIMPLE (рис.2.5).

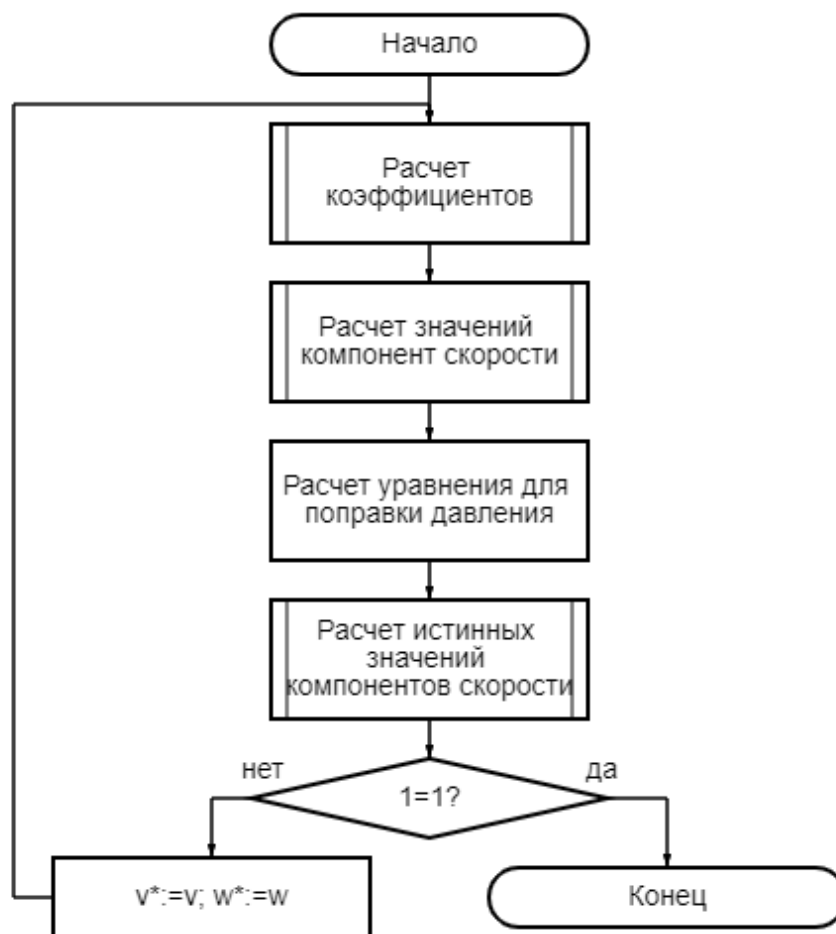


Рисунок 2.5 – Алгоритм работы подпрограммы расчета скорости движения воздушных масс

Решение дифференциальных уравнений, которые описывают физико-химические процессы системы интегрируется по типичному контрольному объему, где используется неравномерная сетка по пространству. Полученные



значения подставляются в качестве начального приближения, и процесс повторяется. Алгоритм работы подпрограмм для расчета дифференциальных уравнений методом SIP представлен на рисунке 2.6.

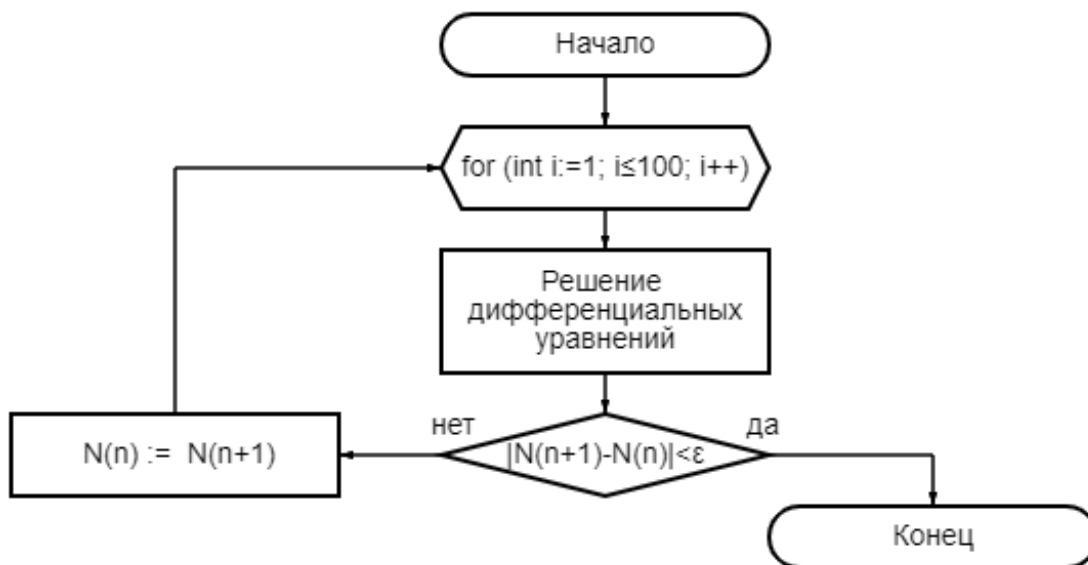


Рисунок 2.6 – Алгоритм работы подпрограмм для расчета дифференциальных уравнений методом SIP

Решение считалось найденным, на итерационном шаге, если абсолютная погрешность составляет не более 1%.

## 2.4 Верификация результатов численного исследования и модели программного комплекса с использованием известных данных

### 2.4.1 Численное исследование плотности теплового излучения от огненного шара

Оценить масштабы техногенной аварии, которая сопровождается образованием огненного шара, возможно при помощи количественных показателей. Поражающее воздействие, которое оказывается на объекты, расположенные вблизи территории аварийной ситуации, является тепловое излучение. Быстрое распространение лучистой энергии образует новые зоны зажигания, по траектории движения крупномасштабного диффузного пламени.

ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» содержит методику расчета интенсивности теплового излучения и времени существования огненного шара. Согласно нормативно технической документации, был проведен анализ исходной математической модели на предмет корректной работы.

Величина плотности теплового излучения от огненного шара, образовавшегося в результате утечке природного газа:

$$q = E \cdot F_q \cdot \tau = 220 \cdot 1,1 \cdot 1,0 = 242 \text{ кВт/м}^2 \quad (2.33)$$

где  $E$  – средне поверхностная плотность теплового излучения факела пламени (на основе имеющихся экспериментальных данных для природного газа допускается принимать  $E = 150 \dots 220 \text{ кВт/м}^2$ );

$\tau$  – коэффициент пропускания атмосферы;

$F_q$  – угловой коэффициент облученности.

Значения углового коэффициента облученности определяется по формуле:

$$F_q = \frac{D_s^2}{4 \cdot (H^2 + b^2)} = \frac{218,1^2}{4 \cdot (100^2 + 28,2^2)} = 1,1 \quad (2.34)$$

где  $H$  — высота центра огненного шара равная 100 м;

$D_s$  — эффективный диаметр огненного шара, м;

$b$  — расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара, м.

Геометрические параметры, характеризующие тепловое воздействие огненного шара, рассчитываются следующим образом:

1. Эффективный диаметр огненного шара:

$$D_s = 6,48 \cdot m^{0,325} = 6,48 \cdot (50 \cdot 10^3)^{0,325} = 218,1 \text{ м} \quad (2.35)$$

где  $m$  — масса продуктов, поступившего в окружающее пространство ( $m = 50 \cdot 10^3$  кг).

2. Расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности Земли непосредственно под центром огненного шара:

$$b = \sqrt{h^2 + r^2} = \sqrt{10^2 + 26,4^2} = 28,2 \text{ м} \quad (2.36)$$

где  $r$  — радиус воздействия теплового излучения (согласно работе программного комплекса, радиус равен 26,4 м).

Коэффициента пропускания атмосферы для огненного шара рассчитывается по формуле:

$$\tau = \exp \left[ -7 \cdot 10^{-4} \left( \sqrt{b^2 + H^2} - \frac{D_s}{2} \right) \right] = \exp \left[ -7 \cdot 10^{-4} \left( \sqrt{28,2^2 + 100^2} - \frac{218,1}{2} \right) \right] = 1 \quad (2.37)$$

Интенсивность теплового излучения огненного шара, сформировавшегося в результате утечки легковоспламеняющихся углеводородных газов в единицу времени, определяется по следующей формуле:

$$q_t = q \cdot t = 242 \cdot 16,7 = 4041 \text{ кДж} \cdot \text{с}/\text{м}^2 \quad (2.38)$$

где  $t$  — время существования огненного шара:

$$t = 0,852 \cdot m^{0,26} = 0,852 \cdot (50 \cdot 10^3)^{0,26} = 16,7 \text{ с} \quad (2.39)$$

## 2.4.2 Верификация результатов программного комплекса

Верификация программного комплекса подразумевает математическое доказательство соответствия своему предназначению. Математическая модель выражена, системой алгебраических уравнений, которые описывают процесса горения растительного покрова в результате воздействия лучистой энергии. Зависимость описывающая интенсивность теплового излучения рассчитывается по формуле (2.1).

Геометрические параметры системы:

1. Расстояние от центра источника излучения до полога леса:

$$D = \sqrt{(H - h)^2 + r^2} = \sqrt{(100 - 90)^2 + 26,4^2} = 93,8 \text{ м} \quad (2.40)$$

2. Синус угла между направлением вектора плотности потока излучения и верхней границей растительного покрова, рассчитывается, как отношение:

$$\sin L = \frac{H - h}{D} = \frac{100 - 90}{93,8} = 0,96 \quad (2.41)$$

Согласно входным параметрам системы, мощность источника принимается равной  $2,092 \cdot 10^{12}$  Дж, что соответствует теоретическим данным (менее 1кт) [26].

Формула для расчета времени максимального тепловыделения источника излучения имеет вид:

$$t_0 = 0,032 w_0^{0,5} = 0,032 (2,092 \cdot 10^{12})^{0,5} = 0,05 \cdot 10^6 \text{ с} \quad (2.42)$$

Величина светового импульса в момент максимума тепловыделения источника излучения определяется по формуле:

$$P_m = 4 \cdot w_0^{0,5} = 4 \cdot (2,092 \cdot 10^{12})^{0,5} = 5,6 \cdot 10^6 \text{ Дж} \quad (2.43)$$

Время воздействия теплового излучения состоит из двух компонент, которые определяются:

$$\int_0^{t_m} t/t_m dt = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} t dt = \frac{1}{t_m} \left( \frac{t^2}{2} \right) \Big|_0^{t_m} = \frac{1}{t_m} \cdot \frac{t_m^2}{2} = 0,2t \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned}
& \int_{t_m}^t \exp\left[-0,75\left(\frac{t}{t_m}-1\right)\right] dt = \\
& = -\frac{t_m}{0,75} \int_{t_m}^t \exp\left[-0,75\left(\frac{t}{t_m}-1\right)\right] d\left(-0,75\left(\frac{t}{t_m}-1\right)\right) = \quad (2.45) \\
& = -\frac{t_m}{0,75} \left( \exp\left[-0,75\left(\frac{t}{t_m}-1\right)\right] \right) \Big|_{t_m}^t = -\frac{t}{3 \cdot 0,75} \cdot (-0,8) = 0,4t
\end{aligned}$$

Интенсивность теплового излучения на поверхность объектов в течении времени равна:

$$q_R(r,t) = \frac{5,6 \cdot 10^6 \cdot 0,96}{4 \cdot 3,14 \cdot 93,8^2} (0,6 \cdot 0,05 \cdot 3 \cdot 10^6) = 4385 \text{ кДж} \cdot \text{с}/\text{м}^2 \quad (2.46)$$

### 2.4.3 Погрешность результатов

Взаимосвязь между различными физическими величинами описана физическими законами, которые представляют идеализированную модель действительности. Конечной целью верификации является проверка адекватности или уточнение параметров рассмотренных моделей.

Учитывая, что истинное значение неизвестно, как следствие неизвестна и истинная погрешность. Произведем расчет для нахождения некоторого приближенного к истинному значения с указанием диапазона возможных отклонений этого приближенного значения от истинного.

1. Абсолютная погрешность:

$$\Delta = |X_D - X_P| = |4041 - 4186| = 145 \quad (2.47)$$

где  $X_D$  – действительное значение, рассчитанное согласно ГОСТ Р 12.3.47-2012;

$X_P$  – расчетное значение, полученное согласно математической модели.

2. Относительная погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_d} \cdot 100\% = \frac{145}{4041} \cdot 100\% = 3,6\% \quad (2.48)$$

Согласно проведенной оценке, разработанная модель имеет интервалы отклонения, которые характеризуют недостаточную точность расчетных величин, полученных в результате округления.

Найденное значение теплового излучения в результате образования огненного шара, имеет высокий показатель интенсивности, что является причиной разрушения растительного покрова – лесных массивов зданий и сооружений. Результаты верификации теплового излучения соответствуют величине критического теплового потока 33,5 кВт/м<sup>2</sup> через 120 секунд (4020 кДж с/м<sup>2</sup>) для самовоспламенения сосновой древесины [27].

## **3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

### **3.1 Математическое моделирование возникновения очага горения**

Решение поставленной задачи включает моделирование процесса горения при воздействии источника теплового излучения, где входные параметры системы соответствуют характеристикам соснового леса.

В результате численного интегрирования, в двумерной постановке, при массе углеводородного топлива 50 т, определен радиуса зажигания растительного покрова, при воздействии лучистой энергии. Предложенная модель дает детальную картину изменения скорости, температуры и массовых концентрации компонентов газовой фазы (продукты пиролиза и горения) в различные моменты времени во всех областях, а также влияние различных условий на распространение пожара.

#### **3.1.1 Анализ результатов процесса зажигания при верховом пожаре**

Математическое моделирование процесса горения растительного покрова позволяет определить зону поражения, в результате неконтролируемого горения – пожара. Распределение изотерм температур газовой фазы в начальный момент времени и в момент, где зажигания имеет максимальные размеры представлены на рисунке 3.1.

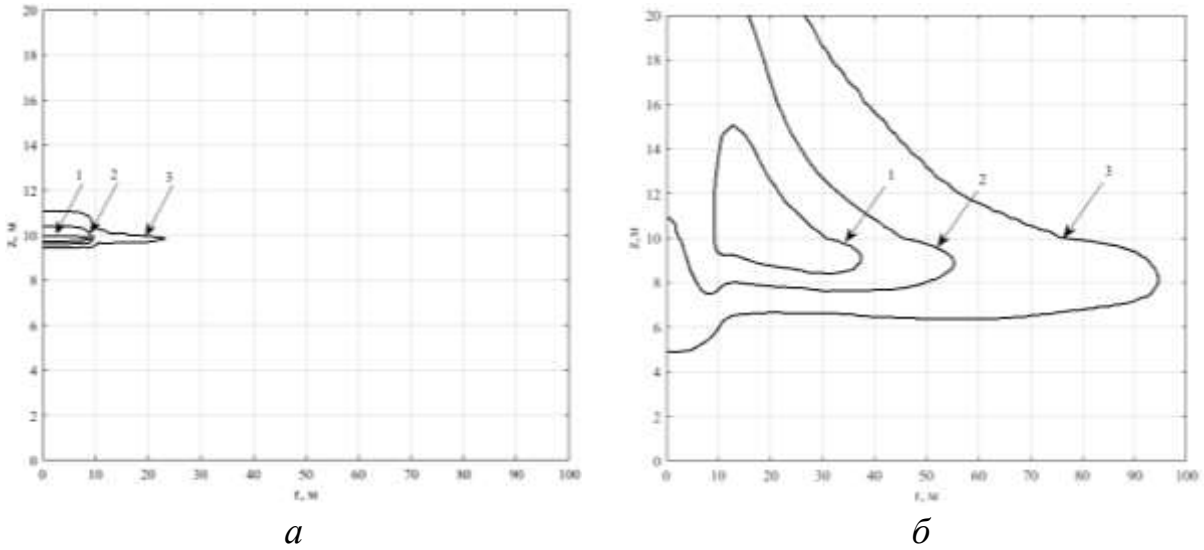


Рисунок 3.1 – Распределение изотерм: *a* – газовой фазы при  $t = 1$  с.;  
*б* – газовой фазы при  $t = 13$  с., где 1 –  $T = 690$  К; 2 –  $T = 540$  К; 3 –  $T = 420$  К.

Процессы, протекающие в пологе леса, имеют максимальный прогрев среды в центральной части рассматриваемой области. В результате действия архимедовой силы происходит поднятие масс нагретых газов. Векторная картина распределения скорости, направлена с периферии к центру области зажигания (рис.3.2).

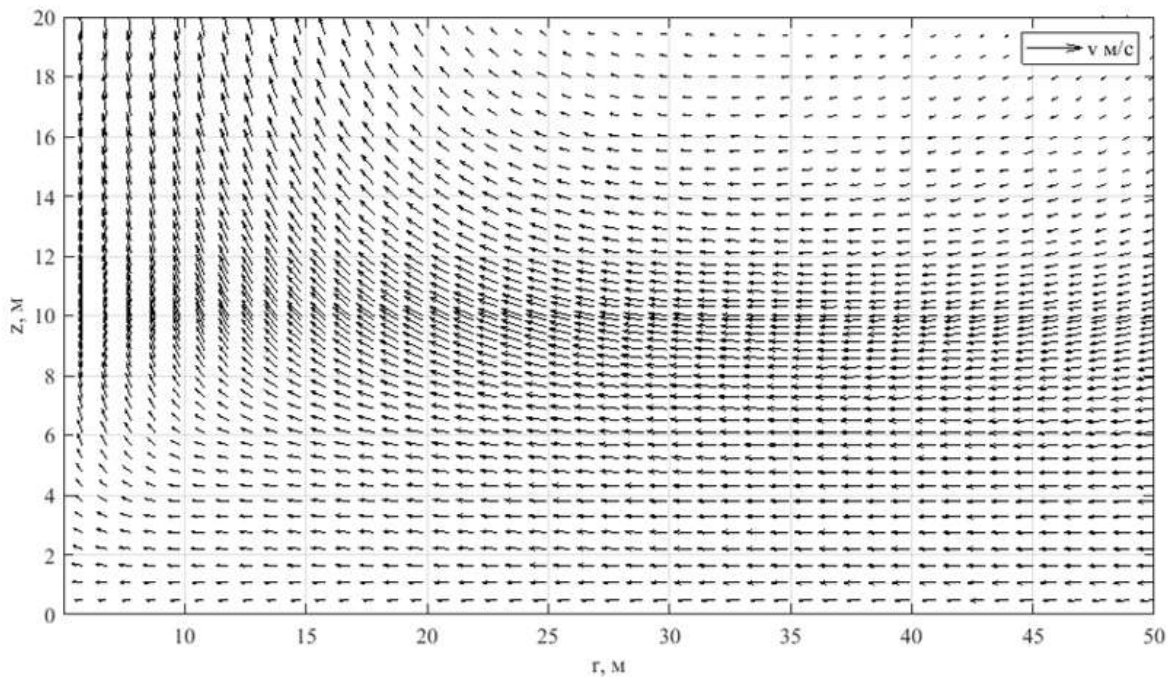


Рисунок 3.2 – Векторное поле скорости

Термические и физико-химические процессы, протекающие при зажигании растительного покрова, были промоделированы с различными



входными параметрами. Изменение данных, рассматриваемой системы, приводит к различным результатам, которые при помощи количественных показателей характеризуют процесс аварийной ситуации техногенного характера.

Результаты исследования влияния влагосодержания горючих материалов на радиус зажигания растительного покрова представлено в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Радиус зажигания полога леса при запасе лесных горючих материалов 0,2 кг/м<sup>3</sup>

Масса топлива, т	100				50				100			
Влагосодержание горючих материалов	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
Радиус зажигания, м	48,5	48,5	48,5	45,5	32,9	29,4	26,4	24,4	21,3	19,8	17,8	15,0

Полученные значения радиуса зажигания для различных масс топлива, позволяют сделать вывод, что влагосодержание – величина сезонно и метеорологически меняющаяся. Учитывая данный параметр системы, получают достоверные данные о радиусе зажигания, где минимальные показатели влагосодержания соответствуют максимальному радиусу зажигания лесных горючих материалов.

По результатам исследования было выявлено, что увеличение массы топлива приводит к повышению содержания углеводородов, которые содействуют образованию «огненного шара». С этим связано повышение характеристик данного процесса. Кроме того, отмечается усиление тепловыделения с поверхности диффузионного пламени, что повышает температуру на поверхности лесного массива. С учетом этих выводов можно предположить, что масса топлива существенно влияет на характер и масштаб возможных пожаров в природных экосистемах.

Согласно проведенным расчетам, радиус зажигания полога леса для различных масс топлива уменьшается от 48,5 до 15,0 метров, при увеличении влагосодержание лесных горючих материалов от 0,2 до 0,8 (20 до 80 %) соответственно (рис.3.3).

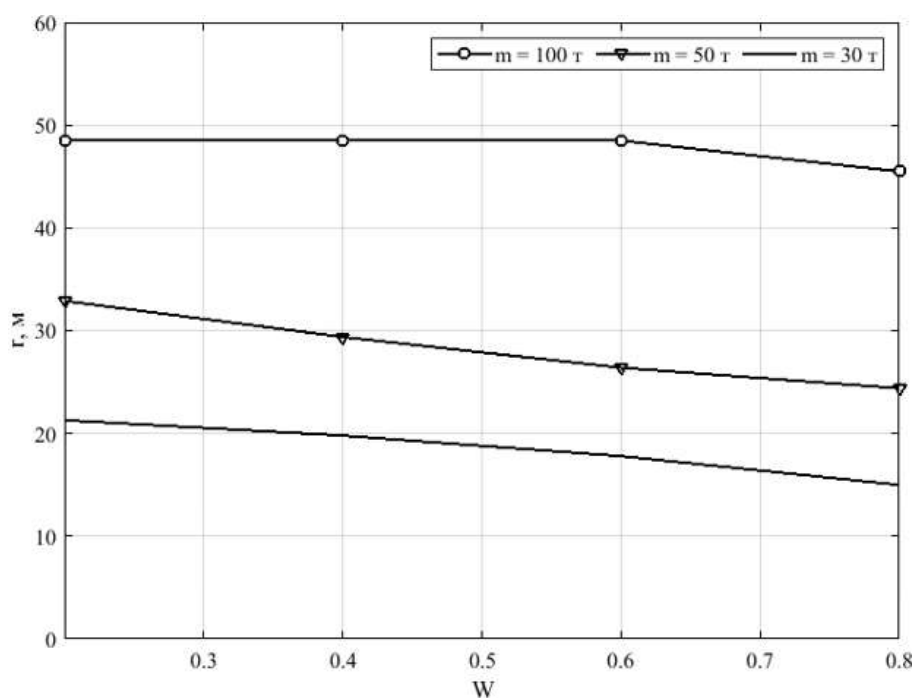


Рисунок 3.3 – Зависимость радиуса зажигания полога леса от массы топлива и влагосодержания лесных горючих

Расстояния от эпицентра взрыва до полога растительного покрова, где происходит зажигание выражено зависимостью от запаса лесных горючих материалов. Результаты исследования представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Радиус зажигания полога леса при влагосодержании лесных горючих материалов 0,6

Масса топлива, т	100				50				30	
Влагосодержание ЛГМ	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4
Радиус зажигания, м	42,9	35,9	16,8	15,8	26,4	19,3	9,8	9,3	18,8	12,3

Распределение зоны возгорания на верхней границе полога леса показывает максимальное его значение при запаса лесных горючих материалов  $0,2 \text{ кг/м}^3$  и массой топлива 100 тонн. Полученное в результате численного эксперимента значение представлены на рисунке 3.4.

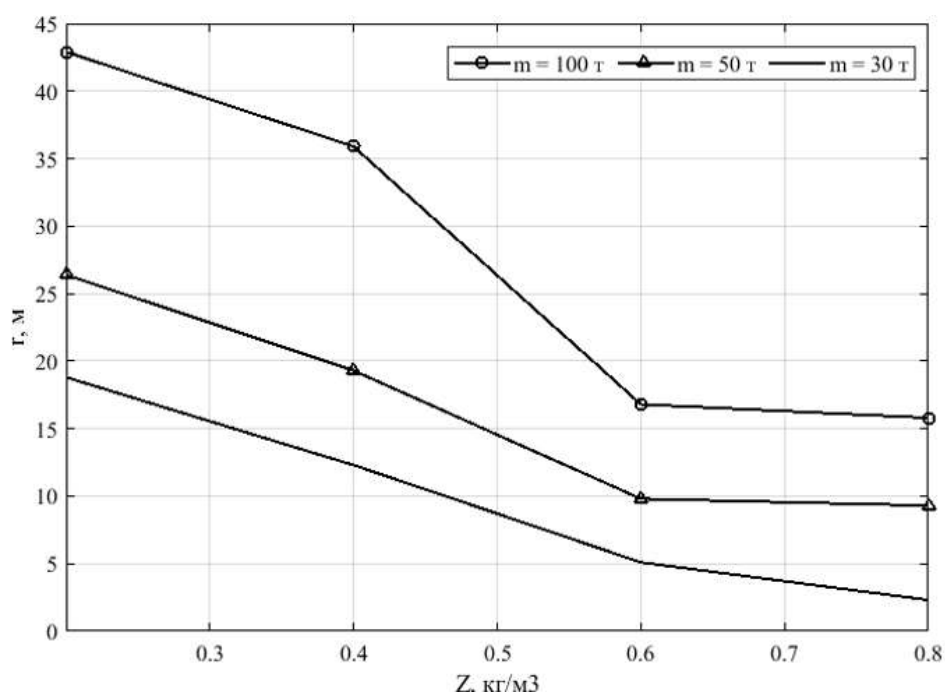


Рисунок 3.4 – Зависимость радиуса зажигания полого леса от массы топлива и запаса лесных горючих

Согласно проведенным расчетам для углеводородного топлива с запасом лесных горючих материала в диапазоне от 0,2 до 0,8 кг/м<sup>3</sup> получены значения радиуса зажигания растительных горючих материалов. Диапазон полученных значений варьируется от 42,9 до 12,3 метров.

Процесс распространения неконтролируемого горения на рассматриваемом объекте, характеризуется физико-химическими процессами, которые позволяют произвести комплексный анализ аварийной ситуации на промышленном объекте (табл.3.3).

Таблица 3.3 – Температурные показатели, характеризующие физико-химический процесс при пожаре с течением времени

		Время воздействия теплового излучения, с						
		0,9	1,9	5,9	6,9	7,9	11,9	12,9
$r = min$	Температура твердой фазы, К	765	1533	1611	1620	1626	1638	1638
	Температура газовой фазы, К	300	501	618	624	615	540	528
$t = max$	Температура твердой фазы, К	546	1074	1158	1101	1062	963	945
	Температура газовой фазы, К	309	384	627	657	684	750	753

Изменения температур газовой и твердой фаз на верхней границе полога соснового леса с течением времени при различных значениях радиуса зажигания представлены на рисунке 3.5.

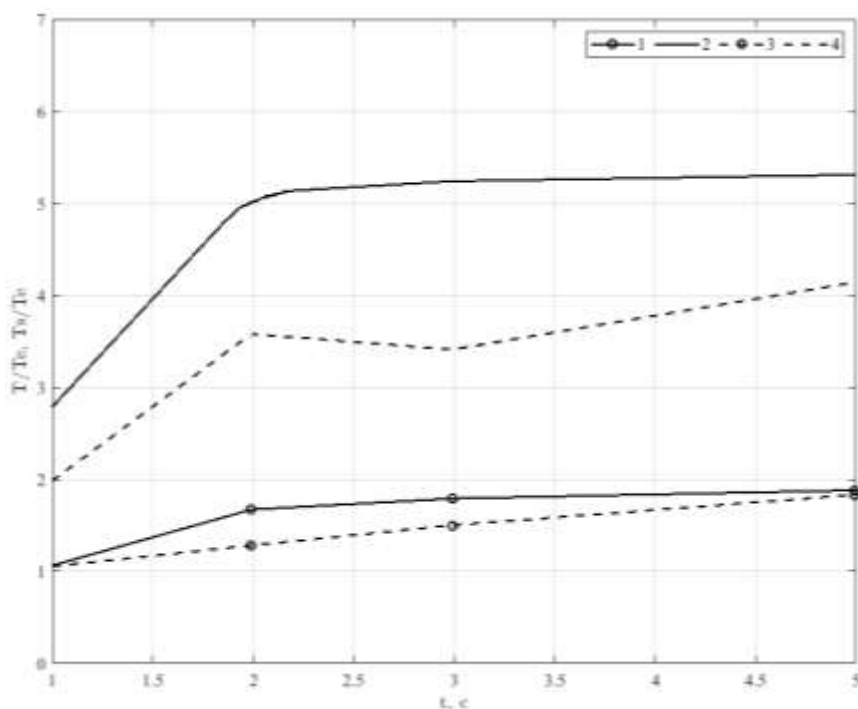


Рисунок 3.5 – Изменения температур газовой и твердой фаз с течением времени, где 1– температура газовой фазы при  $t = 1$  с., 2– температура твердой фазы при  $t = 1$  с., 3– температура газовой фазы при  $t = 13$  с.; 4 – температура твердой фазы при  $t = 13$  с.

Согласно полученным результатам, реализуются режим фактического сжигание, что соответствует минимальному радиусу зажигания. Ненормальный и не воспламененный режимы характерны для максимального радиуса зажигания растительного покрова.

Процесс горения и воспламенения является сложным и уникальным, поскольку он обладает множеством физических и химических характеристик. В процессе сжигания происходит окисление горючего вещества. Однако газообразные продукты пиролиза, образующиеся во время сжигания, также играют важную роль в данном процессе, поскольку они вызывают изменения скорости движения воздушных масс и увеличивают приток тепла. Распределения изолиний массовых концентраций летучих продуктов пиролиза

при аналогичных параметрах исследуемой системы представлены на рисунке 3.6.

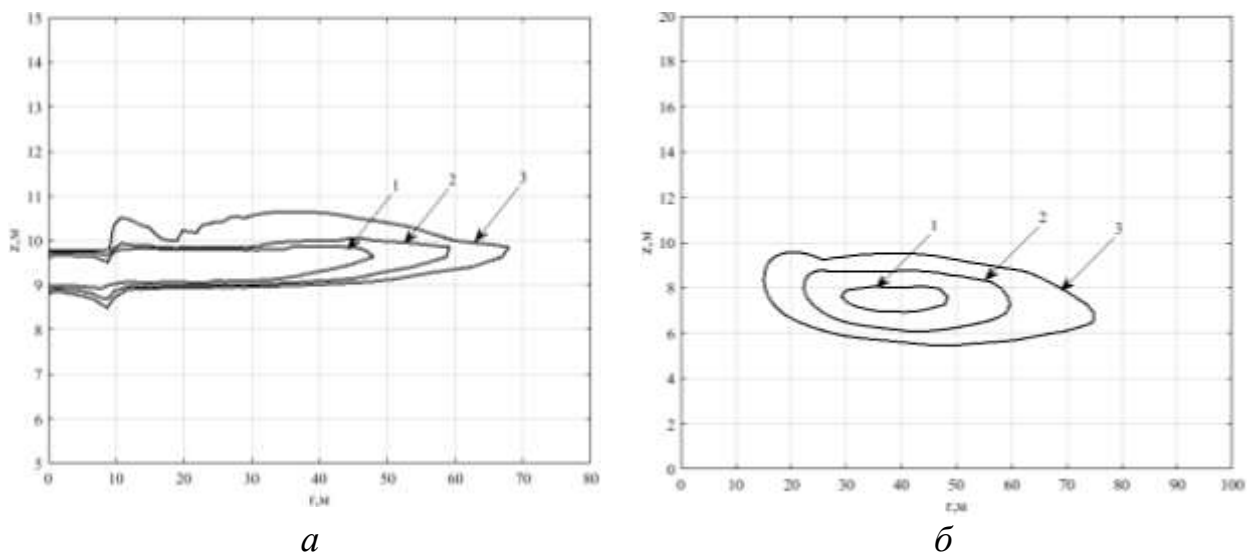


Рисунок 3.6 – Распределение изолиний концентраций летучих продуктов пиролиза при верховом пожаре: *а* – при  $t = 1$  с.; *б* – при  $t = 13$  с., где 1 –  $C_2 = 0,027$  кг/м<sup>3</sup>; 2 –  $C_2 = 0,019$  кг/м<sup>3</sup>; 3 –  $C_2 = 0,014$  кг/м<sup>3</sup>

Результаты графического моделирования характеризуют протекающую реакцию окисления при зажигании. Изменения изолиний концентрации с течением времени объясняется физико-химическими особенностями процесса горения. В первую очередь выгорают летучие продукты пиролиза, которые ближе к эпицентру взрыву.

### 3.1.2 Анализ результатов процесса зажигания при низовом пожаре

Распространение лучистой энергии на объекты расположенные вблизи к месту аварии, вызывает неконтролируемое горение. Моделирование процесса зажигания при низовом пожаре позволит определить зону поражения в результате воздействия лучистой энергии. Зависимость радиуса зажигания от времени представлена на рисунке 3.7.

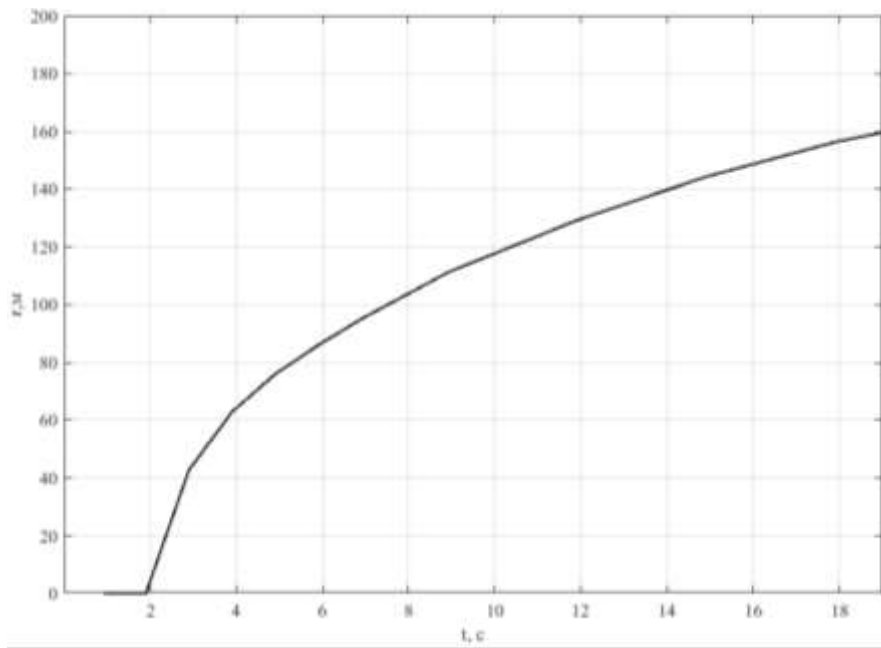


Рисунок 3.7 – Изменения радиуса зоны зажигания с течением времени

Процессы, протекающие при низовом пожаре имеют схожие характеристики системы. Однако, отличительные особенности выражены параметрами рассматриваемой области, при которых процесс горения моментально охватывает большие площади. Согласно входным данным, которые соответствуют  $1 \text{ кг/м}^3$  запасу горючих материалов и  $0,6$  влагосодержанию, максимальный радиус зоны поражения составляет  $160$  метров.

Распространение продуктов пиролиза при зажигании подстилающей поверхности лесного массива высотой  $0,05$  метров представлен на рисунке 3.8.

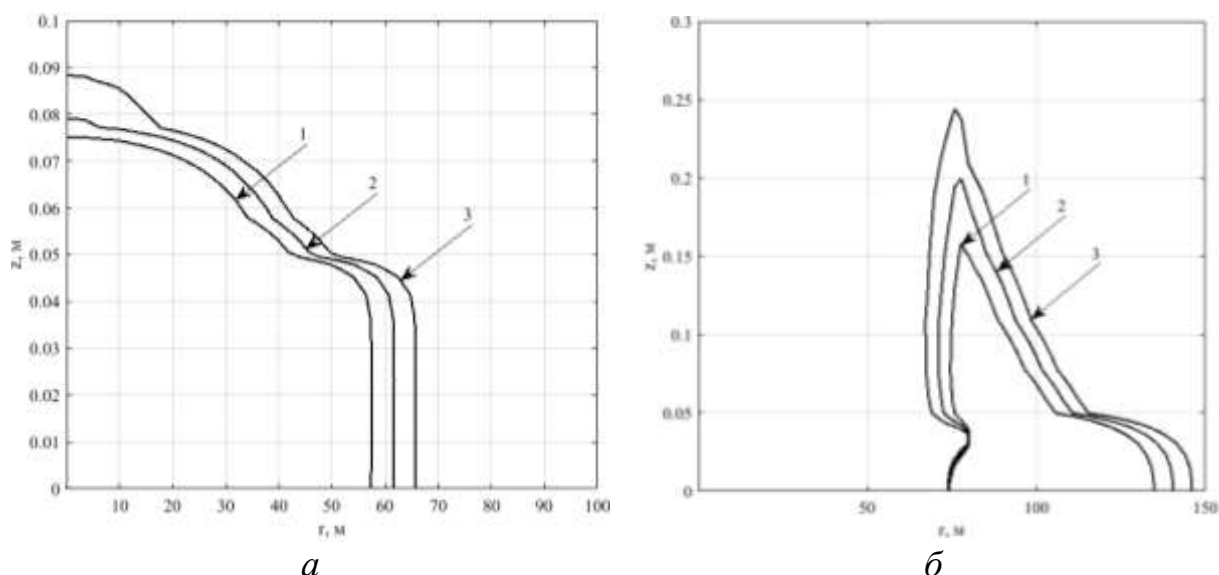


Рисунок 3.8 – Распределение изолиний концентраций летучих продуктов

пиролиза при низовом пожаре: *a* –при  $t = 1$  с.; *б* –при  $t = 13$  с,

где 1 –  $C_2 = 0,027$  кг/м<sup>3</sup>; 2 –  $C_2 = 0,019$  кг/м<sup>3</sup>; 3 –  $C_2 = 0,014$  кг/м<sup>3</sup>

Процессы, протекающие при низовом пожаре имеют схожие характеристики системы, характеризующие реакцию окисления в центре взрыва. Однако, отличительная особенность выражена переносом продуктов в полог лесного пожара, что вызывает увеличение процесса горения. Образовавшееся токсичное облако поднимаясь в атмосферу способствует расширению зоны поражения при верховом пожаре.

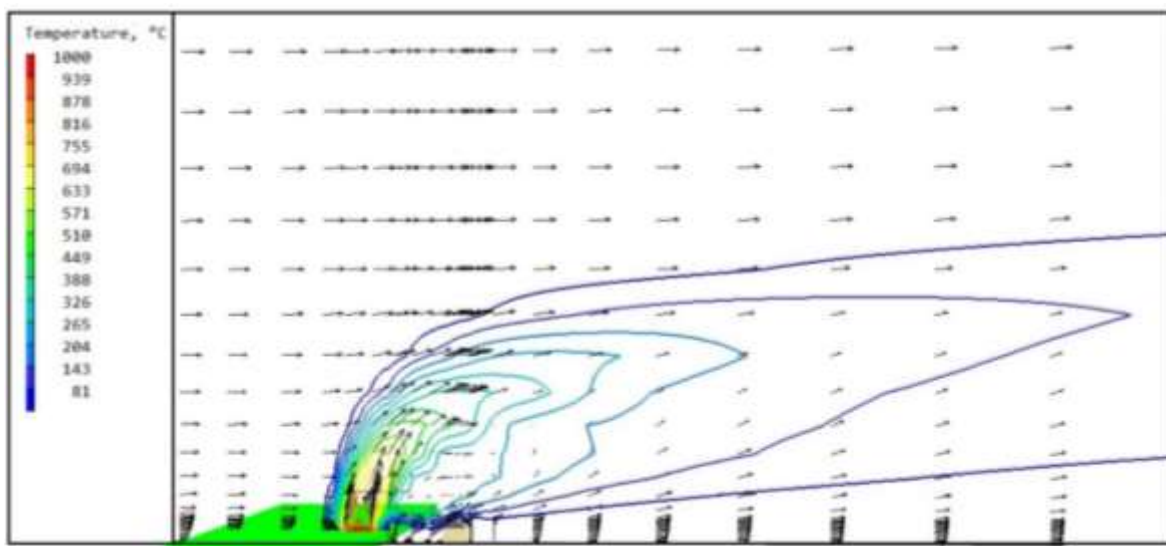
Математическая модель процесса зажигания при воздействии лучистого потока является многофакторной. Учитывая физико-химические особенности системы при пожаре, возможно наиболее точно произвести расчет для оценки масштабов аварии.

### **3.2 Математическое моделирование воздействия очага горения на населенные пункты**

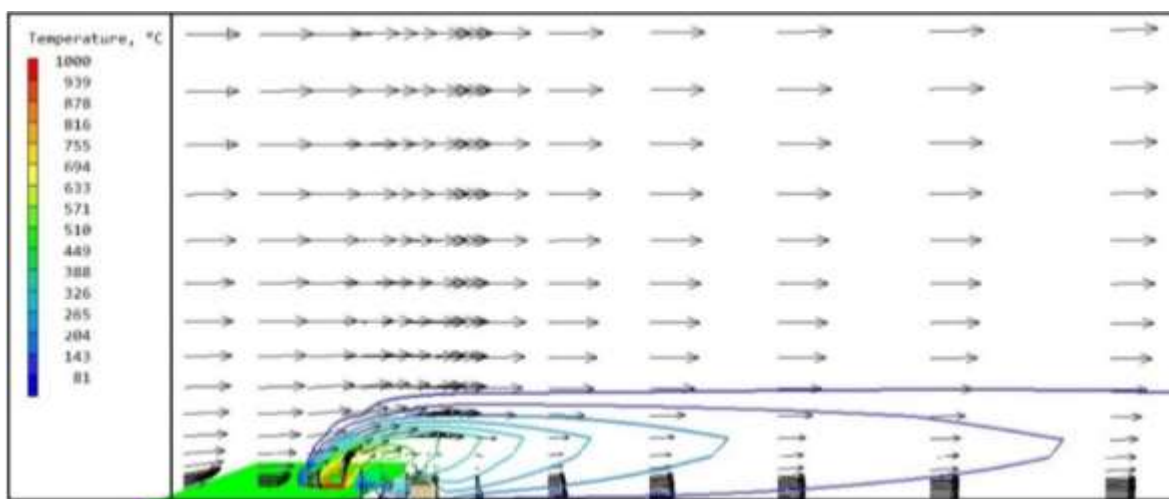
Распространение лучистой энергии на объекты расположенные вблизи к месту аварии, вызывает неконтролируемое горение. Моделирование процесса переноса продуктов горения при возгорании растительного покрова – лесного массива от теплового излучения, позволит определить воздействия вредных веществ на экосистему Земли. Параметры, характеризующие распространение токсичного облака, дают возможность с высокой точностью получить информацию о степени негативного воздействия на объекты обеспечения жизнедеятельности населенных пунктов.

Оценка экологических и климатических последствий сильных пожаров позволяет определить характер воздействию процессов горения на состояние приземного слоя атмосферы. Метеорологические условия, такие как скорость ветра и температура окружающей среды, являются важными факторами при распространении огня. Результаты анализа распределение изотерм на исследуемой территории, при различных значениях поля скорости подставлены на рисунке 3.9.





*a*



*б*

Рисунок 3.9 – Распределение изотерм и вектора поля скорости:

*a* – при  $v = 5$  м/с; *б* –  $v = 15$  м/с

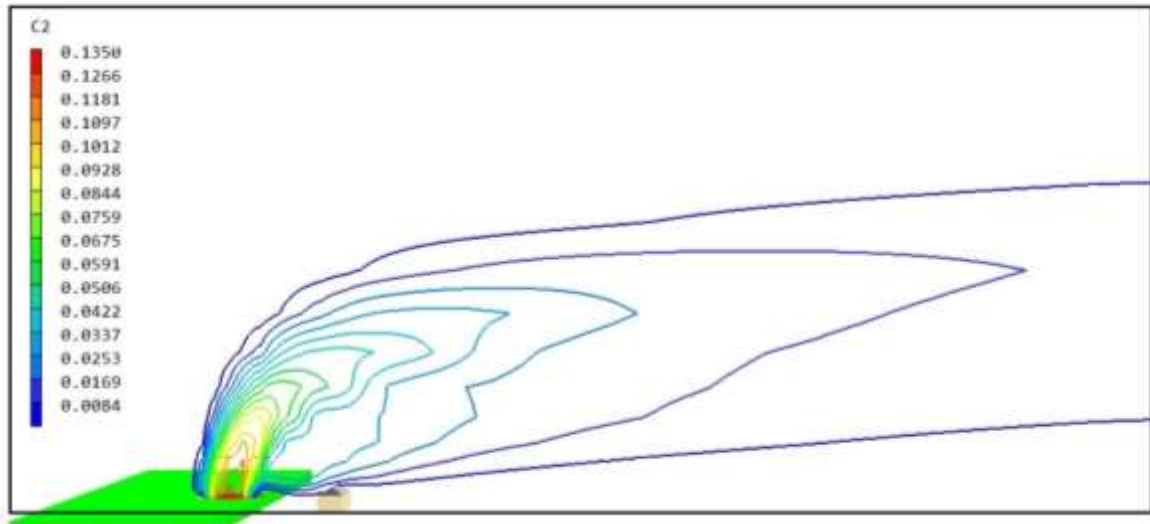
Согласно результатам исследования, векторное поле скорости образует конвективное течение. В результате происходит перенос продуктов горения на объекты расположенные в непосредственной близости к месту зажигания, что является источником распространения пожара на большие, по размерам, территории.

При увеличении скорости ветра от 5 до 15 м/с происходит непосредственное термическое воздействие на объекты строительства от 200 до 350 °С соответственно. Здания и сооружения, несущие элементы которых, изготовлены из современных строительных композиционных материалов – древесины, при термическом воздействии свыше 300 °С [20] способны к

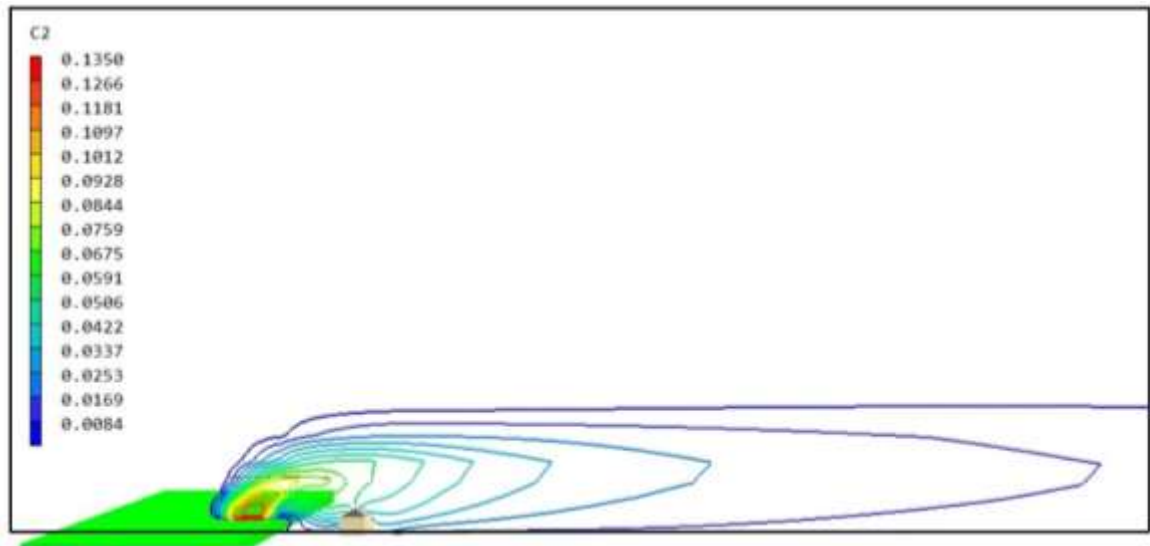
самовоспламенению. В результате, возможно, формирование дополнительного источника зажигания.

Неуправляемое азротермохимическое явление, в процессе которого происходит перенос энергии и веществ из зоны лесного пожара в результате конвекции, излучения и кондукции представляет большую опасность. Изменение концентрации вредных веществ в атмосфере приводят к необратимым нарушениями химического балансу экосистемы.

Определяющим механизмом распространения токсичного облака, является вектор поля скорости. Распределение изолиний концентраций продуктов пиролиза и продуктов горения, при различных значениях поля скорости изображено на рисунках 3.10 и 3.11 соответственно.

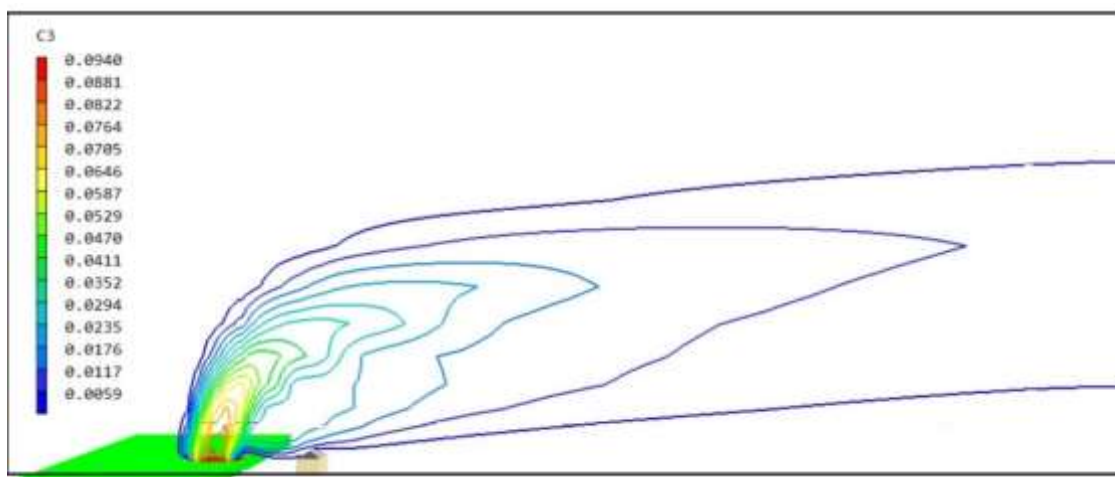


*a*

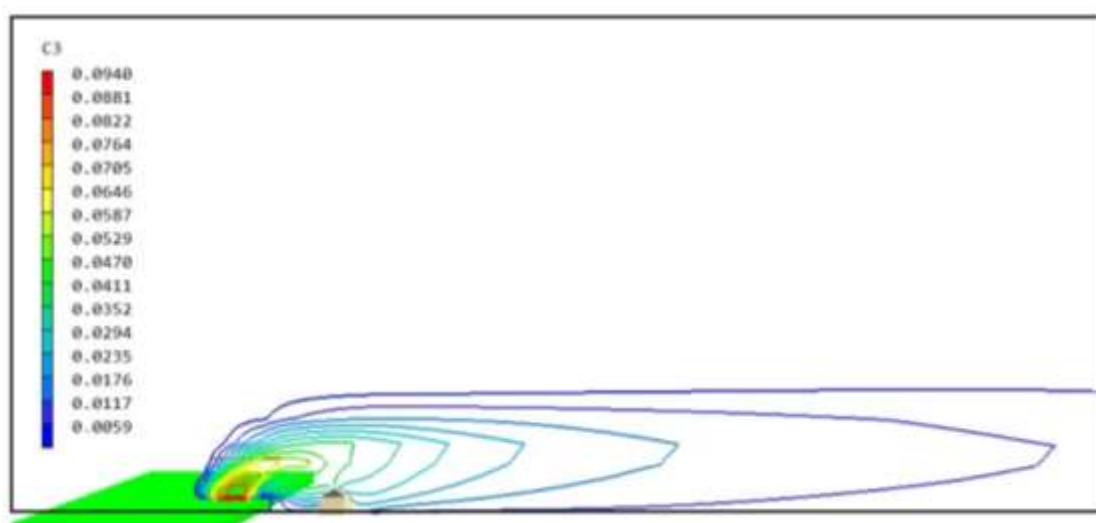


*б*

Рисунок 3.10 – Распределение изолиний концентраций продуктов пиролиза – оксид углерода (CO): *a* – при  $v = 5$  м/с; *б* –  $v = 15$  м/с



*a*



*б*

Рисунок 3.11 – Распределение изолиний концентраций продуктов горения – диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ): *a* – при  $v = 5$  м/с; *б* –  $v = 15$  м/с

Влияние скорости ветра напрямую влияет на распространение продуктов пиролиза и горения. Увеличение скорости движения воздушных масс приводит к росту концентраций токсичных веществ.

В результате, при горении, когда количества воздуха достаточно для реакции окисления образуются продукты полного сгорания. Концентрации диоксида углерода изменяется в диапазоне от 0,014 до 0,036 кг/м<sup>3</sup> при скорости ветра 5 и 15 м/с соответственно. Недостаток кислорода приводит к формированию продуктов неполного сгорания – СО (диоксид углерода), С (сажа). При увеличении скорости ветра от 5 до 15 м/с концентрация изменяется от 0,01 до 0,04 кг/м<sup>3</sup> соответственно.

Анализ результатов проведен на основании данных, полученных на расстоянии 100 метров от зоны зажигания, вблизи жилых построек. Показатели концентрации токсичных продуктов горения и термического разложения, при различных метеорологических параметрах вызывают негативное воздействие на экосистему Земли.

Образовавшиеся продукты горения, при больших концентрациях, уменьшают содержание кислорода в исследуемой области. Количественные показатели оксида углерода, превышают максимально разовую концентрацию, которая равна  $5 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>, согласно СанПиН 2.1.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1EM11	Казакова Софья Валерьевна

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОКД</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	20.04.01 Техносферная безопасность

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
1. Стоимость ресурсов научного исследования: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта – не более 524589 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 243255руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Премимальный коэффициент 30%; Доплаты и надбавки руководителя 20%; Дополнительная заработная плата 12%; Накладные расходы 16%; Районный коэффициент 1,3.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	1.Налоговый кодекс Российской Федерации 2.ФЗ №212 от 24.07.2009 в ред. от 19.12.2016

<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала научно- технического исследования	Определение потенциальных потребителей результатов исследования, анализ конкурентных технических решений.
1. Разработка устава научно-технического проекта	Планирование этапов разработки программы, определение трудоемкости
1. Планирование процесса управления научно-технического исследования: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Сравнительный анализ интегральных показателей эффективности, формирование бюджета научно- технического исследования
2. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Расчет показателей эффективности научно-технического исследования. Расчет показателей сравнительной эффективности научно-технического исследования

<b>Перечень графического материала</b>	
1. «Портрет» потребителя результатов научно- технического исследования	
2. Сегментирование рынка	
3. Оценка конкурентоспособности технических решений	
4. Матрица SWOT	
5. График проведения и бюджет научно- технического исследования	
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности 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	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1EM11	Казакова Софья Валерьевна		

## **4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Математическая модель процесса горения, позволит спрогнозировать последствия от теплового излучения, в результате чрезвычайной ситуации на объектах газо- нефтехимического комплекса, и оценить воздушное загрязнение от очагов лесных пожаров на населенные пункты. Разработанный программный комплекс на основе законов механики сплошных сред и экспериментальных данных позволит исследовать динамику процесса горения при различных факторах.

Переход на более новую стратегию, основанную на принципах инженерного анализа и численного моделирования, повышает уровень безопасности производственных объектов. В условиях динамичной среды возникает необходимость постоянного анализа, который позволяет оценить комплексное свойство объекта научного исследования, включающее его качественные, экономические, маркетинговые и инновационные особенности.

### **4.1 Предпроектный анализ**

#### **4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Разработчики стремятся получить наиболее качественный программный продукт для математического моделирования физико-химических процессов, который будет отвечать требованиям рынка, с минимальными затратами на процессы производства.

Целевым рынком программного комплекса для математического моделирования процесса горения являются промышленные объекты газо-нефтехимического комплекса, научно-исследовательские организации и государственные учреждения, занимающиеся мониторингом безопасности (промышленной, экологической и пожарной).

Для анализа потребителей результатов необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

Сегментация рынка разработчиков для решения задач гидрогазодинамики, теплообмена и прочности по функциональным возможностям показана в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сегментация рынка

Потребитель	Функциональные возможности				
	Встроенные модули (библиотека данных)	Оперативность прогнозирования масштабов вероятных аварий			Shareware версия
Государственные учреждения, занимающие мониторингом безопасности (промышленной, экологической и пожарной)	■	■			■
Научно-исследовательские организации	■	■			■
Промышленные объекты газонефтехимического комплекса	■	■	■	■	■

- STAR-CD
  - ANSYS
  -научно-исследовательская разработка

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Систематический анализ конкурирующих разработок необходим во избежание потери занимаемой ниши рынка. Объективная оценка научно-исследовательской разработки с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет определить готовность проекта к запуску.

Анализ конкурентных решений проводится с помощью оценочной карты, где позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале.



Конкурентоспособность научно-исследовательской разработки определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя [28].

В таблице 4.2 приведена оценочная карта, включающая конкурентные технические разработки в области производства винилацетата.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$K_{\phi}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии обогащаемого материала							
Интеллектуальный интерфейс	0,2	3	2	2	0,6	0,4	0,4
Функциональные возможности (встроенные модули)	0,2	4	2	3	0,8	0,4	0,6
Объем вычислительных ресурсов	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Достоверность и точность результатов	0,2	4	3	3	0,8	0,6	0,6
Экономические критерии оценки эффективности							
Цена	0,1	5	3	2	0,5	0,3	0,2
Конкурентоспособность продукта	0,1	4	3	2	0,4	0,3	0,2
Послепродажное обслуживание	0,1	3	3	5	0,3	0,3	0,5
Итого	1	28	19	21	3,9	2,6	2,9

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения выбраны исходя из технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

$B_{\phi}$  – разрабатываемое научно -исследовательское решение;

$B_{к1}$  – программное обеспечение STAR-CD [29].

$B_{к2}$  – программное обеспечение ANSYS [30].

Согласно результатам анализа, разрабатываемое решение для математического моделирования процесса горения при техногенных авариях не уступает другим программным комплексам. Данный факт определенно

обусловлен весьма весомыми достоинствами данной технологии, которые являются определяющими при интеграции разработки на промышленные объекты, деятельность которых связана с применением горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей.

### 4.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-технического проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Он проводится в несколько этапов [28].

Первый этап – описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз. Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Первого этапа SWOT-анализа

Сильные стороны	C1.	Многофакторная система моделирования процесса горения;
	C2.	Расширенный функционал программного комплекса;
	C3.	Высокая скорость работы;
	C4.	Использование современных методов математического моделирования;
	C5.	Достоверность результатов (проведена верификация математической модели).
Слабые стороны	Сл1.	Отсутствие квалифицированных кадров для работы с программным комплексом;
	Сл2.	Значительные временные и интеллектуальные затраты при внедрении программного комплекса на промышленные объекты;
	Сл3.	Отсутствие сертификации;
	Сл4.	Отсутствие бюджетного финансирования;
	Сл5.	Отсутствие продвижения на рынке.

Продолжение таблицы 4.3

Возможности	В1.	Использование инновационной инфраструктуры ТПУ;
	В2.	Прогнозирование масштабов вероятных аварий для осуществления превентивных мероприятий.
	В3.	Одновременное решение одномерных, двумерных и трехмерных задач, как в пожарной, так и в экологической области безопасности;
	В4.	Улучшение пользовательского интерфейса;
	В5.	Повышение стоимости конкурентных разработок.
Угрозы	У1.	Улучшение технических параметров конкурентного устройства;
	У2.	Несвоевременное финансовое обеспечение разработки;
	У3.	Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции;
	У4.	Отсутствие доверия к новой технологии.

Второй этап заключается в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды для определения степени необходимости проведения стратегических изменений.

Интерактивная матрица проекта помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-» (табл. 4.4).

Таблица 4.4–Интерактивная матрица проекта

	Сильные стороны					Слабые стороны					
	С1	С2	С3	С4	С5	Сл.1	Сл.2	Сл.3	Сл.4	Сл.5	
Возможности проекта	В1	+	0	0	+	+	0	-	+	-	0
	В2	+	0	-	+	+	+	+	0	-	-
	В3	+	-	-	+	+	0	-	0	-	+
	В4	-	+	+	0	+	+	0	-	-	0
	В5	+	+	0	+	+	-	-	0	+	+
Угрозы проекта	У1	-	0	0	+	0	+	-	-	+	0
	У2	-	-	-	-	-	-	-	-	+	0
	У3	-	-	-	0	-	0	-	+	-	-
	У4	-	-	-	0	0	+	-	+	-	0

Таким образом, в рамках третьего этапа составлена итоговая матрица SWOT-анализа (табл. 4.5).

Таблица 4.5 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны проекта:</b>                      С1. Многофакторная система моделирования процесса горения                      С2. Расширенный функционал программного комплекса;                      С3. Высокая скорость работы;                      С4. Использование современных методов математического моделирования;                      С5. Достоверность результатов (проведена валидация и верификация математической модели).</p>	<p><b>Слабые стороны проекта:</b>                      Сл1. Отсутствие квалифицированных кадров для работы с программным комплексом;                      Сл2. Значительные временные и интеллектуальные затраты при внедрении программного комплекса на промышленные объекты;                      Сл3. Отсутствие сертификации;                      Сл4. Отсутствие бюджетного финансирования;                      Сл.5. Отсутствие продвижения на рынке.</p>
<p><b>Возможности:</b>                      В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ;                      В2: Прогнозирование масштабов вероятных аварий для осуществления превентивных мероприятий.                      В3. Одновременное решение одномерных, двумерных и трехмерных задач, как в пожарной, так и в экологической области безопасности;                      В4. Улучшение пользовательского интерфейса;                      В5. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Математическое моделирование при расчете внешних показателей позволит защитить территории и окружающие объекты от аварийных ситуаций техногенного характера;</li> <li>- Экономичность и функциональность разработки повысит конкурентоспособность в условиях повышения цен на зарубежные программные комплексы (нестабильная внешнеполитическая ситуация, колебания курса);</li> <li>- Использование инновационной инфраструктуры ТПУ является основной возможностью для реализации научно-исследовательского проекта.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Повышение стоимости конкурентных разработок и улучшение технических характеристик способствует продвижению на рынке;</li> <li>- Привлечению высококвалифицированных специалистов дает возможность получить сертификацию;</li> <li>- Финансирование государственной поддержки инновационной деятельности на базе ТПУ.</li> </ul>

Продолжение таблицы 4.5

<p><b>Угрозы:</b>          У1. Улучшение технических параметров конкурентного устройства;          У2. Несвоевременное финансовое обеспечение разработки;          У3. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции;          У4. Отсутствие доверия к новой технологии.</p>	<p>- Экологичность и безопасность математического моделирования процесса горения в сравнении с экспериментальными способами способна преодолеть недоверие к новой технологии;          - Низкая стоимость реализации позволит проводить научно-технические работы, без финансовой поддержки;          - Улучшение программного комплекса в процессе реализации позволит пройти процедуру сертификации продукции</p>	<p>- Профессиональная подготовка пользователей для работы с программным комплексом имеет высокие финансовые показатели;          - Высокий риск банкротства нового производства, согласно росту конкурентоспособности на рынке.</p>
---	---	---

## 4.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового научно-исследовательского проекта. В рамках процессов инициации определены изначальные цели и содержание, фиксирующие изначальные финансовые ресурсы. Определены внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закреплена в Уставе проекта, где задокументированы бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика научно-исследовательского проекта, а также новая разработка.

### 4.2.1 Цели и результат проекта

Информация о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Научно-исследовательские организации	Исследование динамики процесса горения при различных факторах для решения задач в области гидрогазодинамики, теплообмена и прочности
Государственные учреждения занимающиеся мониторингом безопасности (промышленной, экологической и пожарной)	Мониторинг результатов исследований с целью проведения профилактических мероприятий в области промышленной, экологической и пожарной безопасности
Промышленные объекты газонефтехимического комплекса	Применение безопасных противопожарных расстояний от газопроводов до лесных массивов с учетом полученных в результате моделирования данных.

Информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 –Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработка математической модели для определения размеров зон зажигания растительного покрова и анализ распространения загрязняющих веществ в атмосфере, в результате аварийной ситуации на магистральном газо-продуктопроводе
Ожидаемые результаты проекта:	Прогнозирование радиуса зоны возможного поражения и минимизации вредного воздействия на экосистему
Критерии приемки результата проекта:	Практическая значимость результата проекта реализуется в областях промышленной, пожарной и экологической безопасности, для прогнозирования масштабов вероятных аварий и осуществления превентивных мероприятий
Требования к результату проекта:	Программный комплекс разработан на основе законов механики сплошных сред и экспериментальных данных, что позволяет исследовать динамику процесса зажигания от теплового излучения при различных факторах
	Определен радиус зоны возможного поражения от газонефтехимического комплекса до лесных массивов. Проведен анализ распространения загрязняющих веществ в атмосфере при лесных пожарах
	Возможность применения методов мониторинга для защиты территории и окружающих объектов от аварийных ситуаций техногенного характера

#### 4.2.2 Организационная структура проекта

В рабочую группу данного проекта входит руководитель научно-исследовательского проекта – Перминова В.А. и инженер – Казаковой С.В. Определена роль каждого участника в данном проекте, прописаны функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте (табл.4.8).

Таблица 4.8– Рабочая группа проекта

ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, час.
Перминов В.А., профессор ОКД НИ ТПУ	Руководитель научно-исследовательского проекта	Координирование деятельности	272
Казакова С. В. магистрант ОКД НИ ТПУ	Исполнитель проекта (инженер)	Выполнение научно-исследовательского проекта	592
Итого			864

## **4.3 Планирование научно-исследовательской работы**

### **4.3.1 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-технических работ.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. Перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и распределение исполнителей по видам работ представлен в таблице 4.9.



Таблица 4.9 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Исполнитель
Выбор направления исследования	1	Выбор направления исследования и утверждение технического задания	Перминов В.А. Казакова С.В
	2	Подбор и изучение материала	Казакова С.В
	3	Календарное планирование по теме научного исследования	Казакова С.В
Проектирование и разработка математической модели	4	Изучение литературы и других источников информации по теме научного исследования	Казакова С.В.
	5	Физико-математическая постановка задачи научного исследования	Перминов В.А. Казакова С.В
	6	Разработка алгоритма и программная реализация математической модели	Перминов В.А. Казакова С.В
	7	Верификация модели и программы с использованием известных данных	Перминов В.А. Казакова С.В
	8	Оценка и анализ результатов научного исследования	Казакова С.В.
Обобщение и оценка результатов	9	Оценка эффективности полученных результатов	Перминов В.А.
Оформление отчета (комплекта документации по ОКР)	10	Оформление пояснительной записки	Казакова С.В.

#### 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного проекта: руководителя научно-исследовательского проекта – Перминова В.А. и инженера – Казаковой С.В.

Трудоемкость выполнения научного проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ож.і}$  используется следующая формула (4.2):

$$t_{ож.і} = \frac{3t_{min.і} + 2t_{max.і}}{5}, \quad (4.2)$$

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

$t_{min.i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max.i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож.i}}{ч_i}, \quad (4.3)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ож.i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел. – дн.;

$ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел. [28]

### 4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

Расчет продолжительности и последовательности выполнения работы дает возможность своевременно и эффективно выполнять текущие задачи. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{к.i} = T_{р.i} \cdot k_{кал.}, \quad (4.4)$$

где  $T_{к.i}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{р.i}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал.}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле (4.5):

$$k_{\text{кал.}} = \frac{T_{\text{кал.}}}{T_{\text{кал.}} - T_{\text{вых.}} - T_{\text{пр.}}}, \quad (4.5)$$

где  $T_{\text{кал.}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых.}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр.}}$  – количество праздничных дней в году [28].

Таким образом, коэффициент календарности для руководителя научно-исследовательского проекта – Перминова В.А. и инженера – Казаковой С.В. равен:

$$k_{\text{кал.}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,5$$

Временные показатели проведения исследования представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Временные показатели проведения научного проекта

№ раб.	Наименование работы	Исполнитель работы	Трудоемкость работ, чел-дни			Длительность работ, дни	
			$t_{min.i}$	$t_{max.i}$	$t_{ож.i}$	$T_{p.i}$	$T_{к.i}$
1	Выбор направления исследования и утверждение технического задания	Перминов В.А.	1	3	1,8	0,9	1,35
		Казакова С.В					
2	Подбор и изучение материала	Казакова С.В	7	10	8,2	8,2	12,3
3	Календарное планирование по теме научного исследования	Казакова С.В	1	2	1,4	1,4	2,1
4	Изучение литературы и других источников информации по теме научного исследования	Казакова С.В.	12	15	13,2	13,2	19,8
5	Физико-математическая постановка задачи научного исследования	Перминов В.А.	10	14	11,6	5,8	8,7
		Казакова С.В					
6	Разработка алгоритма и программная реализация математической модели	Перминов В.А.	20	25	22	11	16,5
		Казакова С.В					
7	Верификация модели и программы с использованием известных данных	Перминов В.А.	14	18	15,6	7,8	11,7
		Казакова С.В					
8	Оценка и анализ результатов научного исследования	Казакова С.В.	8	12	9,6	9,6	14,4
9	Разработка разделов выпускной квалификационной работы	Перминов В.А.	7	10	8,2	8,2	12,3
10	Оформление пояснительной записки выпускной квалификационной работы	Казакова С.В.	10	12	10,8	10,8	16,2

График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательской работы (рис. 4.1).

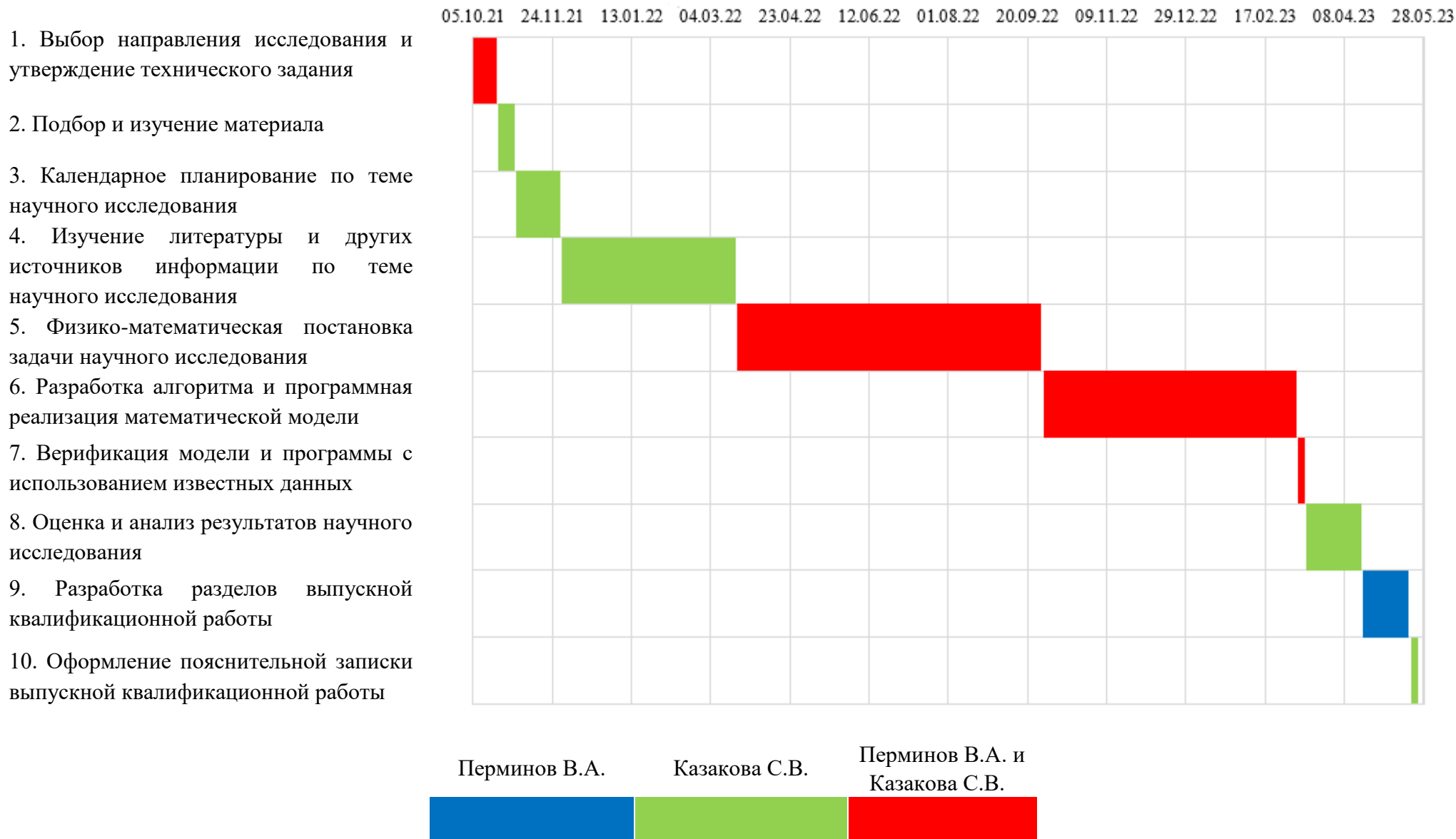


Рисунок 4.1 – Диаграмма Ганта

#### 4.4 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям [28]:

- материальные затраты научно-технического;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

##### 4.4.1 Расчет затрат на оборудование для научных работ

Научно-исследовательская разработка выполняется на специальном оборудовании с установленными лицензированными программными продуктами. Затраты на приобретение оборудования приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Затраты на оборудование для научно проекта

Наименование	Кол-во единиц оборудования	Стоимость с НДС, руб.
Персональный компьютер	1	45000
USB-флеш-накопитель	1	1700
Программное обеспечение		
Microsoft Office	1	10900
Microsoft Visual Studio	1	21100
PHOENICS - CHAM	1	57300
Итого		136000

#### 4.4.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, которые заняты выполнением научного исследования. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (4.6)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата работников рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (4.7)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (4.8)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. Дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. Дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн. (табл. 12).

Таблица 12–Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	104	67
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	24	48
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	236

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{np} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.9)$$

где  $Z_{tc}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{np}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (4.10)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12).

Расчет заработной платы приведён в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Расчет заработной платы

Исполнители	$Z_{tc}$ , руб.	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб.дн.	$Z_{осн}$ , руб.	$Z_{доп}$ , руб.	$Z_{зп}$ , руб.
Научный руководитель	27000	35100	1763	34	59942	7193	67135
Инженер	37100	48230	2125	74	157250	18870	176120
Итого					217192	26063	243255



#### 4.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье 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:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.11)$$

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

Ставка страховых отчислений на 2023 год составляет– 30% от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением научно-исследовательского проекта.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	$Z_{\text{осн}}$ , руб.	$Z_{\text{доп}}$ , руб.	$Z_{\text{зп}}$ , руб.
Научный руководитель	59942	7193	67135
Инженер	157250	18870	176120
Итого			243255
Отчисления во внебюджетные фонды			72977

#### 4.4.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей 1-3}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (4.12)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы [28].

Величину коэффициента накладных расходов примем 16%. Результаты расчета представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15– Накладные расходы

№ п/п	Наименование статьи	Сумма, руб.
1	Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	136000
2	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	217192
	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	26063
3	Отчисления во внебюджетные фонды	72977
Итого		452232
Накладные расходы		72357

#### 4.4.5 Формирование бюджета затрат научно проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательского проекта является основой для формирования бюджета затрат. При формировании договора с заказчиком рассчитанная величина затрат защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Расчет бюджета затрат

№ п/п	Наименование статьи	Сумма, руб.
1	Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	136000
2	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	217192
	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	26063
3	Отчисления во внебюджетные фонды	72977
4	Накладные расходы	72357
Итого себестоимость исследования		524589

## **4.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

### **4.5.1 Оценка социальной эффективности исследования**

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия при реализации научно-технического исследования для общества в целом или отдельных категорий населений, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты.

Оценка социальной эффективности разработанного программного продукта для математического моделирования процесса горения в результате чрезвычайной ситуации на объекте газо- нефтехимического комплекса представлена в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Критерии социальной и экономической эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Дорогостоящая опытно-экспериментальная часть исследования	Низкая стоимость реализации научно-технического решения
Высокий риск техногенных угроз при проведении опытно-экспериментальной части исследования	Получение достоверных результатов по средствам моделирования без риска и опасности для здоровья людей и окружающей среды.
Временные затраты на реализацию опытно-экспериментальной части исследования	Существенная экономия времени, наглядность результатов моделирования

### **4.5.2 Оценка сравнительной эффективности исследования**

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного проекта. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования рассчитан в ходе оценки бюджета затрат при двух (или более) вариантах реализации. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Варианты исполнения научного исследования представлены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Варианты исполнения научно-исследовательского проекта

№ п/п	Наименование	Стоимость оборудования, руб.	Стоимость исполнения, руб.
1	Программное обеспечение научно-исследовательской разработки	68200	524589
2	Программное обеспечение STAR-CD	100000	556389
3	Программное обеспечение ANSYS	330000	786389

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^i = \frac{\Phi_{p.i}}{\Phi_{max}}, \quad (4.13)$$

где  $I_{\phi}^i$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{p.i}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-технического проекта (в т.ч. аналоги) [28].

Величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

$$1. I_{\phi}^p = \frac{524589}{786389} = 0,7 \text{ – научно-исследовательская разработка.}$$

$$2. I_{\phi}^{al} = \frac{556389}{786389} = 0,7 \text{ – программное обеспечение STAR-CD.}$$

$$3. I_{\phi}^{a2} = \frac{786389}{786389} = 1,0 \text{ – программное обеспечение ANSYS.}$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле (4.14):

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i, \quad (4.14)$$

где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности варианта;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки соответственно, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения объекта исследования для расчета интегрального показателя ресурсоэффективности представлена в таблице 4.19.

Таблица 4.19 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Интеллектуальный интерфейс	0,2	3	2	2
Функциональные возможности (встроенные модули)	0,2	4	2	3
Объем вычислительных ресурсов	0,1	5	3	4
Достоверность и точность результатов	0,2	4	3	3
Цена	0,1	5	3	2
Конкурентоспособность продукта	0,1	4	3	2
Послепродажное обслуживание	0,1	3	3	5
Итого	1	28	19	21

$$1. I_p = 0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 = 3,9$$

$$2. I_{a1} = 0,2 \cdot 2 + 0,2 \cdot 2 + 0,1 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,1 \cdot 3 + 0,1 \cdot 3 + 0,1 \cdot 3 = 2,6$$

$$3. I_{a2} = 0,2 \cdot 2 + 0,2 \cdot 3 + 0,1 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,1 \cdot 2 + 0,1 \cdot 2 + 0,1 \cdot 5 = 2,9$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения

разработки ( $I_{\phi}^p$ ) и аналога ( $I_{\phi}^a$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле [28]:

$$I_{\phi}^i = \frac{I_m}{I_{\phi}^p}, \quad (4.415)$$

$$1. I_{\phi}^p = \frac{3,9}{0,7} = 5,6$$

$$2. I_{\phi}^{al} = \frac{2,6}{0,7} = 3,7$$

$$3. I_{\phi}^{a2} = \frac{2,9}{1,0} = 2,9$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\phi}^p}{I_m^a}, \quad (4.16)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  – сравнительная эффективность проекта;

$I_{\phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;

$I_m^a$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов.

Результаты расчетов интегрального показателя эффективности вариантов исполнения представлены в таблице 4.20.

$$1. \mathcal{E}_{\text{ср}}^p = \frac{5,6}{5,6} = 1,0$$

$$2. \mathcal{E}_{\text{ср}}^{al} = \frac{5,6}{3,7} = 1,5$$

$$3. \mathcal{E}_{\text{ср}}^{al} = \frac{5,6}{2,9} = 1,9$$

Таблица 4.20 - Сравнительная эффективность проекта

Показатели	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Интегральный финансовый показатель разработки	0,7	0,7	1,0
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,9	2,6	2,9
Интегральный показатель эффективности	5,6	3,7	2,9
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,0	1,5	1,9

Сравнив значения интегральных показателей ресурсоэффективности можно сделать вывод, что исполнение текущее научно-техническая разработка, является более эффективным вариантом для проектирования с позиции ресурсосбережения.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

В рамках раздела проведена экспертная оценка конкурентоспособности проекта, определены сильные и слабые стороны, возможности и угрозы внешней среды. Согласно анализу, научно-техническое исследование имеет высокий коммерческий потенциал. Внедрение разработки на рынок, при показателях коммерциализации выше среднего позволит снизить количество аварийных ситуаций техногенного характера, защитив территории и окружающие объекты. Суммарные затраты на проектирование составляют 524589 рублей, при разработанном календарном план-графике продолжительностью 20 недель.

Оценка значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.



**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1EM11	Казакова Софья Валерьевна

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение</b>	<b>ОКД</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление</b>	20.04.01 Техносферная безопасность

Тема ВКР:

**Математическое моделирование процесса переноса продуктов горения от лесных пожаров в окрестности населенных пунктов**

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

<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p><i>Объект исследования:</i> Возникновение и развитие процесса зажигания под воздействием источника светового излучения</p> <p><i>Область применения:</i> Государственные учреждения, объекты газо-нефтехимической промышленности и научно-исследовательские организации, занимающиеся мониторингом безопасности (промышленной, экологической и пожарной).</p> <p><i>Рабочая зона:</i> офисное помещение.</p> <p><i>Размеры помещения:</i> 5×3 м.</p> <p>Количество и наименование оборудование рабочей зоны: персональный компьютер (ПК).</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> анализ и обработка информации для локализации и ликвидации аварий техногенного характера</p>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>Правовое обеспечение и организационные мероприятия: – ТК РФ от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 09.03.2021). Законодательные и нормативные документы по теме: – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» – ГОСТ 22269-76 «Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования» – ГОСТ 21889-76 «Система «человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования» – ГОСТ Р 50923-96 «Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения»</p>
<p><b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</b></p>	<p><b>Вредные факторы:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего;</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ выявленных вредных и опасных факторов</li> <li>– расчет уровня опасного или вредного производственного фактора</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения;</li> <li>– производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума)</li> <li>– производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека (нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса; длительность сосредоточенного наблюдения).</li> </ul> <p><b>Опасные факторы:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий;</li> <li>– производственные факторы, связанные с электромагнитными полями, неионизирующими ткани человека (повышенным образованием электростатических зарядов)</li> </ul> <p><b>Требуемые средства коллективной от выявленных факторов:</b> система аварийного энергоснабжения, заземление электрооборудования, архитектурно-планировочные изменения расположения оборудования, защита расстоянием, использование на оборудование шумопоглощающих коробов, щитов и кожухов, Расчет: расчет системы искусственного освещения</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность при эксплуатации:</b></p>	<p><b>Воздействие на селитебную зону:</b> не оказывает.</p> <p><b>Воздействие на литосферу:</b> утилизации макулатуры, люминесцентных ламп, компьютерной техники.</p> <p><b>Воздействие на гидросферу:</b> загрязнение водотоков продуктами жизнедеятельности.</p> <p><b>Воздействие на атмосферу:</b> выброс вредных веществ при возгорании компьютерной технике.</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения:</b></p>	<p><b>Возможные ЧС:</b> техногенные аварии (отказ систем безопасности, пожар, взрыв).</p> <p><b>Наиболее типичные ЧС:</b> пожар.</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ЕМ11	Казакова Софья Валерьевна		

## 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Основная задача современных научных технологий – это безопасность для людей и окружающей сред. Социальная ответственность включает в себя, ответственный подход разработчика, полное предотвращение или уменьшение влияния возможных негативных последствий применения научной технологии.

Тема магистерской диссертации направлена на реализацию математической модели, для исследования динамики возникновения и распространения процесса горения в результате зажигания лесного массива при различных параметрах системы. Область применения: государственные учреждения, объекты газо-нефтехимической промышленности и научно-исследовательские организации, занимающиеся мониторингом безопасности (промышленной, экологической и пожарной).

В данном разделе будут рассмотрены вредные и опасные производственные факторы, действующие на разработчика, а также будет рассмотрена экологическая безопасность и безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Работа предполагает использование персональной электронной вычислительной машины – персонального компьютера (ПК), расположенного в офисном помещении. Разработка проектного решения заключатся в анализе и обработке информации для локализации и ликвидации аварий техногенного характера.

В процессе, разработчик подвергается воздействию целого комплекса различных факторов. Главной целью для обеспечения безопасности, разработка комплекса мероприятий технического и организационного характера, которые предотвратят и минимизируют негативные последствия.

## **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства**

В трудовом кодексе Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021) содержатся основные положения отношений между организацией и сотрудниками. Согласно статье 216 ТК РФ работник имеет право на труд в условиях, отвечающие требованиям охраны труда.

В соответствии со статьей 100 ТК РФ режим рабочего времени должен предусматривать продолжительность рабочей недели (пятидневная с двумя выходными днями, шестидневная с одним выходным днем, рабочая неделя с предоставлением выходных дней по скользящему графику, неполная рабочая неделя). При этом оплата и нормирование труда осуществляется в соответствии с разделом IV ТК РФ, в котором отражены государственные гарантии по оплате труда работников, формы и минимальный размер оплаты труда, установление заработной платы, указаны нормы труда и установлено обеспечение нормальных условий работы для выполнения норм выработки.

Глава 14 ТК РФ устанавливает требования и ответственность в области защиты персональных данных работника, в соответствии со статьей 86 ТК РФ защита персональных данных работника от неправомерного их использования или утраты должна быть обеспечена работодателем за счет его средств в порядке, установленном настоящим Кодексом и иными федеральными законами.

### **5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны**

Эргономические требования к рабочему месту и расположению всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации)

должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям.

В соответствии с ГОСТ 12.2.032-78. «Система стандартов безопасности труда. Общие эргономические требования». Рабочее место при выполнении работ сидя» рабочий стол может быть любой конструкции, отвечающей современным требованиям эргономики и позволяющей удобно разместить на рабочей поверхности оборудование с учетом его количества, размеров и характера выполняемой работы.

Рабочее место оператора, снабжено средствами отображения информации. Согласно требованиям, представленным в ГОСТ Р 50923-96 «Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения» дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову, обеспечивая возможность удобного выполнения работ в положении сидя и не создавать перегрузки костно-мышечной системы.

Согласно ГОСТ 21889-76 «Система «человек-машина». Кресло человека-оператора» и ГОСТ 22269-76 «Система «человек-машина». рабочее место оператора. взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования» предъявляются определенные требования к оснащению рабочего места, предусматривающего длительную работу за персональным компьютером (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Нормы оборудования рабочих мест с ПЭВМ

Параметры		Значение
Высота перегородок, разделяющих рабочие места		не менее 1,5 м
Стол	Ширина рабочей поверхностей	от 80 до 140 см
	Глубина рабочей поверхностей	от 80 до 100 см
	Высота рабочей поверхностей	72,5 см
Расстояние от глаз до монитора		от 60 до 70 см
Расстояние клавиатуры от края стола		от 10 до 30 см
Угол наблюдения экрана оператором относительно горизонтальной линии взгляда		не более 60°
Стул	Ширина поверхности	от 40 см
	Глубина поверхности	от 40 см
	Регулировка высоты поверхности	от 40 до 50 см
	Угол наклона вперед	до 15°
	Угол наклона назад	до 5°
	Высота опорной поверхности спинки	30 ± 2 см
	Ширина опорной поверхности спинки	от 38 см
	Радиус кривизны горизонтальной плоскости спинки	40 см
	Угол наклона спинки в вертикальной плоскости	±30°
	Регулировка расстояния спинки от переднего края сидения	от 26 до 40 см
	Длина подлокотников	от 25 см
	Ширина подлокотников	от 5 до 7 см
	Регулировка подлокотников по высоте над сиденьем	23 ± 3 см
Внутреннее расстояние между подлокотниками		от 35 до 50 см
Подставка для ног	Ширина	от 30 см
	Глубина	от 40 см
	Регулировка по высоте	до 15 см
	Угол наклона опорной поверхности	до 20°
	Высота бортика по переднему краю	1 см

Взаимное расположение элементов рабочего места должно обеспечивать возможность осуществления всех необходимых движений и перемещений для эксплуатации и технического обслуживания оборудования.

## 5.2 Производственная безопасность

Производственные факторы являются частным случаем факторов окружающей человека среды обитания и человеческой деятельности, связанных и (или) порождаемых производственной и трудовой деятельностью.

Технологический процесс включает в себя разработку программного продукта при помощи персонального компьютера. С точки зрения социальной ответственности целесообразно рассмотреть вредные и опасные факторы, которые могут возникать на рабочем месте.

Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» составлен перечень опасных и вредных факторов, характерных для данного вида работ (табл. 5.2)

Таблица 5.2 – Опасные и вредные факторы при выполнении работ

Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения	СНиП 23-05-95* «Естественное и искусственное освещение»
Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума)	ГОСТ 12.1.003-83 «Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности»
Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего	СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания
Производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека (нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса; длительность сосредоточенного наблюдения)	МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности»

## Продолжение таблицы 5.2

Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий	ГОСТ 12.1.038-82* ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»
Производственные факторы, связанные с электромагнитными полями, неионизирующими ткани человека (повышенным образованием электростатических зарядов)	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты»

### **5.2.1 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий**

Электрический ток относится к опасным факторам. Запрещается работать на компьютере во влажной одежде и влажными руками, прикасаться к тыльной стороне дисплея, вытирать пыль с компьютера при его включенном состоянии. Перед началом работы необходимо убедиться в отсутствии висящих под столом или свешивающихся со стола проводов электропитания, в целостности провода электропитания и вилки, в отсутствии видимых повреждений рабочей мебели и аппаратуры.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82\* ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» разработка математической модели происходит при установленных предельно допустимых значениях напряжений прикосновения и токов, предназначенные для проектирования способов и средств защиты людей, при взаимодействии их с электроустановками производственного и бытового назначения постоянного и переменного тока частотой 50 и 400 Гц.

В офисе используются электрическое оборудование – персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ) В соответствии с правилами устройств электроустановок, основными техническими средствами защиты, являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства,



знаки и плакаты безопасности. Наличие таких средств защиты предусмотрено в рабочей зоне. В целях профилактики периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности.

### **5.2.2 Производственные факторы, связанные с электромагнитными полями, неионизирующими ткани человека (повышенным образованием электростатических зарядов)**

Использование серверного оборудования может привести к наличию таких вредных факторов, как повышенный уровень статического электричества, повышенный уровень электромагнитных полей, повышенная напряженность электрического поля.

Мониторы являются источниками интенсивных электромагнитных полей. Имеющиеся внутри монитора многочисленные катушки дают электромагнитное излучение низкой частоты. Повышенный уровень напряженности электростатического поля способны возникнуть, благодаря зарядам, которые накапливают пыль на поверхностях компьютера, клавиатуре и компьютерной мыши при включенном питании. При длительном непрерывном взаимодействии с устройством человек подвергается риску.

В соответствии ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» применяются методы: заземление оборудования, увлажнение окружающего воздуха, применение полов из антистатического материала. защита временем, защита расстоянием, снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения, экранирование источника, защита рабочего места от излучения.

### **5.2.3 Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего**

Работа в условиях повышенной температуры воздуха способствует быстрой утомляемости работающего, может привести к перегреву организма, нарушению теплообмена или даже к профзаболеванию. Работа в условиях низкой температуры, а также в помещениях с низкой относительной влажностью воздуха, ведет к снижению иммунитета работающего, что способствует возникновению заболеваний.

Общая площадь рабочего помещения составляет 60 м<sup>2</sup>. Рабочий процесс, связанный с разработкой программного продукта, при использовании персонального компьютера относится к категории Ia. Работы с интенсивностью энергозатрат 92 до 120 ккал/ч (до 139 Вт), производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением. Основные требования к микроклимату для работ категории Ia представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категории работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относ. влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	22-24	19-26	15-75	0,1
Теплый	Ia	23-25	20-29	15-75	0,1

### **5.2.4 Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения**

Неудовлетворительное освещение приводит к напряжению зрения, ослаблению внимания и наступлению преждевременной утомленности. Слепение, резь в глазах и раздражение могут быть вызваны чрезмерно

ярким освещением. Свет на рабочем месте может создать сильные тени или отблески, а также дезориентировать работающего. Основным документом по требованиям к освещенности является СНиП 23-05-95\*.

В офисном помещении имеется естественное и искусственное освещение. Естественное освещение одностороннее боковое. Общее освещение складывается из естественного источника света и газоразрядных ламп.

При работе с ПК рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк., не должно создавать бликов на поверхности экрана.

Проведем расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности методом коэффициента светового потока, учитывающего световой поток, отраженный от потолка и стен.

Офисное помещение с размерами: длина ( $A$ ) – 4 м, ширина ( $B$ ) – 4 м, высота ( $H$ ) – 3 м, общей площадью ( $S$ ) – 16 м<sup>2</sup> и минимальным показателем освещенностью ( $E$ ) – 300 лк

Для местного освещения рабочих мест следует использовать светильники с непросвечивающими отражателями – люминесцентные светильники с защитной решёткой ОДОР-2-30, где критерий оптимальности расположения ( $\lambda$ ) – 1,3.

Светильники должны располагаться таким образом, чтобы их светящиеся элементы не попадали в поле зрения работающих на освещаемом рабочем месте и на других рабочих местах. Коэффициент отражения: стен ( $R_c$ ) – 30% (оклеенные световыми обоями), потолка ( $R_n$ ) 50% (бетонные). Коэффициент запаса ( $K_3$ ) равный 1,5, коэффициент неравномерности ( $Z$ ) – 1,1. Расстояние светильников от перекрытия (свес) ( $h_c$ ) – 0,5 м, а высота рабочей поверхности над полом ( $h_{pn}$ ) – 0,8 м.

Высота, высота светильника над рабочей поверхностью составляет [31]:

$$h = H - h_c - h_{\text{пн}} = 3 - 0,5 - 0,8 = 1,7 \text{ м} \quad (5.1)$$

Расстояние между светильниками определяется по формуле [31]:

$$L = \lambda \cdot h = 1,3 \cdot 1,7 = 2,21 \text{ м} \quad (5.2)$$

Расстояние от крайних светильников до стены [31]:

$$\frac{L}{3} = \frac{2,21}{3} = 0,74 \text{ м} \quad (5.3)$$

Количество рядов светильников [31]:

$$n_p = \frac{(3 \cdot B - 2 \cdot L)}{3 \cdot L} + 1 = \frac{(3 \cdot 4 - 2 \cdot 2,21)}{3 \cdot 2,21} = 2 \quad (5.4)$$

Количество светильников в ряду светильников [31]:

$$n_{\text{св}} = \frac{(3 \cdot A - 2 \cdot L)}{3 \cdot (l_{\text{св}} + 0,5)} + 1 = \frac{(3 \cdot 4 - 2 \cdot 2,21)}{3 \cdot (0,925 + 0,5)} + 1 = 3 \quad (5.5)$$

Согласно расчетам в офисном помещении размещено по три светильника в два ряда. В каждом светильнике по две лампы и для выбранного светильника ОДОР-2-30 мощность каждой лампы составляет 30 Вт, учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, а всего ламп в помещении 12 штук.

Определим индекс помещения: [31]:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{16}{1,7 \cdot (4 + 4)} = 1,2 \quad (5.6)$$

По индексу помещения и коэффициентам отражения определим значение коэффициента использования светового потока ( $\eta$ ) равный 41% [31].

Световой поток лампы [31]:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{n_{\text{л}} \cdot \eta} \cdot 100 = \frac{300 \cdot 16 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 41} \cdot 100 = 1609 \quad (5.7)$$

Проверка полученных значений [31]:

$$-10\% \leq \left[ \frac{\Phi_{\text{ст}} - \Phi}{\Phi_{\text{ст}}} \right] \cdot 100\% \leq +20\% \rightarrow -10\% \leq \left[ \frac{1650 - 1609}{1650} \right] \cdot 100\% \leq +20\% \quad (5.8)$$

Выполняется условие:  $-10\% \leq 2,5\% \leq +20\%$  – необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона

### **5.2.5 Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума)**

Шум является общебиологическим раздражителем и в определенных условиях может влиять на органы и системы организма человека. Шум создается рабочим оборудованием, преобразователями напряжения, рабочими лампами дневного света, а также проникает снаружи.

Шум — это общая совокупность звуков, отрицательно влияющих на организм человека. Шум значительно способствует ухудшению условий труда, вызывая ответную реакцию организма: снижение слуховой чувствительности, изменение функции пищеварения (понижении кислотности), повышением уровня давления в сердечно сосудистой системе развитие утомления и снижение производительности труда.

Рабочие процессы, относятся к проектированию и программированию, а рабочее место располагается в офисе. Согласно ГОСТ 12.1.003-83 «Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности» уровень допустимого шума на рабочем месте оператора не должен превышать 60 дБ.

В качестве мер защиты применяют звукопоглощающие материалы для отделки помещения, звукоизоляцию. Выполнены основные принципы обеспечения безопасности и сохранения здоровья работников при воздействии на них шума в нормальных условиях рабочего процесса. Рабочее место удовлетворяет нормативным требованиям.

### **5.2.6 Производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека (нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса; длительность сосредоточенного наблюдения)**

Психофизиологическим факторам на рабочем месте относятся переутомление, стресс, умственное и эмоциональное перенапряжение, монотонность труда. Утомление и снижение работоспособности неизбежны при неправильном положении в работе. Неграмотно организованное рабочее место вызывает мышечные спазмы и усталость.

Умственная нагрузка характеризуется длительностью сосредоточенного внимания, выраженной ответственностью, плотностью сигналов и сообщений в единицу времени, оказывая угнетающее влияние на психическую деятельность ухудшаются функции внимания (объем, концентрация, переключение), памяти (кратковременной и долговременной), восприятия (появляется большое число ошибок).

Длительная работа за экраном дисплея требует высокой координации сенсорных и моторных элементов зрительной системы, что способствует снижению зрения, головной боли, раздражительности, потери внимания.

Согласно МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» для предупреждения развития функционального перенапряжения и профессиональной патологии в результате воздействия производственных стресс-факторов необходимо соблюдать режим труда и отдыха. Во время регламентированных перерывов с целью снижения нервно-эмоционального напряжения, утомления зрительного и других анализаторов целесообразно выполнять комплексы физических упражнений, включая упражнения для глаз, в первой половине смены, а в конце рабочего дня показана психологическая разгрузка в специально оборудованных помещениях.

### 5.3 Экологическая безопасность

В процессе разработки проектного решения происходит негативное воздействие на окружающую среду.

В компьютерах огромное количество компонентов, которые содержат токсичные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды. Вышедшее из строя ПЭВМ и сопутствующая оргтехника относится к IV классу опасности (малоопасные отходы) и подлежит специальной утилизации (код отхода 4 81 206 11 52 4, класс опасности – 4) [32]. Для оказания наименьшего влияния на окружающую среду, необходимо проводить специальную процедуру утилизации ПЭВМ и оргтехники, при которой более 90% отправится на вторичную переработку и менее 10% будут отправлены на свалки. При этом она должна соответствовать процедуре утилизации ГОСТ Р 53692-2009 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов».

В ходе деятельности организация также создает бытовой мусор (канцелярские, пищевые отходы, искусственные источники освещения), который должен быть утилизирован в соответствии с определенным классом опасности или переработан, чтобы не оказывать негативное влияние на состояние литосферы.

При утилизации комплектующих частей персонального компьютера, люминесцентных ламп, макулатуры происходит негативное воздействие на литосферу. Продукты жизнедеятельности персонала неблагоприятно влияют на гидросферу, а воздействие на атмосферу происходит в случае выделения токсических веществ при неправильной утилизации комплектующих ПЭВМ и при горении самого ПК.

## 5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Согласно ГОСТ Р 22.0.02-2016 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения» чрезвычайная ситуация - Обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Наиболее распространенный источник чрезвычайной ситуации техногенного характера – пожар. К причинам пожаров в офисных зданиях можно отнести короткие замыкания, возникающие из-за перенапряжений в сети, поврежденной изоляции, использование неисправного электрооборудования, а также применение обогревательных приборов открытого типа, согласно ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования».

К мерам по предупреждению и профилактики пожаров в офисах можно отнести:

1. Регулярная проверка электропроводки и оборудования. Это позволит своевременно выявить существующие проблемы и вовремя их устранить.
2. Использование только исправного оборудования.
3. Строгое соблюдение правил электробезопасности. Необходимо иметь автопредохранители, не допускать перегрузки и не использовать опасные устройства, такие как нагреватели открытого типа.

В офисном здании устанавливаются требования пожарной безопасности к эвакуационным путям и аварийным выходам, согласно СП 1.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. эвакуационные пути и выходы».

Средства самостоятельного пожаротушения – порошковые или углекислотные должны находиться в кабинетах или пространствах вдоль



проходов, вблизи входов/выходов, но так, чтобы не препятствовать эвакуации. Расстановку первичных средств пожаротушения рекомендовано выполнять согласно СП 9.13130.2009 «Техника пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации».

Ответственные за безопасность должны проинструктировать персонал и следить за выполнением предписаний. Все сотрудники должны пройти инструктаж по технике безопасности и следить за выполнением ее предписаний

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Значение всех производственных факторов на изучаемом рабочем месте соответствует нормам, которые также были продемонстрированы в данном разделе, за исключением фактора, обладающего свойствами психофизиологического воздействия на организм человека. Для минимизации влияния данного фактора на организм человека, достаточно соблюдать меры, приведенные в МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности.

Категория помещения по электробезопасности, согласно ПУЭ, соответствует первому классу – «помещения без повышенной опасности» [33].

Согласно правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок персонал должен обладать I группой допуска по электробезопасности. Присвоение группы I по электробезопасности производится путем проведения инструктажа, который должен завершаться проверкой знаний в форме устного опроса и (при необходимости) проверкой приобретенных навыков безопасных способов работы или оказания первой помощи при поражении электрическим током [34].

Категория тяжести труда по СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» относится к категории Ia (работы, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/час (до 139 Вт)).

Офисное помещение, относится к категории ВЗ по пожароопасности, согласно СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности». Характеристика веществ и материалов, находящихся в помещении: горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные

при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть.

Рассмотренный объект, оказывающий незначительное негативное воздействие на окружающую среду, относится к объектам IV категории [35]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемая математическая модель позволит осуществлять мониторинг безопасности. В результате реализации программного комплекса были выполнены цели и задачи научно-исследовательской работы, которые позволили произвести комплексный анализ при различных структурных особенностях рассматриваемой системы.

В работе исследуется процесс зажигания под воздействием теплового излучения, и последующее распространение продуктов пиролиза и горения в виде токсичного облака на объекты расположенные в непосредственной близости от места аварии. Источником лучистой энергии является «огненный шар», который формируется при потере герметичности магистрального газопровода, работающего под давлением.

Физико-химические процессы, характеризующие распространение крупномасштабного горения, позволяют получить точные данные о радиусе зажигания, при воздействии интенсивного теплового излучения в виде «огненного шара». Динамика возникновения пожара дает возможность определить параметры, характеризующие распространение продуктов пиролиза и горения на населенные пункты, здания и сооружения.

Сравнительная оценка результатов работы проведена в результате численного исследования интенсивности теплового излучения в течении времени. Проведенная верификация программного комплекса, подтверждает правильность выполнения всех пунктов согласно требованиям нормативно-технической документации. Программный комплекс работоспособен, что позволяет произвести достоверный анализ рассматриваемой системы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2021 году» // МЧС России. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/5946> (дата обращения: 09.03.2023).
2. Зеленкин В.Г., Боровик С.И. Пожаровзрывобезопасность: конспект лекций / В.Г. Зеленкин. С.И. Боровик. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. –191 с.
3. Комаров А. А., Шангаев Р.Р. Определение поражающих факторов при авариях, сопровождаемых огненными шарами // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. - 2020. - №3-20. - С. 20-25.
4. Правила охраны магистральных трубопроводов// Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов <https://docs.cntd.ru/document/436765174> / (дата обращения: 15.03.2023).
5. Хайруллин И.Р. Прогнозирование опасности поражения человека тепловым излучением огненного шара при пожарах на химических и нефтехимических предприятиях: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.26.03. - Казань, 2008. - 19 с.
6. Великанов Н.Л., Корягин С.И., Гарина А.М. Транспортировка газа различными способами // Техничко-технологические проблемы сервиса. - 2019. - № №1(47). - С. 133-138.
7. Сжиженный природный газ // Wikipedia URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 09.03.2023).
8. BLEVE Fireball Effects in a Gas Industry: A Numerical Modeling Applied to the Case of an Algeria Gas Industry // IntechOpen URL: <https://www.intechopen.com/chapters/72656> (дата обращения: 10.03.2023).
9. Abbasi, T.; Abbasi, S.A. 2007. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, Consequence Assessment, Management, Journal of Hazardous Materials 141(3): 489–519.

10. Переверзев В.И. Взаимодействие молекул газа с поверхностями твердых тел // Вестник Таганрогского государственного педагогического института имени А. П. Чехова. - С. 133-138.
11. Новоженев В.А., Смагин В.П. Физико-химические основы процесса горения : учеб. пособие / сост. В.А. Новоженев, В.П. Смагин. – Барнаул : Изд-во Алт. унта, 2022. – 147 с
12. Клячин. С.И. Теория горения и взрыва. Часть 1. Горение: учебное пособие / С.И. Клячин. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2019. – 83 с.
13. Теория горения газопаровоздушных смесей // Studfile URL: <https://studfile.net/preview/4287846/page:2/> (дата обращения: 15.03.2023).
14. Куликов В. В., Гаврилин И. И. Огненный шар: метод. рекомендации / В. В. Куликов, И. И. Гаврилин. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2015. – 24 с.
15. William E. M., Jeffrey D. M. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs // International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Material. -San Francisco, 1999. –pp. 16.
16. Перминов В. А. Математическое моделирование лесных пожаров. Возникновение верховых и массовых лесных пожаров. - Saarbrücken: LAV Lambert Academic Publishing, 2011. - 257 с.
17. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1992. – 408 с.
18. Моделирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере при лесных пожарах // Meteoinfo URL: [https://meteoinfo.ru/images/misc/sovet/disser-kirsanov/kirsanov\\_dis.pdf](https://meteoinfo.ru/images/misc/sovet/disser-kirsanov/kirsanov_dis.pdf) (дата обращения: 10.03.2023).
19. Шаптала В.Г. Основы моделирования чрезвычайных ситуаций: учебное пособие/ В.Г. Шаптала, В.Ю. Радоуцкий, В.В. Шаптала; под общ. Ред. В.Г. Шапталы. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. - 166 с.

20. Дубов А.С., Быкова Л.П., Морунич С.В. Турбулентность в растительном покрове. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 180 с.
21. Гостинцев Ю.А., Махвиладзе Г.М., Новожилов В.Б. Формирование большого пожара, вызванного излучением // Известия РАН. МЖГ. 1992. №1. С.17-25.
22. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.
23. Stone, H. L. (1968). Iterative Solution of Implicit Approximations of Multi-Dimensional Partial Differential Equations, SIAM J. Num. Anal., vol. 5. p. 530.
24. Patankar, S. V. and Spalding, D. B. (1972a). A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 15, p.1787.
25. Majlingova A., Markova, I. Results of major industrial accidents modelling tools comparison// Advances in Fire, Safety and Security Research. - 2015. p.66-76.
26. Ядерный взрыв // Wikipedia URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9\\_%D0%B2%D0%B7%D1%80%D1%8B%D0%B2](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B2%D0%B7%D1%80%D1%8B%D0%B2) (дата обращения: 21.04.2023).
27. Бобков С. А. Б72 Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб. пособие / С. А. Бобков, А. В. Бабурин, П. В. Комраков. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.
28. Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 73 с.
29. Программное обеспечение STAR-CD // CD-adapco. – URL: [www.cd-adapco.com](http://www.cd-adapco.com) (дата обращения: 04.04.2023).

30. Программное обеспечение ANSYS// ANSYS, Inc.. – URL: <https://www.ansys.com/> (дата обращения: 24.04.2023).

31. Назаренко О.Б. Расчет искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 15 с

32. Федеральный классификационный каталог отходов (с изменениями на 4 октября 2021 года) // Consultant.– URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_218071/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_218071/) (дата обращения: 24.04.2023)..

33. Правила устройства электроустановок // CNTD.– URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030216>, (дата обращения: 24.04.2023)

34. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок // CNTD. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264184>, (дата обращения: 24.04.2023)

35. Критерии отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий // CNTD.– URL: <https://docs.cntd.ru/document/573292854>, (дата обращения: 24.04.2023)



## Приложение А

### Раздел 1 Theoretical part

Обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ЕМ11	Казакова Софья Валерьевна		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОКД	Перминов В.А.	д.ф.-м.н., доцент		

Консультант – лингвист отделения ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Устюжанина А.Н.	к.ф.н.		

## **1 Theoretical part**

### **1.1 Natural and man-made emergencies**

Emergencies have a negative impact on people's lives and complicate the normal functioning of various social institutions, resulting not only in material damage, but also in damage to the Earth's ecosystem. The level of accidents remains quite high, despite the measures taken.

According to comprehensive statistical analysis, problems in emergencies of natural and man-made nature are of great importance. According to the state report on the state of protection of population and territories of the Russian Federation from emergencies of natural and technogenic character, technogenic accidents account for 49.2%, natural – 28.5% and bio-social – 22.3% of the total number of emergencies [1].

Changes in production technology, expansion of production capacities and low rates of introduction of resource-energy-saving and other technically advanced and safe technologies have caused an increase in technogenic emergencies by 13.8% in 2021 [1]. One of the main hazard factors in case of deviations from established norms of technological process is affected area. The negative impact extends to the nearest objects that are in the immediate vicinity of the accident site.

Industrial accidents upset the balance of the Earth's ecosystem, which is a source of natural emergencies. This type of accident can vary in nature, from the release of hazardous substances into the atmosphere, to spills of explosive, flammable products into the environment. This results in environmental disasters that affect nature, fauna and flora, as well as human health.

The emergency forecasting system will make it possible to calculate the amount of possible damage based on optimal reserve indicators. The system of emergency forecasting will make it possible to calculate the value of possible damage on the basis of optimum reserve indicators.

Comprehensive analysis for loss prediction is an important component in site investigation. The structural diagram with the built-in software module is shown in Figure 1.1.

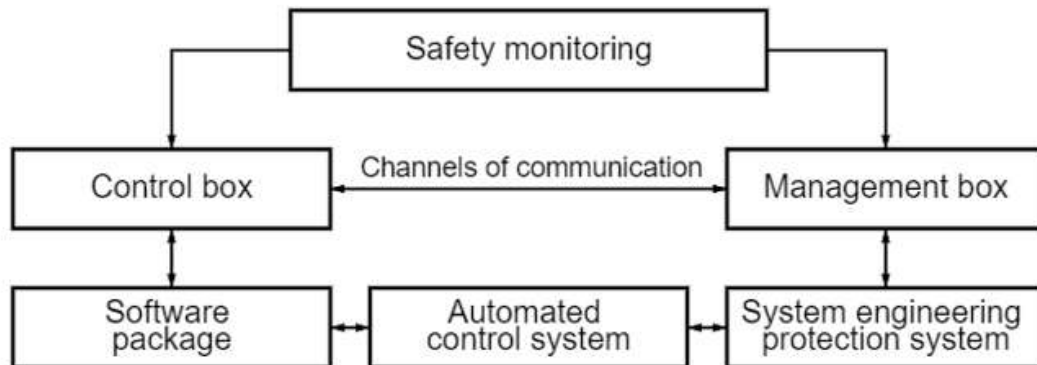


Figure 1.1 - Schematic diagram of environmental monitoring

The main components of the system are control and management units which are interconnected by information transmission channels. Formation and replenishment of the database is carried out during regular ground-based and remote observations. An additional source for correct operation of the automated information system and, as a consequence, for engineering protection design is a software package under development.

## 1.2 Accidents at fire and explosion hazardous industrial facilities

The occurrence of large fires in production facilities poses a great danger. High rates of fire and explosion hazards are typical of oil and gas facilities. Due to the nature of the technological process, which includes storage, processing and transportation of significant volumes of flammable materials, at high pressures and temperatures.

Man-made emergencies at these facilities are typical of transportation systems from the areas where the field is located or processing takes place to the point of consumption [2]. The main pipeline is characterized by its high capacity and long length. Consequently, changes in operating conditions, design and process parameters occur.

The effects of the combustion process in fast-acting physico-chemical reactions are impact, vibration and thermal effects on the environment. The parameters of the resulting large-scale diffuse flame are determined by the amount of gaseous propellant released into the atmosphere and the effects of thermal radiation. The radius of the affected area, in an accident, extends beyond the site of the accident, resulting in catastrophic consequences [3].

Environmental standards and regulations in the field of environmental protection regulate the existence of a buffer zone and a zone of minimum distances of the pipelines. In order to exclude possible cases of damage to the gas pipelines, a sanitary break (sanitary exclusion zones) of 25 meters from the axis, in both directions [4]. According to the Rules for Main Pipeline Protection this distance is necessary to ensure protection of the population in case of an accident. The zone of minimum distances of gas pipelines is regulated by Set of Rules 36.13330.2012 «Code of Rules. Main pipelines». The distance from the axis of main gas pipelines varies from 10 to 350 m depending on the diameter of the gas pipeline and the degree of responsibility of the facilities. Coniferous and deciduous trees are located at distances of 20 to 75 m, and the distance to settlements varies from 100 to 350 m.

To address the scale of the consequences of the thermal effects of a fireball, this study modelled the ignition process of objects in the vicinity of an emergency situation.

### **1.3 Physical and chemical combustion process with the formation of a fireball**

Man-made accidents at high potential hazard facilities are accompanied by a loss of containment, causing an instantaneous destructive effect and the formation of a powerful shock wave. High-tech production and refining processes involve the transportation and storage of hydrocarbon resources. The main fuel in industrial and mainline gas pipelines is natural gas, which consists of 90% methane, an odorless,

colorless and extremely flammable marginal hydrocarbon gas under normal conditions [5].

Natural gas in its natural aggregate state occupies huge volumes and quickly mixes with air when it leaks. As methane molecules rise into the atmosphere, they form a cloud of an explosive mixture, while other hydrocarbon compounds of natural gas are deposited in the ground layer. A huge mass of toxic fumes is produced as a result of the destruction of the pipeline.

It is possible to minimize the volume of natural gas in the liquefaction process. This aggregate state has a number of commercial, environmental and energy advantages. During compression and subsequent cooling there is a formation of liquid and vapor phases, which significantly reduces volumes [6,7].

However, as a result of the loss of tightness, there is a sharp drop in pressure above the interface. The thermodynamic instability reaches a region of local overheating, at which momentary boiling of the superheated liquid occurs. This phenomenon is called BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) [8]. An aerosol cloud is formed that contains combustible natural gas in the form of an aerosol. The expanding vapor spreads over ground surface in form of jet streams. The evaporation rate falls quickly to a constant value due to the thermal characteristics of the ground and the influx of heat from the surrounding air. Dilution with warm air raises the temperature and reduces the molecular weight of the vapor-air mixture. Further mixing with air results in complete evaporation of the small liquid droplets. The resulting hydrocarbon gas in the natural regasification process contains methane, which begins to rise into the atmosphere, creating a cloud of an explosive mixture [9].

The cloud formed, irrespective of the aggregate state of the fuel, is capable of ignition in an unrestricted space, by means of an extraneous source of ignition. This source has an energy that exceeds the minimum ignition energy of the given medium. Interaction of gas particles with metal and solid highly dispersed particles in the ground leads to gas ionization and plasma formation, which is accompanied by a change in electrical conductivity. The energy release in a short period of time

leads to instantaneous physical and chemical changes resulting in a spark discharge [10].

Combustion in an air atmosphere consists of two successive processes: diffusion and chemical interaction. Methane molecules diffusing into the combustion zone form a combustible mixture. As a result of the interaction of a combustible substance with an oxidizer, a chemical reaction takes place, characterized by the evolution of heat, light, and the formation of combustion products [11]. The intense formation of new chemicals leads to large spatial inhomogeneities.

The main chemical reaction during the combustion process is the oxidation reaction. It occurs at the boundaries of the flame and is a key factor in the process. The substances leaking from the surface of the gas mixture prevent air oxygen from penetrating deep into the flame. This interaction of the combustible substance with the oxidizer at the boundary zone with the medium forms the flame front. Immediately before this zone, the concentration of reagent stocks drops sharply as a result of dilution with the reaction products. The flame front is a narrow luminous three-dimensional area. In the zone of the flame front, a huge amount of potential energy is released, which heats the surrounding materials and forms a zone of physical heating. (Figure 1.2) [11,12].

The formation of the thermal heating area is characterised by a diffusion process of chemically active particles

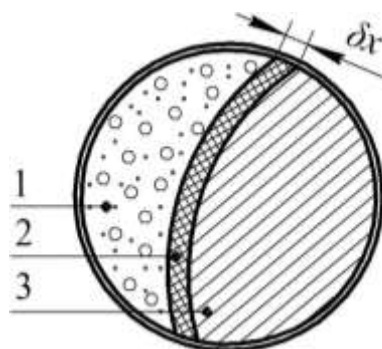


Figure 1.2 - Schematic diagram of flame propagation, where 1 - initial combustible mixture; 2 - flame front; 3 - combustion products; - flame front thickness

A highly concentrated cloud of combustible gas, unable to detonate, causes combustion around its outer envelope. This phenomenon is represented by the large-scale diffusive combustion of fuel in an over-enriched mixture at the interface with the atmosphere. The formation of a combustible gas cloud, results in turbulent mixing of the gas with air oxygen, which further diffuses the combustible mixture through the partially mixed gas [13].

The ignition of a vapor cloud that has not yet reached the oxidant concentration for complete combustion is characterised by the development of a 'fireball'. The interaction of combustible with air oxygen takes place at high temperatures, when the combustion rate is close to maximum and the product composition is close to equilibrium.

After the final formation of the 'fireball', it is lifted off the ground by the expulsion force that acts. A mushroom cloud is formed, part of which consists of rising gas streams caused by the thermal expansion of the air. During combustion, the size and height of the cloud increases, causing it to break up into smaller gas cavities, some of which continue to burn until all the fuel has been consumed [14,15].

#### **1.4 Woodland ignition when exposed to thermal radiation**

Fireball is a major hazard due to intense heat radiation. The ignition mechanism due to radiant heat fluxes is characterised by the release of energy in the surface layer of the atmosphere, resulting in a hotbed of fire. Vegetation is the most susceptible to adverse effects from radiant heat.

Analysis of the territory, its natural features, location of settlements, peat deposits, as well as transport routes and communications will allow predicting the scale of technogenic accidents, which are accompanied by fires on industrial and main gas and product pipelines. The classification of forest fires according to where the fire spreads is an important characteristic for assessing the fire danger. By spreading over an area with a single landscape and covering a smaller burning area

with less capacity, this type of fire is referred to as a landscape-uniform fire. If the terrain changes, a mixed type of fire occurs that is characterized by a larger affected area [16,17].

A large-scale diffuse flame is capable of increasing the fire area under the action of the wind, spreading thermal radiation according to its trajectory. The occurrence of fires over large areas, can lead to the phenomenon of a fire storm [17].

Exposure to the radiant flux induces a thermal regime that causes the dry plant combustible material to split into two fractions: the coke and the volatile pyrolysis products. The coke remains in place, creating a solid phase, while the volatile products evaporate and create a gas phase. This process can be described as the first step in the exposure of the vegetation to light.

At the moment of ignition, the temperature of the gas phase begins to rise at the upper limit of the canopy. This process occurs due to the ignition of volatile pyrolysis products. Over time, the concentration of pyrolysis products becomes lower and the concentration of oxygen in the central zone of the combustion process decreases, while carbon monoxide is burned out.

Near the explosion epicentre and with a high burnout of condensed and gaseous pyrolysis products and high oxygen consumption, the ignition mode is degenerate. Exposure to high combustion heat and the rate of combustion of forest combustibles, the heat radiation from the combustion chamber has a high intensity. However, the heat, which is released during the oxidation of combustible pyrolysis products, does not significantly affect the temperature of the gas phase. At the same time, when interacting with the condensed phase, the gas phase temperature can increase and exceed the adiabatic combustion temperature [16].

The radiant heat flux density falling on the forest canopy depends on the distance at which the "fireball" is formed. Reducing the temperature leads to less oxidation of gaseous pyrolysis products, resulting in a normal ignition mode. Drying and pyrolysis of combustible materials takes place in this zone, but the amount of heat flux is insufficient for ignition. The remaining unburned gaseous and condensed



products float up above the forest canopy by Archimedean force, forming a toxic cloud.

### **1.5 Atmospheric spread of pollutants from forest fires**

One of the main negative environmental impacts of fires is smoke and air pollution. There are currently no data on the dependence of combustion product emissions on forest characteristics and meteorological data. As a rule, the complete combustion of forest combustible materials starts the combustion of volatile products, evaporation and decomposition take place. The second stage is represented by condensed products, which require more time and heat for combustion.

Pyrolysis plays a huge role in the spread of forest fires. When exposed to high temperatures, forest fuels begin to decompose, producing gaseous products such as water vapor ( $H_2O$ ) and carbon dioxide ( $CO_2$ ), as well as condensed combustion products (ash). In actual pyrolysis, incomplete combustion products result in the release of carbon monoxide ( $CO$ ), soot particles and ash from the fire front. The substances produced during the combustion process can have a negative impact on human health and the environment.

Among atmospheric pollutants, carbon monoxide is the most common. Pyrolysis of one kilogram of forest fuels, in particular, produces about  $0,4 \text{ kg/m}^3$  of carbon monoxide. Concentration of this harmful substance inside the flame is  $0.25$  to  $0.30 \text{ kg/m}^3$ , above the flame -  $0.025$  to  $0.030 \text{ kg/m}^3$ , and on the ground surface in front of the burning zone -  $0.0007$  to  $0.002 \text{ kg/m}^3$ . The maximum allowable concentration of carbon monoxide in ambient air is  $5 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$  [18].

The transport of combustion products is one of the key factors that influence the wildfire propagation process and its intensity. Suspended particles that can be transported over long distances in the air pose a great danger. These particles are contained in condensed pyrolysis products - a solid porous coke residue that consists of almost pure carbon, water, tar, alcohol products and other organic compounds.

The threat of mass destruction as a result of a man-made accident is an important aspect for the development of a monitoring system in accordance with the current legislation. According to modern concepts for an objective assessment it is necessary to take into account the quantitative indicator of the affecting factors and the level of negative impact on objects.

## REFERENCES

1. State Report "On the State of Protection of Population and Territories of the Russian Federation from Natural and Man-Made Emergencies in 2021" // Ministry of Emergency Situations of Russia. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/5946> (date of application: 09.03.2023).
2. Zelenkin V.G., Borovik S.I. Fire and explosion safety: lecture notes / V.G. Zelenkin. S.I. Borovik. - Chelyabinsk: Publishing Center. SUSU, 2010. – pp.191.
3. Komarov A.A., Shangaev R.R. Determination of the defeating factors in accidents accompanied by fireballs // Fires and emergencies: prevention, elimination. - 2020. - №3-20. - P. 20-25.
4. Trunk Pipeline Protection Rules// Electronic Collection of Legal, Regulatory and Technical Documents <https://docs.cntd.ru/document/436765174> / (date of application: 15.03.2023).
5. Khairullin I.R. Prediction of the risk of man's injury by the thermal radiation of the fireball at the fires at the chemical and petrochemical enterprises: Cand. of Sci. (Techn.) Dissertation: 05.26.03. - Kazan, 2008. – pp. 19 .
6. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Garina A.M. Transportation of gas by different methods // Technical and technological problems of service. - 2019. - № №1(47). - P. 133-138.
7. Liquefied natural gas // Wikipedia URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (date of application: 09.03.2023).
8. BLEVE Fireball Effects in a Gas Industry: A Numerical Modeling Applied to the Case of an Algeria Gas Industry // IntechOpen URL: <https://www.intechopen.com/chapters/72656> (date of application: 10.03.2023).
9. Abbasi, T.; Abbasi, S.A. 2007. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, Consequence Assessment, Management, Journal of Hazardous Materials 141(3):– P.489–519.
10. Pereverzev V.I. Interaction of gas molecules with solid surfaces // Bulletin of A.P. Chekhov Taganrog State Pedagogical Institute. - P. 133-138.

11. Novozhenov V.A., Smagin V.P. Physico-chemical basis of combustion process : textbook / co. V.A. Novozhenov, V.P. Smagin. - Barnaul : Publishing house of Alt. Unt, 2022. – pp.147
12. Klyachin. S.I. Theory of Combustion and Explosion. Part 1. Combustion: textbook / S.I. Klyachin. - Kaliningrad: BSAFF, 2019. – pp.83.
13. The theory of combustion of gas/air mixtures // Studfile URL: <https://studfile.net/preview/4287846/page:2/> (date of application: 15.03.2023).
14. 14. Kulikov V. V., Gavrilin I. I. Fireball: method. recommendations / V. V. Kulikov, I. I. Gavrilin. - Ekaterinburg : USURT, 2015. – pp. 24.
15. William E. M., Jeffrey D. M. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs // International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Material. -San Francisco, 1999. –pp. 16.
16. Perminov V. A. Mathematical modelling of forest fires. Occurrence of high and massive forest fires. - Saarbrücken: LAB Lambert Academic Publishing, 2011. – pp. 257.
17. Grishin, A.M. Mathematical modelling of forest fires and new ways of fighting them/A.M. Grishin. - Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch, 1992. – pp.408.
18. Modelling the dispersion of pollutants in the atmosphere during forest fires // Meteoinfo URL: [https://meteoinfo.ru/images/misc/sovet/disser-kirsanov/kirsanov\\_dis.pdf](https://meteoinfo.ru/images/misc/sovet/disser-kirsanov/kirsanov_dis.pdf) (date of application: 10.03.2023).