

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность
Отделение контроля и диагностики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Математическое моделирование возникновения природных пожаров в результате аварийных ситуаций на газопроводах

УДК 614.842.6:630:622.691.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM81	Акчина Суркурай Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП 20.04.01 Техносферная безопасность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Юлия Владимировна	к.т.н.		

Томск – 2020 г.

Результаты освоения образовательной программы по направлению 20.04.01 Техносферная безопасность

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Использовать на основе <i>глубоких и принципиальных</i> знаний необходимое оборудование, инструменты, технологии, методы и средства обеспечения безопасности человека и окружающей среды от техногенных и антропогенных воздействий в условиях <i>жестких</i> экономических, экологических, социальных и других ограничений	Требования ФГОС (ПК-3–7; ОПК-1–3, 5; ОК-4–6) ¹ , Критерий 5 АИОР ² (пп.5.2.1, 5.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Проводить <i>инновационные</i> инженерные исследования опасных природных и техногенных процессов и систем защиты от них, включая <i>критический анализ данных из мировых информационных ресурсов, формулировку выводов в условиях неоднозначности</i> с применением <i>глубоких и принципиальных</i> знаний и <i>оригинальных</i> методов в области современных информационных технологий, современной измерительной техники и методов измерения.	Требования ФГОС (ПК-8–13; ОПК-1–3, 5; ОК-4, 9, 10, 11, 12), критерии АИОР Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.2, 5.2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Организовывать и руководить деятельностью подразделений по защите среды обитания и безопасному размещению и применению технических средств в регионах, осуществлять взаимодействие с государственными службами в области экологической, производственной, пожарной безопасности, защиты в чрезвычайных ситуациях, находить и принимать управленческие решения с соблюдением профессиональной этики и норм ведения <i>инновационной инженерной деятельности</i> с учетом юридических аспектов в области техносферной безопасности	Требования ФГОС (ПК-4, 6, 14–18; ОПК-1–5; ОК-1, 7, 8), Критерий 5 АИОР (пп.5.2.5, 5.3.1–2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Организовывать мониторинг в техносфере, составлять краткосрочные и долгосрочные прогнозы развития ситуации на основе его результатов с использованием <i>глубоких фундаментальных и специальных</i> знаний, аналитических методов и <i>сложных моделей в условиях неопределенности</i> , анализировать и оценивать потенциальную опасность объектов экономики для человека и среды обитания и разрабатывать рекомендации по повышению уровня безопасности	Требования ФГОС (ПК-2, 19, 21, 22; ОПК-1–5; ОК-2), Критерий 5 АИОР (п.5.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Проводить экспертизу безопасности и экологичности технических проектов, производств, промышленных предприятий и территориально-производственных комплексов, аудит систем безопасности, осуществлять мероприятия по надзору и контролю на объекте экономики, территории в соответствии с действующей нормативно-правовой базой	Требования ФГОС (ПК-20, 23–25; ОПК-1–3, 5), Критерий 5 АИОР (пп.5.2.5–6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Общекультурные компетенции</i>		
P6	Работать в интернациональной профессиональной среде, включая разработку документации, презентацию	Требования ФГОС (ОК-5, 6, 10–12; ОПК-3), Критерий

¹ Указаны коды компетенций по ФГОС ВО (направление 20.04.01 – Техносферная безопасность).

² Критерии АИОР (Ассоциации инженерного образования России) согласованы с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

	и защиту результатов <i>инновационной</i> инженерной деятельности <i>с использованием иностранного языка</i>	5 АИОР (п.5.3.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Эффективно работать индивидуально, а также в качестве <i>руководителя группы</i> с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области <i>техносферной безопасности</i> , демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам, понимать необходимость и уметь <i>самостоятельно учиться</i> и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-1-3, 5, 8, 11, 12, ОПК 1-4, ПК-18) Критерий 5 АИОР (пп.5.3.3–6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность
 Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 20.04.01 Техносферная безопасность
 _____ Ю.В. Анищенко
 10.03.2020 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1ЕМ81	Акчиной Суркурай Сергеевне

Тема работы:

Математическое моделирование возникновения природных пожаров в результате аварийных ситуаций на газопроводах	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 10396/с от 26.11.2018 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.03.2020 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><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 особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования в данной работе является процесс зажигания полога леса в результате воздействия на него лучистого источника энергии при разрыве газопровода с образованием «огненного шара». Исследование заключалось в определении максимальных размеров зон зажигания.</p> <p>Предметом исследования является математическое моделирование зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода с образованием «огненного шара».</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования,</i></p>	<p>1) Обзор существующих теоретических и экспериментальных методов изучения зажигания полога леса в результате воздействия лучистого теплового потока.</p> <p>2) Разработка математической модели зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода с образованием «огненного шара».</p> <p>3) Выбор методики решения численных расчетов.</p>

конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	4) Проведение численных расчетов и получение результатов. 5) Оценка и анализ полученных данных.
---	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Доцент ОСГН Маланина Вероника Анатольевна, к.э.н.
«Социальная ответственность»	Профессор ТПУ Федорчук Юрий Митрофанович, д.т.н.
Раздел магистерской диссертации, выполненной на иностранном языке	Доцент ОИЯ Панамарёва Анна Николаевна, к.ф.н.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

- 1. The phenomenon of the fireball**

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.03.2020 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	д.ф.-м.н.		10.03.2020 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM81	Акчина Суркурай Сергеевна		10.03.2020 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность
 Уровень образования магистратура
 Отделение контроля и диагностики
 Период выполнения весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2020 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
23.03.2020 г.	Разработка раздела «Литературный обзор», работа с иностранными источниками.	20
06.04.2020 г.	Разработка раздела «Литературный обзор», анализ собранной информации, поиск метода проведения исследования.	10
20.04.2020 г.	Математическое моделирование зажигания лесного массива от огненного шара в одномерной и в осесимметричной двумерной постановке, физико-математическая постановка задачи.	25
04.05.2020 г.	Результаты решения задачи, анализ полученных данных и верификация моделей.	15
11.05.2020 г.	Разработка разделов «Социальная ответственность» и «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».	10
25.05.2020 г.	Оформление ВКР	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	д.ф.-м.н.		10.03.2020

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП 20.04.01 Техносферная безопасность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Юлия Владимировна	к.т.н.		10.03.2020

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

Студенту:

Группа	ФИО
1EM81	Акчина Суркурай Сергеевна

Инженерная школа	ИШНКБ	Отделение	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление / специальность	20.03.01 / 20.04.01 Техносферная безопасность

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1. Литературные источники; 2. Методические указания по разработке раздела; 3. Сборник сметных норм на геологоразведочные работы; 4. Налоговый кодекс РФ
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности проведения поисковых ГРП с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	1. Основные технико-экономические показатели поисковых ГРП
2. Планирование и формирование бюджета поисковых ГРП	2. Расчет затрат времени, труда, материалов и оборудования по видам работ
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности поисковых ГРП	3. Общий расчет сметной стоимости

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	26.02.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н., доцент		26.02.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM81	Акчина Суркурай Сергеевна		26.02.2020

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1EM81	Акчина Суркурай Сергеевна

Школа	ИШНКБ	Отделение	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	20.03.01/20.04.01 Техносферная безопасность

Тема дипломной работы: «Математическое моделирование возникновения природных пожаров в результате аварийных ситуаций на газопроводах»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Исследование математической модели зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода за ПК. Область применения: в нефтехимической промышленности при проектировании и строительстве газопроводов, прогнозирование ущерба.</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p>1.1. Воздействие на оператора вредных факторов, таких как, неблагоприятный микроклимат, недостаточная освещенность рабочей зоны (проведен расчет освещения рабочего места с рисунком), повышенный уровень шума на рабочем месте, электромагнитное излучение, напряженность и монотонность трудового процесса.</p> <p>1.2. Воздействие на оператора опасных факторов: электробезопасность (статистическое электричество, отсутствие заземления), пожаробезопасность.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны; – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); 	<p>Загрязнение окружающей среды токсичными веществами при утилизации ПК.</p> <p>Способы утилизации промышленных отходов (бумага-черновики, перегоревшие люминесцентные лампы, картриджи).</p>

– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	Рассмотрены 2 варианта ЧС: 1) Природная ЧС – сильные морозы зимой (аварии на электро-, тепло-, водомагистралях и транспорте, мероприятия при подготовке к зиме); 2) Техногенная ЧС – исключить несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (большая вероятность проведения диверсии); предусмотрены мероприятия по обеспечению устойчивой работы.
4. Перечень нормативно-технической документации, используемой при написании раздела СО.	ГОСТы, СанПиНы, СНиПы.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	26.02.2020 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н.		26.02.2020 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ЕМ81	Акчина Суркурай Сергеевна		26.02.2020 г.

Реферат

Выпускная квалификационная работа 131 с., 34 рис., 26 табл., 55 источника.

Ключевые слова: магистральный газопровод, математическое моделирование, тепловое излучение, огненный шар, растительный покров.

Объектом исследования: зажигание полога леса в результате воздействия на него лучистого теплового потока при разрыве газопровода с образованием «огненного шара» (далее ОШ).

Цель работы: определение максимального радиуса зажигания полога леса при воздействии теплового излучения на его поверхность при разрыве газопровода с образованием ОШ, которое ложится в основу определения безопасных расстояний от газопровода до лесных угодий.

В процессе исследования проводилось: определение радиуса зажигания полога леса при воздействии на него лучистого теплового потока в результате разрыва газопровода при помощи программы «Fireball» и «Fireball2d» с учетом структурных особенностей и характеристик лесных горючих материалов (ЛГМ).

В результате исследования были получены: безопасные расстояния от газопроводов до лесных массивов, зависимость радиуса зажигания от структурных особенностей и характеристик ЛГМ; распределение температур, концентраций и объемных долей на верхней границе полога леса; зависимость радиуса зажигания от влагосодержания ЛГМ и массы топлива.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: данные программы позволяют, на основе данных текущего состояния среды, в которой происходит излучение, определить радиусы зажигания растительного покрова.

Область применения: нефтехимическая промышленность.

Экономическая эффективность/значимость работы: позволит более точно определить безопасные расстояния от газопроводов до лесных массивов.

В будущем планируется создание: интерфейса для более удобного использования, 3D восприятие ситуации.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ Р 12.3.047-98. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

2. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

3. Методика оценки пожаробезопасных расстояний при проектировании промышленных предприятий. Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2016.

4. СТО Газпром 2-2.3-400-2009 Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром».

5. СНиП 2.05.06-85* Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила.

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

«Огненный шар» – крупномасштабное диффузионное горение парогазовоздушного облака, реализуемое при разгерметизации резервуара с перегретой горючей жидкостью, газом под давлением, сжиженными газами

Лесные горючие материалы – природные углеводородные топлива, к которым относятся тонкие веточки, хвоинки или листья в кронах деревьев и опавшие на землю, а также напочвенный покров (трава, кустарники, мох, лишайник), болотные растения и торф.

Обозначения и сокращения:

ОШ – «огненный шар»

ЛГМ – лесные горючие материалы

СУГ – сжиженные углеводородные газы

ЛВЖ – легковоспламеняющиеся жидкости

МТ – магистральные трубопроводы

МГ – магистральные газопроводы

НД – нормативный документ

ПК – персональный компьютер

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	16
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	18
1.1. Явление «огненного шара»	21
1.2. Проблема взрывов с образованием «огненного шара» в промышленности	24
1.2.1. Обзор аварий связанных с образованием «огненного шара» за рубежом.....	25
1.2.2. Обзор аварий на территории СССР/Российской Федерации	26
1.3. Вероятные сценарии аварий с образованием «огненного шара»	28
1.4. Зажигание растительности в результате воздействия «огненного шара» при взрыве газопровода	31
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЖИГАНИЯ ЛЕСНОГО МАССИВА ОТ ОГНЕННОГО ШАРА В ОДНОМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ	41
2.1. Физико-математическая постановка зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода.....	41
2.2. Результаты численного решения	46
2.3. Оценка и анализ полученных данных.....	54
3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЖИГАНИЯ ЛЕСНОГО МАССИВА ОТ ОГНЕННОГО ШАРА В ОСЕССИММЕТРИЧНОЙ ДВУМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ	55
3.1. Физико-математическая постановка зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода в двумерной постановке	55
3.2. Результаты численного решения	60
3.3. Оценка и анализ полученных данных.....	65
4. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ	66
4.1. Метод решения одномерной задачи	66

4.2. Метод решения двумерной задачи.....	69
5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	72
5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	73
5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования	73
5.1.2. Анализ конкурентных технических решений	75
5.1.3. SWOT-анализ	76
5.2. Инициация проекта	79
5.2.1. Цели и результат проекта	80
5.2.2. Организационная структура проекта.....	81
5.2.3. План проекта.....	81
5.3. Бюджет научного исследования.....	85
5.3.1. Расчет затрат на материалы.....	85
5.3.2. Расчет затрат на оборудование	85
5.3.3. Расчет основной заработной платы	86
5.3.4. Отчисления на социальные нужды.....	88
5.3.5. Накладные расходы	88
5.3.6. Реестр рисков проекта	89
5.4. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	90
5.4.1. Оценка социальной эффективности исследования.....	90
5.4.2. Оценка сравнительной эффективности исследования	91
5.5. Вывод.....	94
6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	95

6.1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды	95
6.2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды	104
6.2.1. Факторы электрической природы.....	104
6.2.2. Факторы пожарной и взрывной природы.....	105
6.3. Охрана окружающей среды.....	106
6.3.1. Утилизация компьютерной техники.....	106
6.3.2. Утилизация промышленных отходов	108
6.4. Защита в ЧС.....	109
6.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
Список публикаций.....	112
Список литературы	114
Приложение А Раздел 1.1 The phenomenon of the fireball	120

ВВЕДЕНИЕ

Анализ и оценка опасностей вероятных аварий в результате образования пожаровзрывоопасной смеси на потенциально опасных производственных объектах (далее ОПО), в наше время, является одной из самых важных проблем промышленной безопасности. Они, как правило, связаны с физическими и химическими свойствами углеводородных веществ, которые могут привести к их возгоранию или взрыву в случае аварийной ситуации. Аварии на предприятиях нефтегазовой отрасли происходят с большими объемами выброса взрывопожароопасных веществ, которые образуют облако топливно-воздушных смесей, разливы нефтепродуктов, и таким образом, итогами являются большое количество разрушений и повреждение инфраструктуры. Как показывает практика, в полной мере исключить аварии и уменьшить до нуля опасность, невозможно. По этой причине техногенные аварии и катастрофы необходимо либо предупреждать, либо ослаблять их вредное воздействие с помощью перехода на более новую стратегию обеспечения безопасности, которое будет основано на принципах прогнозирования и предупреждения аварии. Негативное воздействие этих факторов становится все более масштабными и оказывает ощутимое влияние на социально-экономическое развитие и обеспечение национальной безопасности страны. В связи с этим особую актуальность приобретает создание научно-обоснованных методов мониторинга аварийных ситуаций, которые будут основаны на математическом моделировании аварийных ситуаций, для создания программ, способных защитить окружающие объекты от влияния поражающих факторов аварий.

Благодаря созданным программам «Fire» и «Fireb2d» стало возможным масштабировать аварии и, вследствие этого, в более короткие сроки локализовать их.

Целью данного исследования является определение максимальных зон зажигания полога леса при воздействии лучистого источника энергии на его поверхность при разрыве газопровода с образованием ОШ. На основе

рассчитанного максимального радиуса зажигания определяются безопасные расстояния от газопровода до лесных угодий.

Для достижения поставленной цели необходимо осуществить следующие задачи:

1. Разработка физико-математической модели.
2. Численное решение поставленной задачи с помощью метода контрольного объема с использованием необходимого пакета программ и языка программирования.
3. Изучение влияния массы топлива на изменение радиуса зажигания.
4. Изучение влияния влагосодержания лесных горючих материалов на радиус зажигания.
5. Оценка и анализ полученных результатов.

Объектом исследования в данной работе является процесс зажигания растительности в результате воздействия на него лучистого теплового потока при разрыве газопровода с образованием ОШ. Исследование заключалось в определении максимальных размеров зон зажигания.

Предметом исследования является математическое моделирование зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода с образованием ОШ.

Результаты данной работы могут быть использованы в нефтехимической промышленности при проектировании и строительстве магистральных газопроводов, а также для прогнозирования масштабов вероятных аварий для осуществления превентивных мероприятий.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

С каждым годом в мире идет рост строительства предприятий нефтеперерабатывающей промышленности. Это значит, что и увеличивается количество обращающихся на данных объектах горючих и легковоспламеняющихся жидкостей, горючих газов. Итогом увеличения количества опасных производственных объектов может стать ухудшение пожароопасной обстановки и увеличение количества крупных техногенных аварий. Произошедшие аварии современности отличаются катастрофическими масштабами, а также наносят огромный ущерб для экологии и экономики страны.

Вероятные аварийные ситуации на нефтеперерабатывающей промышленности: полное или частичное разрушение технологического оборудования, пожар пролива легковоспламеняющихся и горючих веществ, образование токсичных облаков, взрыв топливовоздушной смеси.

Несмотря на то, что ужесточили законодательство в области обеспечения пожарной и промышленной безопасности, в нашей стране так же, как и прежде наблюдается высокая вероятность аварийности среди объектов нефтеперерабатывающей промышленности. Высокая аварийность, в большинстве случаев, связана с низким качеством технологических аппаратов и устройств, подверженные коррозии и механическому износу, а также наличием в исходном сырье большого количества сернистых соединений, которые присутствуют в больших количествах в добываемой нефти и газе.

Под магистральным трубопроводом понимается трубопровод, сконструированный для доставки газа из района месторождения или обработки к месту потребления, или система труб, связывающая между собой отдельные месторождения газа. Он является одним из важных элементов системы транспортировки газа и относится к Единой системе газоснабжения России [1].

Магистральные трубопроводы транспортируют:

- 1) Сжиженный углеводородный газ (смеси) из мест производства до мест использования;

2) Нефть и нефтепродукты из районов добычи, производства до мест потребления;

3) Воду в системах отопления и прочих системах водоснабжения [2].

Расстояния от магистральных трубопроводов, предназначенных для транспортировки сжиженных углеводородных газов, до городов, населенных пунктов, дачных поселков и сельскохозяйственных угодий (санитарные полосы отчуждения) следует принимать в зависимости от класса и диаметра, но не менее значений, указанных в таблице 1.1 [3].

Таблица 1.1 – Минимальные безопасные расстояния от трубопроводы до объекта, здания и сооружения [3]

Объекты, здания и сооружения	Минимальные расстояния, м							
	Класс газопровода							
	I				II			
	Условный диаметр газопровода, мм							
	300 и менее	300-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	300 и менее	300 и более
1. Города и населенные пункты, промышленные и сельскохозяйственные предприятия, железнодорожные станции, аэропорты, морские и речные порты, гидроэлектростанции, гидротехнические сооружения, радиорелейные линии связи трубопроводов, телевизионные башни	150-500	175-500	200-700	250-700	300-700	350-700	100-500	125-500
2. Мосты, склады ЛГМ и ЛГЖ с объемом хранения свыше 1000 м ³ , автозаправочные станции, водопроводные сооружения.	150-250	175-300	200-350	225-400	250-400	300-500	100-250	100
3. Железные и автомобильные дороги, кладбища, фермы, полевые станы	75-100	125-150	150-200	200-250	225-300	250-300	75	100-150
4. Мосты 3-5 категорий с пролетом свыше 20 м	100-125	125-150	150-200	200-250	225-300	250-350	75-100	125-150

Продолжение таблицы 1.1

Объекты, здания и сооружения	Минимальные расстояния, м							
	50-75	75-100	100-150	150-175	175-200	200-250	50	75-100
5. Железные дороги промышленных предприятий								
6. Устья бурящихся и эксплуатируемых нефтяных, газовых и артезианских скважин, очистные и сооружения и насосные станции канализации	50	75	150	200	225	250	50	75
7. Открытые распределительные устройства электроподстанций	100	100	100	100	100	100	100	100
8. Лесные массивы пород:								
а) хвойных	50	50	50	75	75	75	50	50
б) лиственных	20	20	20	30	30	30	20	20

При авариях на МТ взрывы и пожары несут существенный ущерб окружающей среде, также бывают причиной травм и гибели людей.

Магистральные трубопроводы по сравнению с другими видами транспорта отличаются высокой производительностью и большой протяженностью, а также высокой уязвимостью от агрессивных воздействий со стороны внешней среды. Но несмотря на плюсы данного вида транспортирования из-за значительной протяженности по длине трассы меняются конструктивные и технологические параметры, эксплуатационные условия, что приводит к увеличению интенсивности аварий, так и сценариев их развития и величины ущерба [4].

Совокупность факторов, обуславливающих повышение риска взрыва с образованием ОШ, представлена наличием больших масс горючей жидкости или газа, высоких значений энергии перегрева и внезапном разрушении сосудов, когда за очень короткое время образуется огромная масса паров. Это нередко происходит при огневом или другом интенсивном нагреве сосудов со СУГ и легковоспламеняющимися жидкостями (ЛВЖ). По этим причинам локальные пожары или взрывы с дальнейшим возникновением пожаров на

складах сжиженных газов или технологического оборудования всегда представляют опасность крупномасштабного развития аварий [5].

1.1. Явление «огненного шара»

Явление «огненного шара» начали подробно изучать со второй половины XX века после того как произошел ряд крупных аварий, сопровождающиеся образованием огромных размеров ОШ и многочисленными жертвами. Внезапное высвобождение перегретой легковоспламеняющейся жидкости (газа) из резервуара-хранилища или технологического сосуда – начало сложного события, которое часто заканчивается образованием непродолжительного ОШ.

Огненный шар представляет собой облако горящего газа или пара, поднимающееся над поверхностью земли, которое может излучать большое количество лучистой энергии в течение своей короткой жизни, и способно вызвать серьезные травмы и повреждения на расстояниях в несколько раз больше, чем размер ОШ [6]. По мнению Маршалла [7] «огненный шар» – облако пара, смешанное с воздухом, но переобогащенное топливом и не способное, поэтому, к объемной дефлаграции или детонации, при появлении источника воспламенения начинает гореть вокруг своей оболочки за счет поступающего из окружающей среды воздуха. В соответствии с ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» [8], «огненный шар» – это крупномасштабное диффузионное пламя сгорающей массы топлива или парового облака, поднимающееся над поверхностью земли. Исходя из вышеупомянутых определений, будем считать, что «огненный шар» – это крупномасштабное диффузионное горение парогазовоздушного облака, реализуемое при разгерметизации резервуара с перегретой горючей жидкостью, газом под давлением, сжиженными газами [5].

Спустя довольно короткое время после воспламенения горячая оболочка пламени начинает поднимать ОШ над поверхностью земли, что приводит к увеличению зоны опасного воздействия излучения. Поднимаясь, ОШ формирует грибовидное облако, ножка которого представляет собой сильное

восходящее конвективное течение [7]. Благодаря тепловому расширению оболочки воздух проникает внутрь ОШ, в результате чего размеры и высота подъема ОШ в процессе горения возрастают и он начинает гаснуть, разбиваясь на более мелкие газовые полости, часть которых продолжает гореть. В процессе горения ОШ из углеводородов или природного газа образуется сажа, что приводит к возникновению светящегося пламени с излучательной способностью близкой к единице у углеводородов и меньше единицы у природного газа. Температура ОШ может превышать 2000°C [9].

Существует два сценария развития ОШ:

1) Зажигание топлива, частично перемешанное с воздухом, происходит на начальной стадии аварийного выброса, при котором богатая смесь будет гореть в диффузионном режиме.

2) Зажигание происходит с задержкой, тем временем большая часть топлива перемешивается с воздухом, продукты горения и вовлекаемого воздуха интенсивно расширяются и объем горящего облака значительно превосходит начальный объем горючего газа.

Рассматривая эти сценарии, вполне закономерно, что с учетом массы топлива при образовании ОШ, и как следствие, интенсивности теплового потока, можно сказать, что второй сценарий будет по своим масштабам и последствиям куда опаснее первого [5].

Основываясь на данной Маршаллом еще в середине XX века динамики развития ОШ на производственном объекте от момента появления причины аварии до момента исчезновения при анализе аварий и исследованиях этого процесса можно выделить следующие четыре основные стадии [7]:

1) время от потери герметичности трубопровода до момента воспламенения;

2) период от момента воспламенения до момента вытягивания;

3) длительность времени от момента вытягивания до полного образования;

4) время от полного образования до прекращения существования.

Продолжительность горения и размеры ОШ определяются общей массой жидкости или газа в емкости в момент взрыва. Масса топлива, участвующая в образовании ОШ является неотъемлемой частью уравнений для расчета диаметра и времени существования. Эта масса может быть такой же, как масса, содержащаяся внутри сосуда до его разгерметизации, но она также может быть и меньше, чем первоначальная масса топлива [6]. Масса аварийного выброса горючих углеводородных газов может колебаться от 1 до 5000 тонн, максимальный диаметр ОШ – от 50 до 800 м, время горения – от 6 до 100 секунд [10].

Форму ОШ в основном рассматривают в виде сферы. Видео и другие случайные и экспериментальные наблюдения показывают, что большинство ОШ допустимо описывать в форме сферы [10].

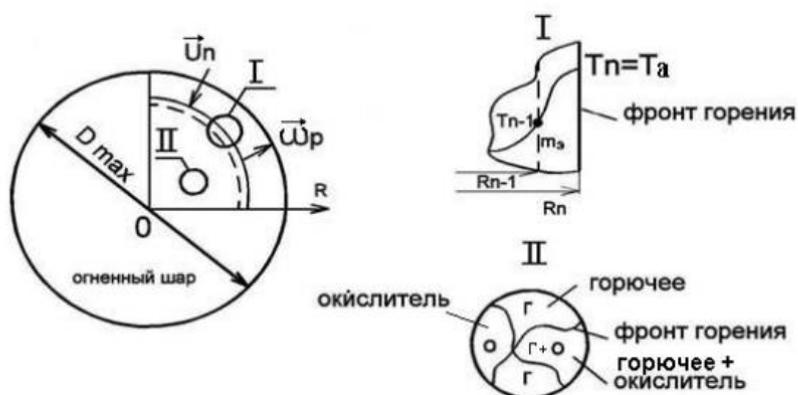


Рисунок 1.1 – Структура пламени ОШ [10]

Согласно рисунку 1.1 в первой зоне происходит поверхностное горение на границе ОШ, во второй зоне происходит объемное горение частично перемешанной газовой смеси. И в первой, и во второй зонах происходит диффузионное горение газовой смеси, где скорость которого зависит не только от условий перемешивания, но и от кинетических параметров. В соответствии с классической теорией диффузионного горения газовых смесей, фронт горения устанавливается в тех локальных объемах, где окислитель и горючее поступают в стехиометрическом отношении [10].

Учитывая природу ОШ, стадии и особенности его формирования и существования можно заключить, что в явлении ОШ опасными факторами является его высокая температура, большие размеры и возможность

передвижения в воздушных потоках, поэтому они могут стать источниками пожаров по траектории своего движения. Однако наиболее значительной является их потенциальная опасность для человека, который находясь даже на большом расстоянии от ОШ в результате теплового излучения может получить тяжелые ожоги.

1.2. Проблема взрывов с образованием «огненного шара» в промышленности

Проблема взрывов в промышленности с образованием ОШ является сегодня актуальной для многих стран, включая и Российскую Федерацию. За последние десятилетия произошло коренное изменение промышленности, которое характеризуется сменой структуры потребления первичных энергоресурсов. Для всех развитых стран мира, в том числе и РФ, свыше 60% в топливно-энергетическом балансе на настоящий момент занимают нефть и газ, против 20% в 30-х годах. Также происходит постоянное увеличение доли химически-, пожаро-, взрывоопасных технологий, которые используют сжиженные углеводородные газы – пропан, бутан, этилен, бутилен, пропилен и др. [11,12]. Поэтому на газопроводах, транспортирующие сжиженные углеводородные газы (СУГ), может произойти с взрыв с образованием ОШ.

В технологических процессах, которые связаны с добычей, транспортировкой, переработкой, получением, хранением и применением горючих газов и ЛВЖ, всегда существует опасность образования взрывоопасных газо- и паровоздушных смесей. Взрывоопасную среду могут образовать смеси газов с воздухом и другими окислителями (кислород, озон, хлор, окислы азота и др.) и вещества, склонные к взрывному превращению (ацетилен, озон, гидразин и др.).

Взрыв с образованием ОШ может также стать причиной каскадного развития аварий, поэтому он представляет большую опасность. Тепловое излучение является одним из наиболее опасных поражающих факторов, характерным для объектов магистральных трубопроводов в случае аварии с образованием ОШ.

1.2.1. Обзор аварий связанных с образованием «огненного шара» за рубежом

Как в России, так и в других странах данные по аварийности собираются на государственном уровне в соответствии с национальным законодательством. В России регулирующим органом выступает Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), в США – Управление по безопасности трубопроводов и опасным материалам Министерства транспорта (Office of Pipeline Safety under the Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA). Собираемые данные по аварийности находятся в открытом доступе [13].

В таблице 1.2 представлены данные по самым крупным авариям и катастрофам с образованием ОШ в зарубежных странах за последние полвека.

Таблица 1.2 – Список аварий с образованием ОШ за рубежом [14]

Дата	Место аварии	Вещество	Масса вещества, т	Ущерб, чел
1970	Кресент-Сити, США	пропан	275	66 раненных
1972	Тьюксбери, США	пропан	28	неизвестно
1972	Линчберг, США	пропан	9	2 погибших 5 раненных
1974	Онеонта, США	пропан	288	25 раненных
1975	Игл-Пасс, США	пропан	18	16 погибших
1978	Уэйверли, США	пропан	45	16 погибших 43 раненных
1979	Пастон, США	пропан	недоступно	8 раненных
1984	Мехико, Мексика	пропан	3000	650 погибших
1984	Ромеовиль, США	пропан	недоступно	15 погибших 22 раненных
1996	Палермо, Италия	пропан	недоступно	5 погибших 25 раненных
1998	Альберта-Сити, США	пропан	40	2 погибших 7 раненных
2002	Каир, Египет	бутан	недоступно	373 погибших
2004	Вашингтон, США	пропан	10	10 погибших
2010	Сан-Бруно, США	пропан	недоступно	8 погибших 66 раненных
2011	Аллентаун, США	пропан	недоступно	5 погибших
2013	Вашингтон-Пэрриш, США	пропан	недоступно	–
2016	Гринсбург, США	пропан	недоступно	1 раненный

Аварии на газопроводах и нефтепроводах в США не редкое явление. На общую длину всех трубопроводов Америки – 2,5 млн. км, ежегодно приходится сотни утечек и разрывов, которые становятся в отдельных случаях причиной

многих человеческих жертв. И по мере старения трубопроводных систем, риск аварий на этих линиях будет только увеличиваться. Только с начала 2000 годов их было зарегистрировано более 400 [15].

В Соединенных Штатах Америки в 60-е и 70-годы было принято большинство федеральных законов о безопасности трубопроводов, а также установлены стандарты безопасности для вновь построенных линий. Однако на трубопроводы, построенные ранее этого срока, данные правила не распространялись. Значительная протяженность трубопроводов и выделение огромных бюджетных средств на их обслуживание представляет собой и сегодня трудноразрешимую задачу даже для США [15]. На территории США существует программа, которая направлена на выявление и предотвращение нарушений в работе трубопроводной системы – Программа управления целостностью (Integrity Management Program). Также Управление по безопасности трубопроводов и опасным материалам Министерства транспорта США требуют от операторов трубопроводов реализации ряда мероприятий по обеспечению безопасности, нацеленные на существенное снижение угроз на магистральных трубопроводах страны [16].

1.2.2. Обзор аварий на территории СССР/Российской Федерации

На территории Российской Федерации проложена уникальная по протяженности и производительности система магистральных трубопроводов. В последние годы статистика аварийности показывают низкую вероятность возникновения аварийных ситуаций, которые приводят к травме и гибели людей. Но несмотря на это на данный момент все равно существует вероятность возникновения аварий, связанных с эксплуатацией МТ [16].

В настоящее время идет интенсивное строительство новых трубопроводов, а также реконструкция существующих систем транспортировки газа и нефти. Большая часть системы прокладываются или располагаются вблизи населённых пунктов и лесного массива, поэтому проблема обеспечения безопасности остается актуальной до сих пор. Большие масштабы распространения, воздействие на окружающую среду и население при воспламенении являются наиболее опасными факторами аварии на МТ,

транспортирующие СУГ. К созданию большого радиуса поражения приводит опасность выброса газов с дальнейшим воспламенением и созданием дрейфующих облаков [7]. В связи с этим особое значение приобретает важность оценки последствий аварийных выбросов таких веществ. Поэтому получение адекватных оценок опасности МТ является важной и необходимой частью обеспечения безопасности, которое подтверждается статистикой аварий.

Так в 1989 г. произошел взрыв на МТ «Мессояхские месторождения – Норильск», в 1993 г. на МГ «Ухта – Торжок» в Ярославской области произошел взрыв газа с последующим возгоранием лесного массива, в 1994 г. в Московской области произошло разрушение одной из трех ниток газопровода. В 2006 году на МГ «Моздок – Тбилиси» ОАО «Газпром» произошёл взрыв, вследствие которого была прекращена подача газа в Грузию. Также в 2006 году на 1473,8-м км. МГ «Уренгой – Петровск» ОАО «Газпром» в процессе подготовки к проведению работ по внутритрубной диагностике при подаче давления произошло разрушение камеры запуска поршня (погибли 2 человека) [17]. В 2018 году на нефтехимическом заводе «Синтез-Каучук» в Башкирии в процессе проведения ремонтных работ на трубопроводе произошло возгорание вследствие утечки углеводорода – изопентан. Площадь возгорания составила примерно 30 м² (пострадали 4 человека). В 2019 году на МТ «Роснефти» в результате разгерметизации одного из вспомогательных трубопроводов произошел пожар, где пламяхватило площадь в 10 м² [18].

Таких случаев можно насчитать очень много, но самым значительным происшествием в истории тогда еще СССР стала Уфимская катастрофа, нанеся колоссальный ущерб, причиной которого стал взрыв с образованием ОШ.

В 1989 вблизи г. Уфы на Куйбышевской железной дороге произошла крупная техногенная авария, которая унесла жизнь 1224 человек, а также нанеся остальным людям тяжелые повреждения разной степени. По статистическим данным, именно в этой аварии зафиксировано максимальное количество пострадавших при выбросе в атмосферу пожароопасной

смеси с ее дальнейшим возгоранием. Возникший пожар охватил территорию около 250 га, где местность в основном была покрыта густыми лиственными лесами [19].

После произошедшей катастрофы ужесточились требования безопасности, также были внесены дополнения в СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы», где существенно увеличили минимальные расстояния от магистральных трубопроводов до населенных пунктов.

1.3. Вероятные сценарии аварий с образованием «огненного шара»

Разгерметизация оборудования и трубопроводов в нефтехимической отрасли приводит к истечению горючих веществ, которые, как правило, очень часто сопровождаются пожарами и взрывами. Данная отрасль отличается тем, что в технологических системах имеется большой объем взрывопожароопасной продукции и сырья, также технологические процессы ведутся при высоких давлениях и температурах, в ряде случаев близких к критическим показателям. Кроме этого, причинами аварий могут быть несовершенство технологических процессов, неисправности применяемого оборудования, отказы систем автоматического управления и защиты, ошибки обслуживающего персонала и т.д. Вышеперечисленные характеристики создают высокий риск возникновения аварийных ситуаций [20].

Взрыв с образованием ОШ может произойти на любом этапе производственного цикла от добычи и транспортировки до переработки и хранения. При освоении новых месторождений нефти и газа, а также при их добыче во время бурения может произойти пожар. Источником возгорания может быть маленькая искра, образованная при трении песчинки или гальки о металлические конструкции, в результате которой загорается нефтяной или газовый фонтан. Огненный смерч пылает с такой температурой, что около него сгорает все, что только может гореть. Такие пожары тушить очень сложно: огонь заливают, засыпают, пытаются сбить пламя направленными взрывами и реактивными струями воздуха. И все же иногда огненные факелы горят годами. В 1985 г. на месторождении «Тенгиз» в Казахстане произошел взрыв с

дальнейшим возникновением пожара. Потушить пожар смогли только через несколько месяцев. Пламя пожара при этом достигло высоты почти 150 м [21].

Основную долю нефтегазопродуктов на континентальных территориях государства перемещают с использованием трубопроводного транспорта. Количество аварий при транспортировке нефтегазопродуктов ежегодно возрастает. Значительная часть трубопроводного фонда довольно устарела. Ежегодно в России из МТ вытекает, согласно различным данным, от 20 до 50 млн. т добываемой нефти и газа. Наружная коррозия и механический износ трубопроводов, несвоевременный и медленный ремонт, ошибки и дефекты в строительстве, нарушения правил технической безопасности дают все основания предполагать, что число аварий будет возрастать, а это, в свою очередь, может нанести огромный ущерб так и экономике страны, так и нашей экологии (рисунок 1.2). Зачастую аварии на МТ вызывают возникновение пожаров и взрывов транспортируемых топливных продуктов. Минимальные безопасные расстояния между объектом повышенной опасности и лесными угодьями является основной проблемой обеспечения пожарной и промышленной безопасности. Требования соблюдения при строительстве и прокладке МТ минимальных расстояний содержатся в ряде нормативных документах. Поэтому сейчас особенно актуальна задача определения минимальных безопасных расстояний в связи с развитием системы МТ и МГ. Анализ и оценка статистики аварийности на российских МТ показывает, что гибель людей происходит достаточно редко. Но при прокладке и строительстве вблизи населенных пунктов, объектов инфраструктуры, лесных массивов не исключена возможность нанесения колоссального ущерба при аварии. Под минимальным безопасным расстоянием понимается минимальное допустимое расстояние от оси линейной части магистрального трубопровода до объектов окружающей среды (здания, населенные пункты, транспортные пути), устанавливаемое для обеспечения безопасности людей [22].



Рисунок 1.2 – Суммарное распределение причин аварий на МГ по данным Ростехнадзора [23]

Также тяжелые последствия могут вызвать пожары и взрывы, которые возникают на нефтехранилищах и складах горючего материала. Наиболее вероятной причиной аварийного выброса или истечения горючего вещества может стать нарушение герметичности оборудования в результате несоблюдения технологического процесса и неисправности противоаварийных систем и устройств. При разгерметизации оборудования и выбросе горючего газа в окружающую среду вследствие высокой скорости испарения могут образовываться паровоздушные облака больших размеров, зависящих от количества мгновенно вышедшего газа или скорости истечения, а также климатических условий (скорости ветра, температуры воздуха) [21].

Вероятные сценарии аварии на газопроводах

Аварийные ситуации на газопроводах объектов газодобычи сводятся к трем типичным случаям [24]:

1) истечение из межпромыслового коллектора между установкой предварительной подготовки газа (УППГ) и головными сооружениями (ГС) (рисунок 1.3 а);

2) истечение из межпромыслового коллектора ДКС (УППГ, УКПГ) ниже по потоку течения газа (рисунок 1.2 а, б);

3) истечение из внутрипромыслового газопровода со стороны куста скважин (рисунок 1.3 б);

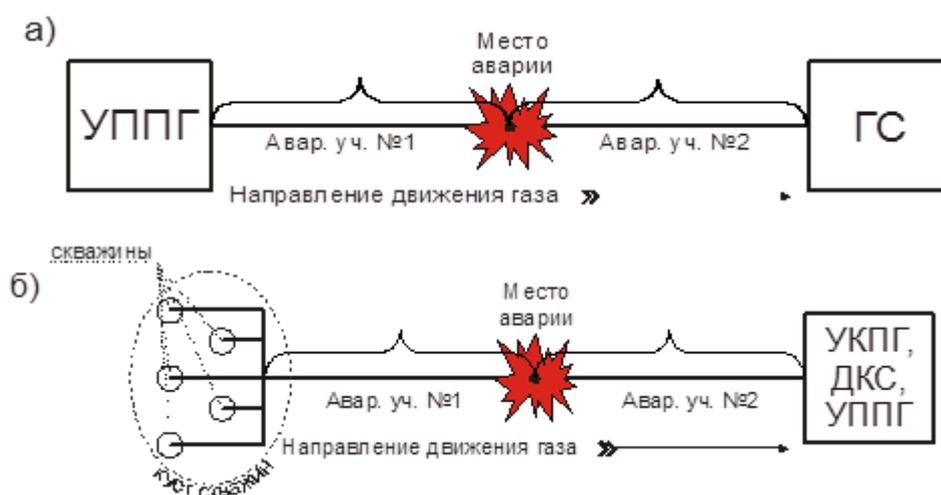


Рисунок 1.3 – Типовые случаи аварийных разрывов

а) разрыв межпромыслового, магистрального газопровода;

б) разрыв внутрипромыслового газопровода от коллектора куста скважин до УКПГ [24].

Масштабы разрыва и вероятность выброса газа с дальнейшим ее возгоранием имеют определенную связь с технологическими параметрами трубопровода, с характеристиками грунта. Для трубопроводов большого диаметра (1200–1400 мм) характерны протяженные разрывы (50–70 м и более) и высокая вероятность загорания газа (0,6–0,7) [23].

1.4. Зажигание растительности в результате воздействия «огненного шара» при взрыве газопровода

Лес – это большая часть Земли, на которой преобладают деревья. Во всем мире используются сотни более точных определений леса, включающих такие факторы, как плотность деревьев, высота деревьев, землепользование, правовое положение и экологическая функция. Леса являются доминирующей наземной экосистемой Земли и распространены по всему земному шару. Лес можно представить, как структурный слой на поверхности земли, который имеет в своем составе разнородные элементы, где каждый из этих элементов может рассматриваться как отдельный горючий материал. В состав биоценоза леса входят: деревья, кустарники, трава, мхи, лишайники и т.д. В состав неживых компонентов входит – опад (отмершие веточки, хвоя, листва, а также

сухая трава и сухие веточки на деревьях и кустарниках) (рисунок 1.4). С точки зрения механики сплошной среды лес представляет собой некоторый слой многокомпонентной многофазной реакционноспособной сплошной массы, обладающей неоднородными свойствами в вертикальном и горизонтальном направлениях [25].

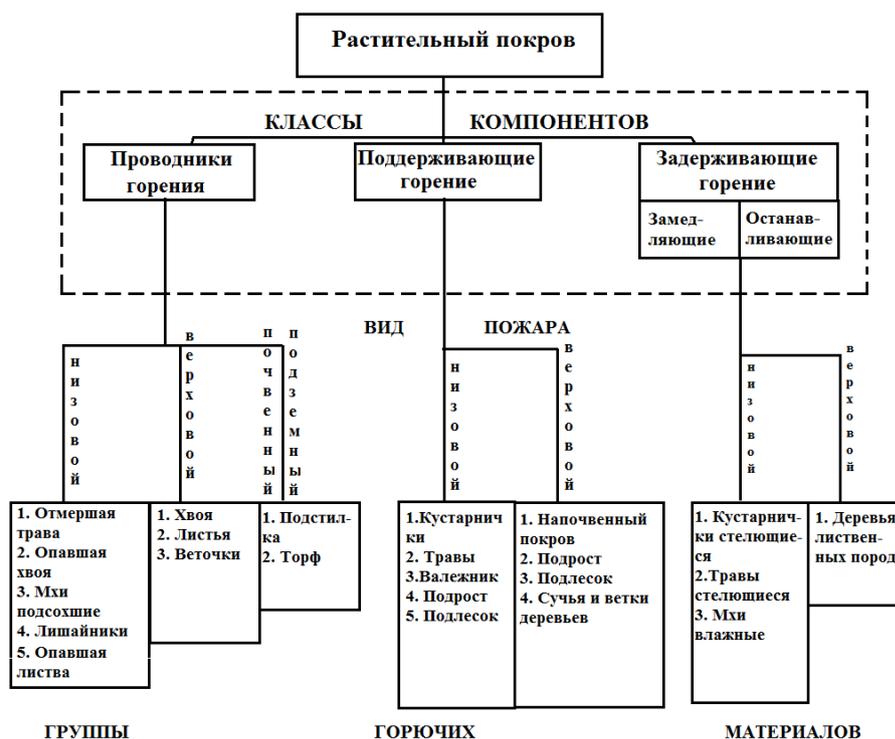


Рисунок 1.4 – Растительный покров как объект горения [26]

В зависимости от особенностей растений, их возраста и определённых физико-географических условий в лесу развивается многоярусная система (рисунок 1.5) [27]:

- 1) полог леса – совокупность крон взрослых деревьев до 25 м и высоту нижней границы крон 1–7 м;
- 2) подлесок – совокупность крон молодых деревьев до 6 м;
- 3) кустарники высотой до 2 м;
- 4) травянистые растения от 0.1 до 0.8 м;
- 5) кустарнички толщиной от 10 до 20 см;
- 6) ярус мхов, лишайников и опада от 6 до 8 см;
- 7) подстилка толщиной 2–5 см.

Также для математического моделирования стоит учитывать следующие слои, которые взаимодействуют с нагретыми газообразными продуктами горения лесных горючих материалов (далее ЛГМ) [27]:

- 1) приземный слой атмосферы высотой до 150–200 км;
- 2) планетарный пограничный слой 1.5–2 км.

Важной характеристикой лесного массива считается его полнота, которую характеризуют объемной долей растительных материалов в единице объема многофазной сплошной среды – фитоценоза. Неоднородность свойств леса по территории обусловлена наличием разных по типу и возрасту деревьев, кустарников и напочвенного покрова [25]

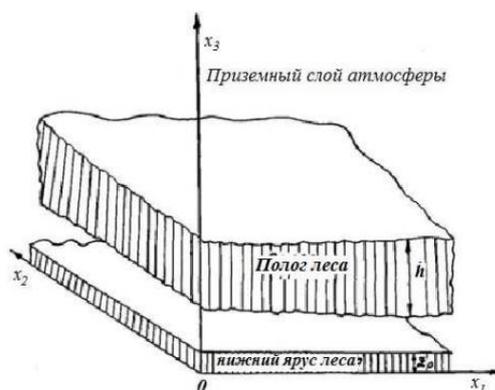


Рисунок 1.5 – Схема расположения лесных горючих материалов в лесном массиве [28]

В наше время существует очень много классификаций лесного массива. Наиболее крупной группой в классификации лесов является по природным зонам: тропические, субтропические, леса умеренного пояса. Они, в свою очередь, дальше подразделяются на разные группы [29].

Помимо этих классификаций их группируют по сезонному аспекту. Например, вечнозеленый лес – живая листва сохраняется на деревьях круглый год, листопадный лес – листья опадают с наступлением холодного или сухого сезона, и деревья ежегодно на протяжении нескольких недель или месяцев остаются без листьев

Больше 80% площади лесов России занимают хвойные леса, которые лучше лиственных переносят суровую зиму, прохладное лето, а также избыточное увлажнение. К хвойным лесам относятся темнохвойные, состоящие

их еловых и пихтовых лесов, а также светлохвойные: сосновые, кедровые, и лиственничные леса. Самые распространённые породы: лиственница, сосна, ель и кедровая сибирская сосна. Лесистость неравномерно распределена по территории страны и зависит от климатических и антропогенных факторов. Леса распространены там, где среднемесячные температуры июля превышают 10°C , а увлажнение достаточное или избыточное [30].

В механике газа лесные массивы могут классифицироваться как непродуваемые и продуваемые, которые, в свою очередь, делятся на ажурные и продуваемые. Непродуваемые лесные полосы воздушный поток обтекает почти так же, как твердое непроницаемое тело. Для непродуваемых лесных массивов характерна значительная величина объемной доли конденсированной фазы и почти нулевая скорость потока внутри лесного массива. Ажурный тип леса характеризуется одинаковой по высоте древостоя проницаемостью, а продуваемый лесной массив в отличие от ажурного содержит крупные просветы в нижнем ярусе. Таким образом, структура леса влияет на поле скорости воздушного потока [27].

Лесной массив у нас является горючим материалом, который делится на следующие группы [30]:

- 1) почвенные;
- 2) напочвенные;
- 3) ступенчатые;
- 4) кроновые.

Для изучения особенностей воспламенения ЛГМ сосновых насаждений исследователями были проведены опыты под воздействием теплового излучения. Первым этапом определяют массу образца, затем образцы просушивают в сушильном шкафу при естественной влажности до абсолютно сухого состояния при температуре 105°C . Далее их в специальных установках испытывают на воспламеняемость при плотности теплового потока $15\text{--}45\text{ кВт/м}^2$, что соответствует температуре нагревательного элемента радиационной панели установки $412\text{--}658^{\circ}\text{C}$. В результате проделанного эксперимента установлено, что критическим значением плотности лучистого теплового

потока, при котором происходит воспламенение хвои сосны, является 20 кВт/м². Следует отметить, что при воздействии плотности теплового потока менее 20 кВт/м² наблюдалось активное выделение газообразных продуктов горения ЛГМ, однако воспламенение образцов не наблюдалось [31].

Также стоит уделить внимание оптическим характеристикам лесных массивов: коэффициент отражения и поглощения лесных массивов. Хвои ели в весеннее – летний период, обращают на себя внимание максимум в зеленой 0,54–0,58 мкм и минимум в красной 0,68–0,69 мкм частях спектра. В ближней инфракрасной части спектра при $0,74 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 1,2 \text{ мкм}$ отражательная способность зеленых растений максимальна и практически не меняется. Поглощение зеленой хвоей и листьями лучистой энергии в этой части спектра не превышает 15–20 %. При дальнейшем росте длины волны отражательная способность зеленых растений падает и при $\lambda > 2,6 \text{ мкм}$ почти полностью исчезает, т.е. в этом спектральном диапазоне лесные массивы можно считать абсолютно черным телом. Лиственные породы в инфракрасном диапазоне имеют более высокую отражательную способность, чем хвойные. Это является одной из причин меньшей горимости лиственных лесов по сравнению с хвойными. Также существует сезонная динамика, а также суточная динамика, обусловленная влиянием погодных условий (температура, влажность воздуха, ветер и облачность). Сезонная изменчивость обусловлена развитием растений. Молодая листва и хвоя имеют значительно большую яркость по сравнению с полностью развитыми листвой и хвоей. В летний период способность растительности пропускать и отражать излучение значительно падает [31].

Известно, что одной из причин возникновения лесных пожаров является зажигание растительности лучистым тепловым потоком. Все участки растительного покрова как объекты горения представляют собой структурные комплексы из разнообразных ЛГМ.

В России пожарная опасность в лесу оценивается по типу: легко-, средне-, труднозагорающиеся и негоримые. Лесные горючие материалы делятся на первичные (лесной опад, сухая отмершая трава, определенные виды живого напочвенного покрова, валеж, гнилые пни, порубочные остатки) и

вторичные (надземные части леса: лишайники на ветвях, сухостойные деревья) объекты загорания. Проводником горения при низовых пожарах в напочвенном покрове могут быть мхи, лишайники, мелкие растительные остатки и подстилка, по которой может распространяться беспламенное горение (тление). А при верховых пожарах – хвоя и листва в пологе древостоя (таблица 1.3) [32].

Таблица 1.3 – Классификация ЛГМ [33]

	Вид ЛГМ	Тип горения
Проводник горения	Опад, лишайники, мхи	Преимущественно пламенное
	Лесная подстилка, торф	Тление
	Валежник, пни, крупные порубочные остатки	Здоровая древесина горит преимущественно пламенно, гнилая – тлеет
Поддерживающие горение	Травы, кустарнички, плауны, сеянцы древесных растений	Пламенное
	Подросток и подлесок	Преимущественно пламенное, хвойные горят интенсивней, чем лиственные
	Хвоя, листва, несущие их веточки и мелкие сучья древостоя	Преимущественно пламенное, хвойные горят интенсивней, чем лиственные
Задерживающие горение	Некоторые виды трав, кустарничков и деревьев	Самостоятельно не горят из-за высокого влагосодержания или особенностей химического состава

Слой ЛГМ при воздействии теплового потока нагревается и термически разлагается с образованием газообразных продуктов пиролиза. Состав газовой смеси принимается трехкомпонентным (горючее – монооксид углерода, окислитель – кислород, инертные компоненты). Продукты пиролиза, в свою очередь, выделяются в область газовой смеси и при определенной температуре и концентрации газов происходит зажигание данной смеси [34].

Лесной фонд РФ составляет 1181 млн. га: хвойные насаждения – 72% площади, мягколиственные – 16%, твердолиственные – 2,5%. Самые распространённые породы: лиственница, сосна, ель и кедровая сибирская сосна.

Согласно исследованию [35], огонь низового пожара в хвойном лесу распространяется преимущественно по опадку хвои и по зеленым мхам. Таким

образом, условия возгорания, возникновения и распространения лесных низовых пожаров во многом будут определяться пожарно–техническими и теплофизическими характеристиками данных ЛГМ. Характеристики как воспламеняемость и распространение пламени по поверхности могут определяться с использованием специальных установок в лабораториях. В работе [35], приведены результаты лабораторных исследований по определению условий воспламенения наиболее распространенных видов ЛГМ сосновых насаждений. В результате проведенных исследований установлено, что критическим значением плотности лучистого теплового потока, при котором происходит воспламенение хвои и мха, является 20 кВт/м^2 , вереска– 25 кВт/м^2 . Также было установлено, что при воздействии теплового потока менее 20 кВт/м^2 наблюдается активное выделение газообразных продуктов горения ЛГМ, но воспламенение образцов отсутствовало [35].

В условиях реального пожара воспламенение ЛГМ при недостаточном тепловом потоке может также произойти при внесении в горючую среду источника зажигания (открытого огня) путем перелета горящих частиц. Моделировалась следующая ситуация: в горючую среду вносился открытый источник пламени, и определялись зависимости времени воспламенения газообразных продуктов горения ЛГМ от плотности теплового потока. В проведенных исследованиях воспламенение образцов хвои, мха и вереска наблюдалось при 15 кВт/м^2 [35].

Также другими исследователями было изучено влияния начальной температуры образцов древесины и ее влажности на время воспламенения при высоких плотностях потока лучистой энергии. Источником энергии являлся оптическая печь «Уран–1» с максимальной плотностью лучистого потока 4000 кВт/м^2 . В качестве исследуемых образцов использовали сухую древесину сосны, березы, кедра, лиственницы и осины, как наиболее распространенных в РФ [36].

Ниже на рисунке 1.6 представлены результаты исследования [36] с начальной температурой образцов 297 К и влажностью $1,5\%$. Время

воспламенения увеличивается по следующему порядку: кедр, лиственница, осина, сосна, береза.

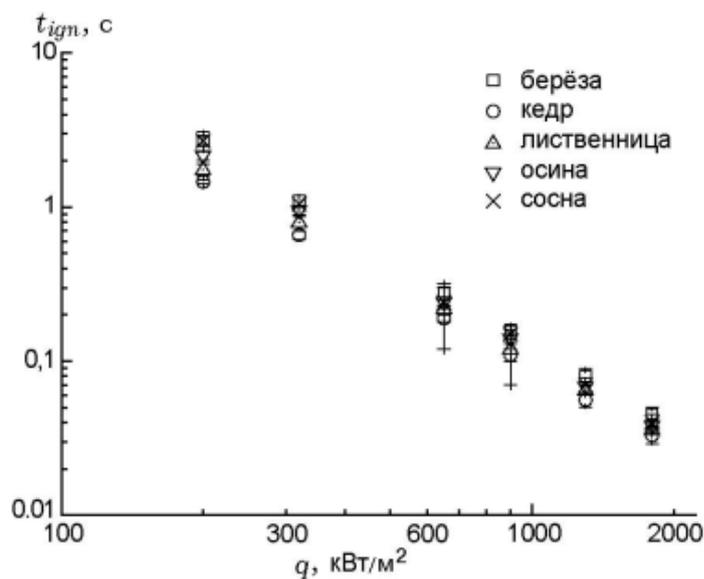


Рисунок 1.6 – Зависимость времени воспламенения от плотности лучистого потока для образцов древесины [36]

При уменьшении плотности 100 кВт/м^2 период воспламенения начинает возрастать и возгорание материала маловероятно.

В 1984 году И.М Абдурагимовым также был исследован закономерность воспламенения и горения материалов под влиянием теплового потока в лабораторных условиях. Для исследования был использован образец древесины бука размером $100 \times 100 \times 30$ и две газовые радиационные панели, с помощью которых создавался тепловой поток. В результате удалось выяснить, что при величине теплового потока равное 13 кВт/м^2 и меньше воспламенение не происходит [37].

Опыты по воспламенению растительного покрова проводятся и за рубежом. Самые непредсказуемые и неконтролируемые пожары, где горят кроны деревьев. Топливо, которое питает эти пожары, в основном зеленая листва и хвоя. Чтобы понять, как горит лесной горючий материал, были проведены эксперименты по зажиганию хвои сосны и пихты. Образцы были собраны в сезон цветения, чтобы воспользоваться естественной изменчивостью влажности и химического состава. Прибор предназначен для измерения времени зажигания при воспламенении горючего материала. Он состоит из

небольшой аэродинамической трубы, инфракрасного нагревателя, провода и воспламенителя. Образец нагревают сверху с помощью инфракрасного нагревателя тепловым потоком от 0 до 50 кВт/м². Как видно из рисунка 1.7, минимальное значение интенсивности теплового потока для воспламенения равна 20 кВт/м² [37].

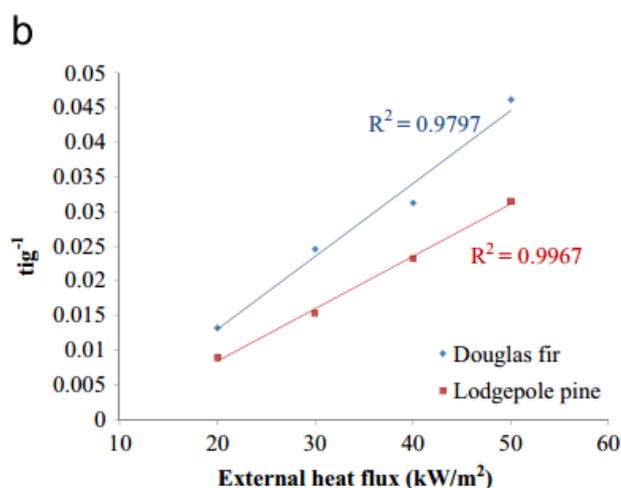


Рисунок 1.7 – Зависимость температуры от теплового потока

В исследовании [38] приведены данные о влиянии теплового потока на воспламенение листвы, которые изучались с использованием специальных устройств. Образцы нагревались сверху с помощью нагревателя, способного производить равномерный тепловой поток от 0 до 50 кВт/м² над поверхностью образца. Лучистого теплового потока в 50 кВт/м² оказалось недостаточно для воспламенения образцов. По результатам исследования для зажигания листовых деревьев необходим тепловой поток не меньше 75 кВт/м², а для хвойных деревьев – 140 кВт/м².

В работе [39], представлены исследования воспламеняемости, разработанные в Эдинбургском университете. Испытания проводились на устройстве, представленный на рисунке 1.8.

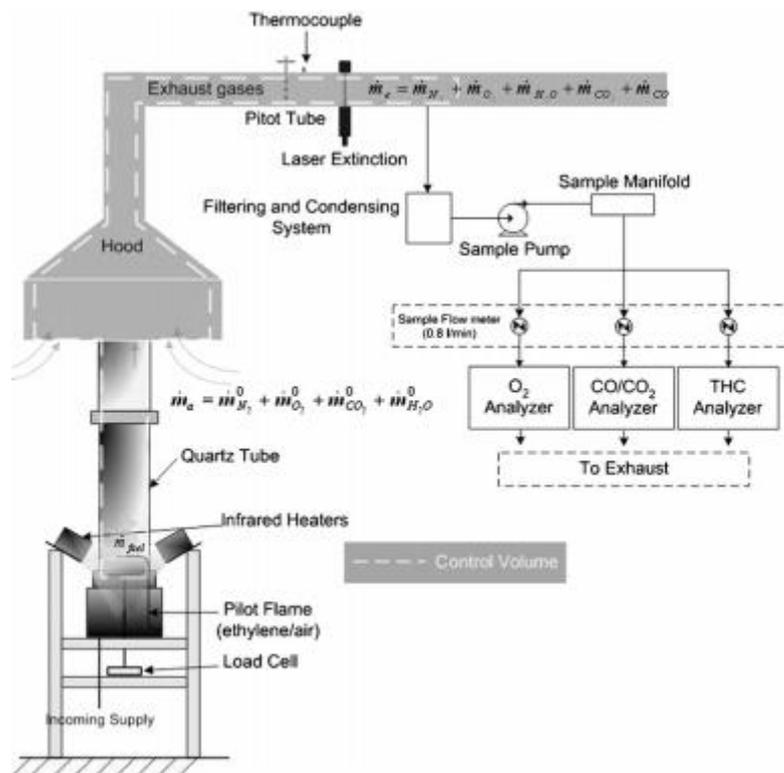


Рисунок 1.8 – Схема устройства

В качестве образца использовались хвоинки сосны, которые зажигались при тепловом потоке равная 20 кВт/м^2 .

Из вышесказанного, мы делаем вывод что, древесина является самым распространенным горючим материалом, поэтому изучению данной тематики посвящены много исследовательских работ.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЖИГАНИЯ ЛЕСНОГО МАССИВА ОТ ОГНЕННОГО ШАРА В ОДНОМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

2.1. Физико-математическая постановка зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода

В результате повреждения газопровода и последующего взрыва с образованием ОШ вследствие воздействия интенсивного потока излучения на полог леса происходит его зажигание. Необходимо определить размеры зон зажигания до лесного массива.

Источником лучистой энергии является ОШ, находящийся на высоте H от земной поверхности (рисунок 2.1). Учитывая его совсем незначительные размеры в сравнении с радиусом Земли, будем считать точечным источником излучения, D – расстояние от центра источника до текущей точки поверхности лесного массива, h – высота лесного массива, 0 – эпицентр, r – радиус зоны зажигания. На верхнюю границу $z=h$ лесного массива действует интенсивный лучистый поток $q_R(r,t)$, который ослабляется по мере удаления от эпицентра 0 . Максимум интенсивности источника достигается при $t=t_m$ далее она затухает до нуля согласно данным о $q_R(r,t)$, которая может быть аппроксимирована следующим образом [40]:

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

$$P_m = 450 \times 10^3 \quad (2)$$

$$t_m = 0.92m^{0.1} \quad (3)$$

$$D = \sqrt{H^2 + r^2} \quad (4)$$

Здесь t_m – время максимума тепловыделения источника излучения, с;

D – расстояние от центра источника излучения до полога леса, м;

t_p – коэффициент пропускания атмосферы;

P_m – максимальная величина светового импульса в момент времени t_m ,

Дж/с;

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

k_0 – аппроксимационный коэффициент ($k_0=0.75$).

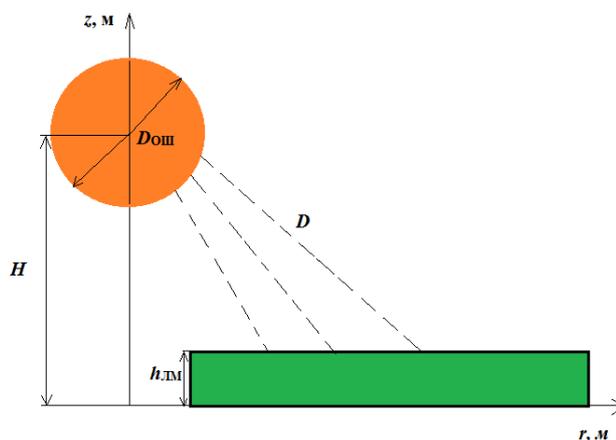


Рисунок 2.1 – Схема процесса зажигания лесного массива

Поступление лучистой энергии в растительный покров ($z_0 \leq z \leq h$) вызывает нагрев ЛГМ, испарение влаги и последующее термическое разложение твердого материала с выделением летучих продуктов пиролиза. Затем оставшиеся продукты пиролиза, взаимодействуя с кислородом, сгорают в атмосфере. Из-за присутствия силы тяжести, нагретые объемы воздуха начинают всплывать вверх, поэтому процессы объемного зажигания лесной растительности оказываются, в общем случае, связаны с гидродинамикой течения. В связи тем, что на периферии от эпицентра взрыва интенсивность лучистого потока в полог леса невелика, то там не происходит зажигания. По этой причине, за время действия источника излучения формируется зона первоначального зажигания лесного массива радиусом r , которая в идеальном случае будет иметь форму круга [40].

Для целей данного исследования будем считать, что лучистый тепловой поток от ОШ, q_R , падающий на полог леса, существенно превосходит перенос энергии в горизонтальном течении. Поэтому, данную задачу возможно рассматривать в квазиодномерном приближении, при этом учитывая изменения основных функций по z (вертикальной координате) для r (различных расстояний) от эпицентра взрыва. Считаем, что влиянием скорости ветра на зажигание ЛГМ можно пренебречь, т.к. энергия в основном переносится благодаря излучению.

В работе будут указаны основные физические допущения и представления об объекте исследования, необходимые для понимания

математической модели. Считается, что горизонтальная составляющая скорости ветра в пологе леса мало влияет на процесс зажигания и ось z направим вверх по пологу леса (рисунок 2.1), течение носит развитый турбулентный характер и молекулярным переносом пренебрегаем по сравнению с турбулентным, плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука, растительный покров считается недеформируемой средой.

Также при решении задачи учитываются физико-химические процессы, протекающие в пологе леса, скорости химических реакций R_i ($i=1, 2, 3, 5$) в функции температуры и иных параметров являются известными. Определяющим механизмом переноса энергии в этом случае считается излучение. В пологе леса поглощает, отражает и переизлучает в основном твердая фаза. Для описания переноса в такой специфической сплошной среде применяется диффузионное приближение. Данное приближение считается оправданным, т.к. протяженность свободного пробега излучения в пологе $l_R \ll l_0$, $l_0 \sim 10-15$ м, $l_R \sim 1$ м (l_0 – характерный масштаб высоты) [40].

С учетом сделанных предположений и законов сохранения для многофазной многокомпонентной реагирующей среды математически задача сводится к решению следующих уравнений [40]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = \dot{m} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w^2) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{w'^2}) - \rho s c_d w^2 - \rho g \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_p T) = \frac{\partial}{\partial z}(-\rho c_p \overline{w'T'}) + k_g(cU_R - 4\sigma T^4) + q_5 R_5 + A_S(T_S - T) \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_\alpha) = \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{w'c'_\alpha}) - R_{5\alpha}, \alpha = 1, 2 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z}\right) - kcU_R + 4k_g \sigma T^4 + 4k_s \sigma T_S^4 = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{\rho i} \varphi_i \frac{\partial T_S}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s(cU_R - 4\sigma T_S^4) + A_S(T - T_S) \quad (10)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_\alpha = 1, p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \dot{m} = (1 - \alpha_c) \dot{R}_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3,$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, R_{52} = v(1 - \alpha_c) R_1 - R_5$$

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_S}\right), R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_S^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_S}\right),$$

$$R_3 = k_3 \rho_3 \varphi_3 s_\alpha c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_S}\right),$$

$$R_5 = M_2 k_5 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \left(\frac{c_2 M}{M_2}\right) T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) \quad (12)$$

Начальные и граничные условия для системы уравнений (5)-(12) имеют следующий вид:

$$t = 0, w = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, T_S = T_e, \varphi_i = \varphi_{ie}; \quad (13)$$

$$z = z_0: \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} = \frac{\varepsilon}{2(2-\varepsilon)} (4\sigma T_S^4 - c U_R); \quad (14)$$

$$z = h: \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2} U_R = 2q_R(r, t). \quad (15)$$

здесь r и z – координаты, z – отсчитывается от напочвенного покрова, а r от оси симметрии; R_1 – R_5 , $R_{5\alpha}$ – массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарение влаги, горение конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образование сажи и пепла, образование α – компонентов газодисперсной фазы; c_{pi} , ρ_i , φ_i – удельные теплоемкости, истинные плотности, 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); T , T_S – температура газовой и твердой фаз; c_α – массовые концентрации ($\alpha=1$ – кислород, 2 – CO, 3 – инертные компоненты газовой фазы); p – давление; U_R – плотность энергии излучения; σ – постоянная Стефана-Больцмана; k – коэффициент ослабления излучения; k_g , k_S – коэф-ты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз; α_V – коэффициент обмена фаз, q_i , E_i , k_i – тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза; s_σ – удельная поверхность элемента ЛГМ; M_α , M_c , M – молекулярный вес компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси; s , c_d – удельная поверхность фитомассы, эмпирический коэффициент полога леса; c – скорость света; w – проекция скорости на ось z ; α_c , v – коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; \dot{m} – массовая скорость образования газодисперсной фазы. Индексы «о» и «е» причисляются к

значениям функций в очаге горения и на значительном расстоянии от места пожара в соответствии. Верхний индекс-штрих «'» относится к пульсационной составляющей данной величины.

Допустим, что полог леса можно моделировать однородной двухтемпературной многофазной пористой реагирующей средой [40]. При описании и решении задачи выделяют температуру конденсированной (твердой) T_s и газовой T фаз. К первой фазе относится сухое органическое вещество, влага, конденсированные продукты пиролиза, а также минеральная часть ЛГМ. В газовой фазе выделим самые необходимые для описания реакции горения компоненты: массовые концентрации c_α ($\alpha=1$ – кислород, 2 – горючие продукты пиролиза ЛГМ, 3 – остальные инертные компоненты, включая пары воды). Твердая фаза представлена главным образом тонкими ветками и хвоей в размере до 6 мм, водой в жидко-капельном состоянии и конденсированными продуктами пиролиза. Поэтому твердая фаза не имеет своей скорости и ее объемной долей, по сравнению с газовой фазой, можно не учитывать в соответствующих уравнениях, т.к. в единице объема растительного покрова находится меньше 0.5 кг [44]. С точки зрения гидродинамики, данная пористая среда, оказывает сопротивление каждому перемещению воздушных масс с силой [40]:

$$\bar{F} = \rho s c_d |\bar{v}| \bar{v} \quad (16)$$

Считается, что среда находится в локально-термодинамическом равновесии. Для замыкания системы уравнений использовалось равновесное приближение k_ε модель турбулентности [40].

Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют ЛГМ полога соснового леса и выбирались согласно [41]: $E_1/R = 9400$ К, $k_1 = 3.36 \cdot 10^4$ 1/с, $q_1 = 0$, $E_2/R = 6000$ К, $q_2 = 3 \cdot 10^6$ Дж/кг, $k_2 = 6 \cdot 10^5$ 1/с, $E_3/R = 10^4$ К, $k_3 = 10^3$ 1/с, $q_3 = 1.2 \cdot 10^7$ Дж/кг, $E_5/R = 11500$ К, $k_5 = 3 \cdot 10^{13}$ 1/с, $q_2 = 10^7$ Дж/кг, $c_{p1} - c_{p5} = 2000, 4180, 900, 10^3$ и 10^3 Дж/(кг·К) соответственно, $S_\sigma = 10^3$ 1/м, $Sc_d = 0.01$, $h = 10$ м, $\alpha_c = 0.06$, $\rho_4 \varphi_4 = 0.08$, $\rho_1 = 500$ кг/м³, $\rho_2 = 10^3$ кг/м³, $\rho_3 = 200$ кг/м³, $\rho_{5H} = 1.16$ кг/м³,

$p_e = 10^5 \text{ Н/м}^2$, $\mu_1 = 1 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$, $T_H = 300 \text{ К}$, $c_{1H} = 0.23$, $c_{2H} = 0$, $\varphi_{3H} = 0$, $\varkappa = 0.0375 \text{ 1/м}$.

2.2. Результаты численного решения

На основе описанной физико-математической модели были проведены численные расчеты, результатом которых стало: определение максимального радиуса зажигания полога леса при воздействии теплового излучения на его поверхность при взрыве газопровода с образованием ОШ и получение данных о протекании термических и физико-химических процессов на верхней границе полога леса в начальный момент зажигания. Также стоит отметить, что решение осуществлялось с учетом текущего состояния и характеристик ЛГМ.

При постановке численных экспериментов необходимо было учесть структурные и физические характеристики ЛГМ. Для определения структурных и физических характеристик ЛГМ необходимо иметь представление об особенностях фитогеометрии растительного покрова. В качестве основной характеристики для оценки оптической плотности леса используется общая относительная поверхность фитомассы ω , которая включает в себя относительную площадь листьев ω_1 и поверхность нелистовой скелетной части дерева ω_2 [50].

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 \quad (17)$$

В зарубежной литературе ω часто обозначается как *leaf area index (LAI)*. Общая поверхность элементов растительности в вертикальном столбе растительности высотой z с единичной площадью основания *leaf area index (LAI)* равна [50]:

$$\omega = LAI = \int_0^{\bar{z}} (s_1 + s_2) d\bar{z} \quad (18)$$

где $s_1 = \frac{d\omega_1}{d\bar{z}}$ и $s_2 = \frac{d\omega_2}{d\bar{z}}$ – удельные поверхности фитомассы в единичном слое для зеленой массы ω_1 и скелетной части ω_2 (таблица 2.1), \bar{z} – безразмерная вертикальная координата. Величина $\omega = LAI$ представляет собой общую поглощающую поверхность в вертикальном столбе растительности, которое имеет большое значение для математического описания распространения и поглощения излучения в этом слое растительности [42].

Для любого элементарного слоя растительности имеем [41]:

$$\frac{d\omega}{dz} = \Sigma = s_1 + s_2 \quad (19)$$

Таблица 2.1 – Распределение удельной поверхности зеленой массы (s_1) и скелетной части (s_2) для сосны в возрасте 15-20 лет [42]

\bar{z}	Сосна	
	s_1	s_2
0,05	0,30	0,00
0,10	0,70	0,01
0,20	1,00	0,04
0,30	1,30	0,07
0,40	1,30	0,10
0,50	0,90	0,11
0,60	0,30	0,11
0,70	0,15	0,11
0,80	0,00	0,10
0,90	0,00	0,08
Σ	6,05	0,73
LAI	–	6,78
\bar{H} , м	6,5	–
\bar{h}_n , м	2,5	–

Лес, находящийся в стадии дифференциации ярусов, состоит из главного яруса, подлеска и подроста (рисунок 2.2), где H – высота полога леса взрослого древостоя, h – высота полога подроста.

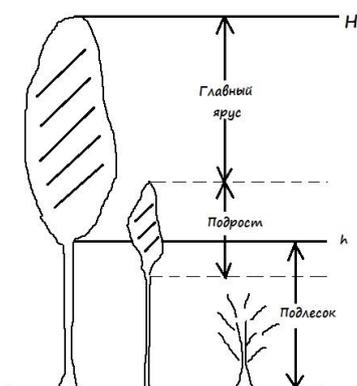


Рисунок 2.2 – Ярусы леса [42]

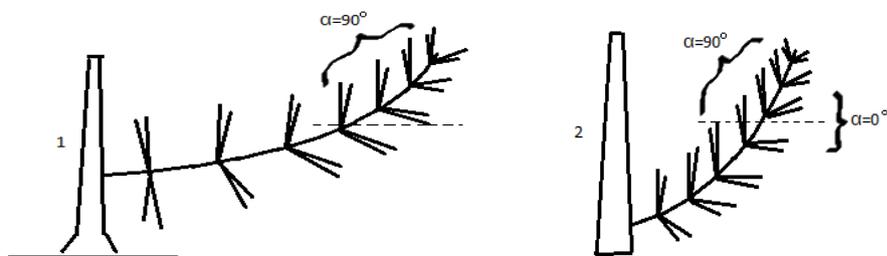


Рисунок 2.3 – Схема распределения углов наклона хвоинок для посадок сосны в нижней (1) и верхней (2) частях дерева [42]

В рамках численного решения для нахождения коэффициента ослабления пологом леса соснового древостоя использовалась его зависимость от общей поглощающей поверхности в вертикальном столбе растительности ω ($s_1 + s_2$) с учетом угла наклона хвоинок (рисунок 2.4). В нашем случае для соснового леса характерно возрастание угла наклона хвоинки по отношению к горизонтальной плоскости по мере продвижения вверх по стволу от 20–30 до 80–90°, по мере приближения к стволу хвоинки приобретают угол наклона, близкий к 90°, независимо от плоскости их расположения (рисунок 2.3) [42].

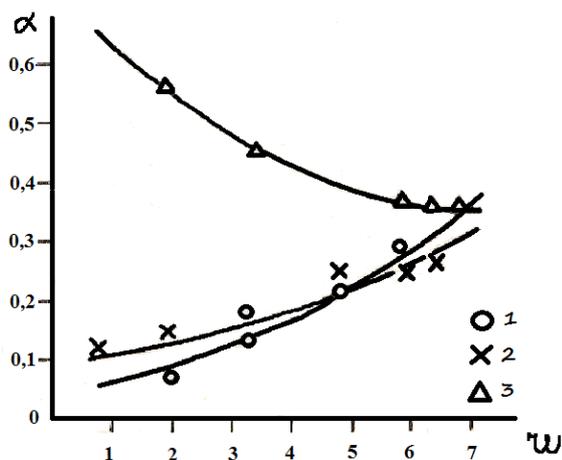


Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента ослабления α от ω для сосновой посадки (градусы: >45 (1), 30–45 (2), 20–30 (3))[41]

В результате численного решения задачи с учетом коэффициента ослабления пологом леса при различных углах наклона хвоинок, представленные в таблице 2.2, были найдены радиусы зажигания растительности для исходной массой углеводородного топлива 254 т и влагосодержания ЛГМ $w = 0.3$ с разной общей поверхностью поглощения в вертикальном столбе растительности и разным запасом ЛГМ.

Таблица 2.2 – Зависимость коэффициента ослабления от угла наклона хвоинок при различных \bar{z}

Коэффициент ослабления	Угол наклона хвоинок α
$\bar{z} = 0.7$	
0.295	30–45°
0.325	>45°
0.385	20–30°
$\bar{z} = 0.6$	
0.275	30–45°
0.3	>45°
0.380	20–30°
$\bar{z} = 0.5$	
0.225	30–45°
0.375	>45°
0.385	20–30°

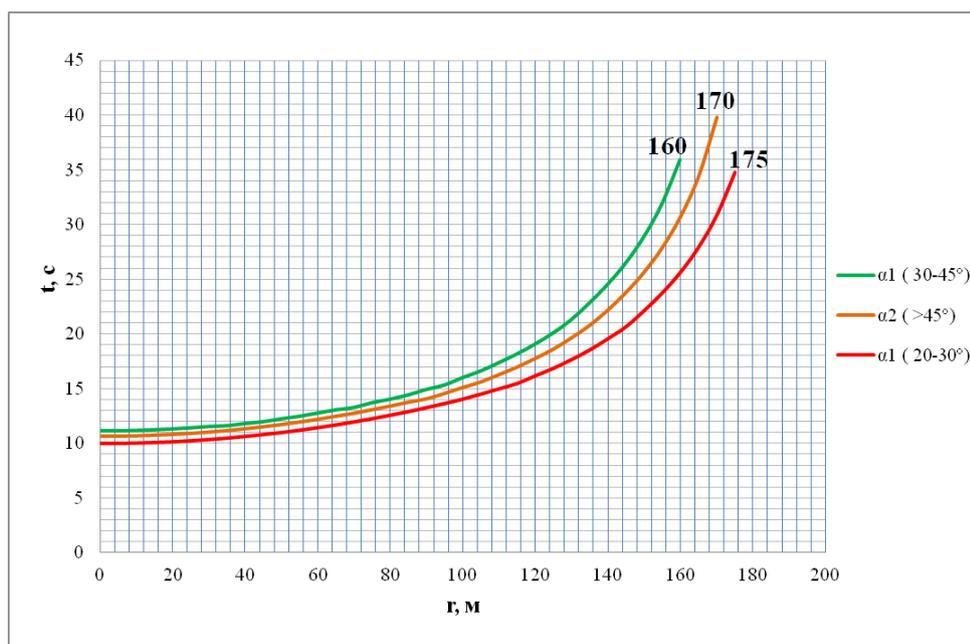


Рисунок 2.5 – Зависимость радиуса зажигания растительности от коэффициента ослабления пологом леса при $\bar{z}=0.7$

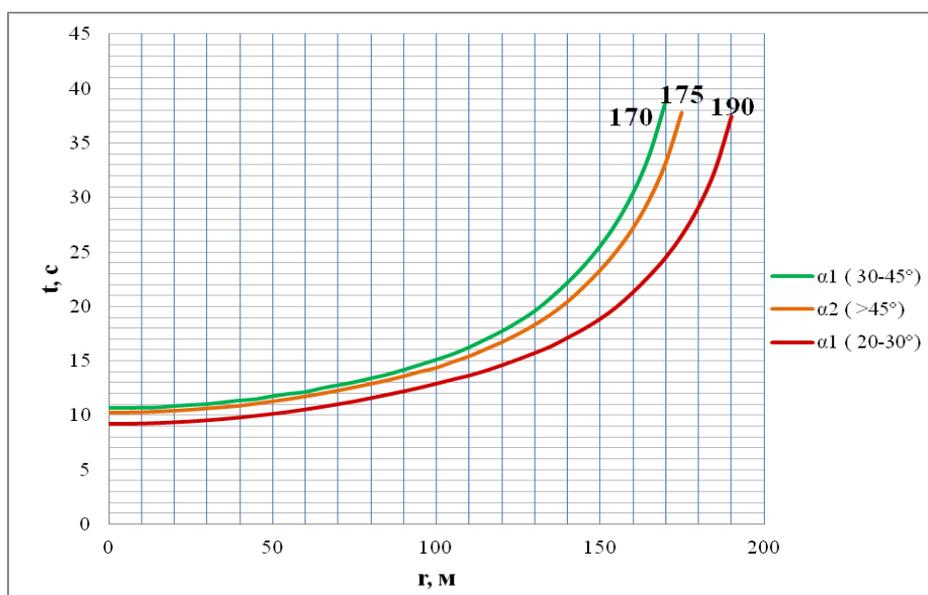


Рисунок 2.6 – Зависимость радиуса зажигания растительности от коэффициента ослабления пологом леса при $\bar{z}=0.6$

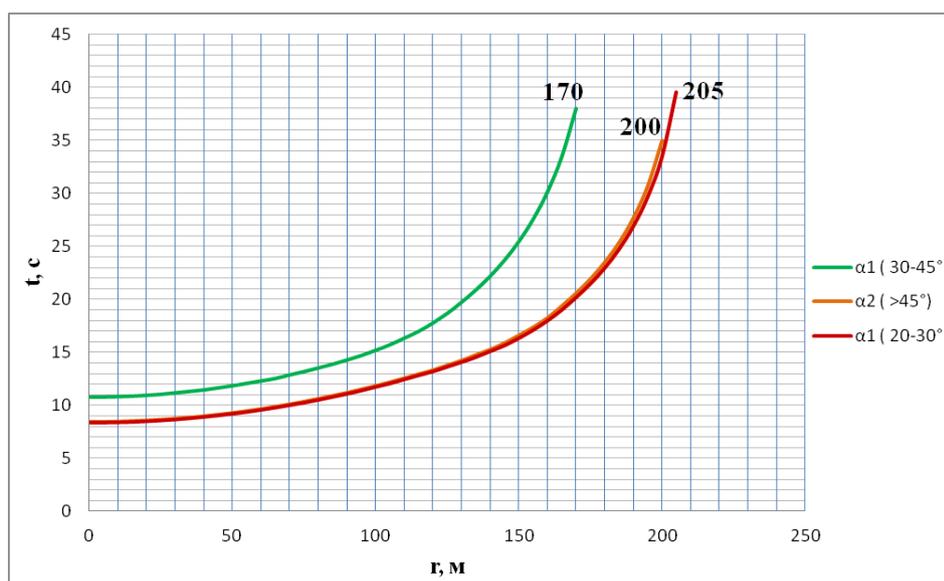


Рисунок 2.7 – Зависимость радиуса зажигания полога леса от коэффициента ослабления пологом леса при $\bar{z}=0.5$

При значении запаса ЛГМ $z=0.3$ кг/м³ и средней высоты древостоя $\bar{z}=0.7$ наибольшее значение радиуса зажигания $r^*=175$ м получили при коэффициенте ослабления пологом леса 0.375 (рисунок 2.5), при $z=0.3$ кг/м³ и $\bar{z}=0.6$ радиус зажигания составляет $r^*=190$ м при коэффициенте ослабления пологом леса 0.380 (рисунок 2.6), а при $z=0.2$ кг/м³ и $\bar{z}=0.5$ наибольшее значение радиуса зажигания составляет $r^*=205$ м при коэффициенте ослабления пологом леса 0.385 (рисунок 2.7) при углах наклона игл 20–30°.

Зажигание ЛГМ представляет собой многостадийный процесс, на первоначальной стадии которого происходит прогрев газовой и твердой фаз и испарение влаги из ЛГМ, после этого начинается процесс разложения ЛГМ на конденсированные и летучие продукты пиролиза. Летучие продукты пиролиза, в свою очередь, воспламеняются на верхней границе полога леса. Получение распределения термических и физико-химических параметров на первоначальном этапе зажигания позволяет сделать прогноз дальнейшего развития процесса.

Следующим этапом по результатам численного расчета было получение распределения температур для газовой и твердой фаз, концентраций кислорода и продуктов горения, объемных долей сухого органического вещества, воды в жидко-капельном состоянии и коксика (рисунки 2.8–2.10).

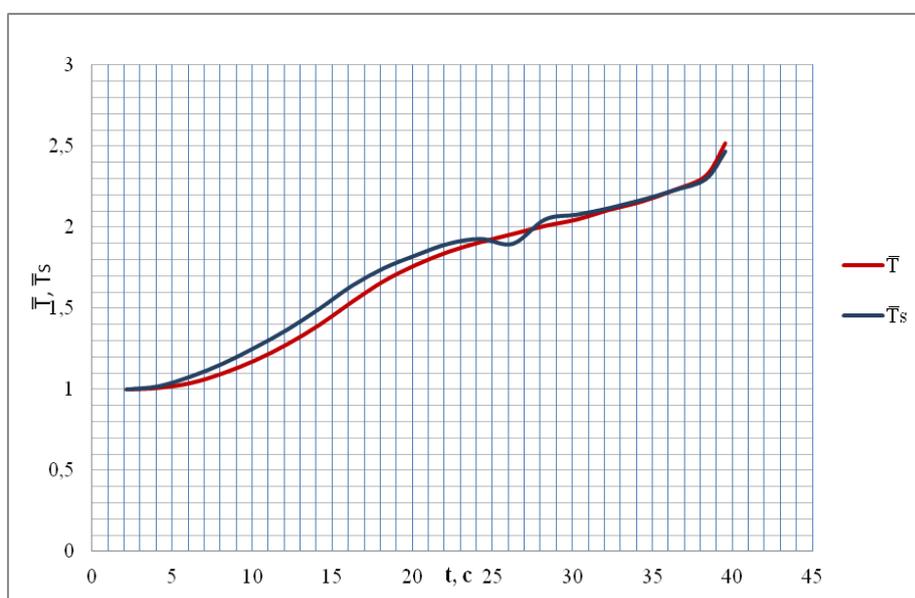


Рисунок 2.8 – Распределение температур \bar{T} , \bar{T}_s на верхней границе полога леса до момента зажигания: $\bar{T} = T/T_e$ – газовой фазы, $\bar{T}_s = T_s/T_e$ – твердой фазы, $T_e=300$ К

Неразрывно с процессом зажигания связано распределение концентраций продуктов пиролиза оксида углерода и кислорода, который расходуется в процессе горения, и распределение объемных долей сухого органического вещества, воды в жидко-капельном состоянии и коксика, представленные на рисунках 2.9 и 2.10.

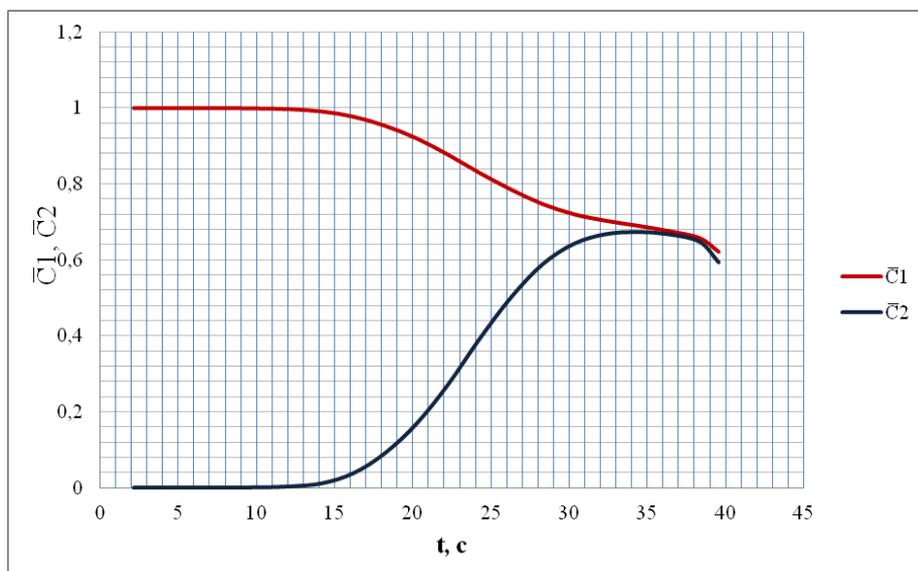


Рисунок 2.9 – Распределение концентраций кислорода (\bar{C}_1) и продуктов пиролиза оксида углерода (\bar{C}_2) в верхней границе полога леса до момента зажигания

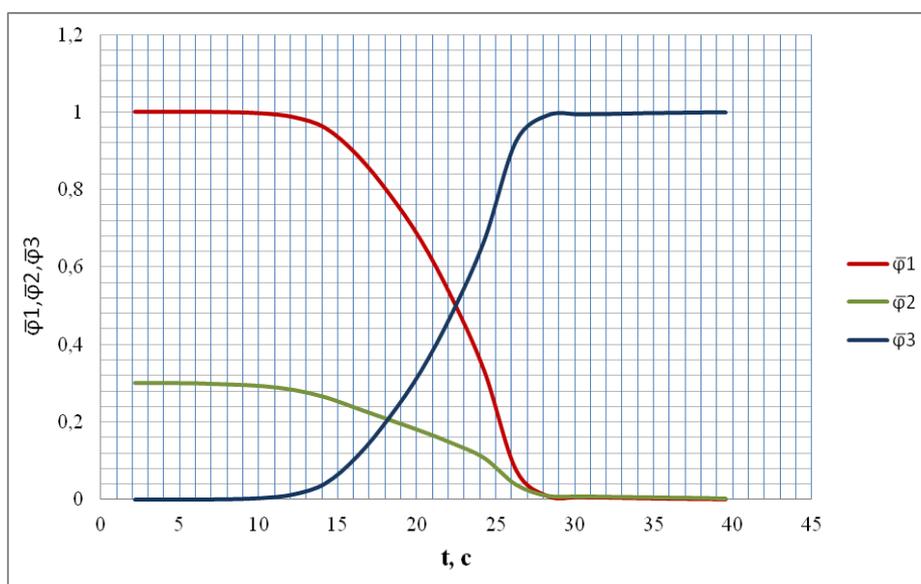


Рисунок 2.10 – Распределение объемных долей $\bar{\varphi}_1$, $\bar{\varphi}_2$, $\bar{\varphi}_3$ на верхней границе полога леса до момента: $\bar{\varphi}_1 = \varphi_1/\varphi_{1,e}$ – сухого органического вещества,

$$\bar{\varphi}_2 = \rho_2\varphi_2/\rho_e - \text{воды в жидко-капельном состоянии,}$$

$$\bar{\varphi}_3 = \rho_3\varphi_3/\alpha_c\rho_1\varphi_{1,e} - \text{коксика, } \varphi_{1,e} = 0, \rho_e = 1.2 \text{ кг/м}^3$$

Следующие расчеты проводились для изучения влияния влагосодержания ЛГМ на радиус зажигания полога леса с исходной массой углеводородного топлива 254 т и запасом ЛГМ $z = 0.2 \text{ кг/м}^3$.

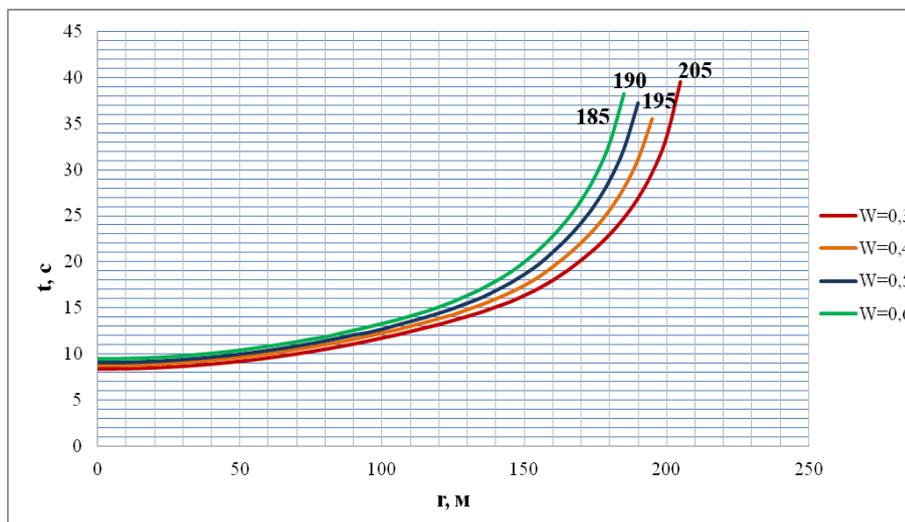


Рисунок 2.11 – График зависимости радиуса зажигания от влагосодержания ЛГМ

Радиус зажигания полога леса при влагосодержании ЛГМ $w=0.3$ составляет $r^*=205$ м, а для $w=0.6$ составляет $r^*=185$ м, при том, что все остальные определяющие параметры среды и ЛГМ остаются неизменными (рисунок 2.11).

На рисунке 2.12 представлены результаты расчетов для различных масс горючего вещества и влагосодержания ЛГМ. Из рисунка видно, что с увеличением массы топлива и уменьшением влагосодержания ЛГМ радиус зажигания увеличивается.

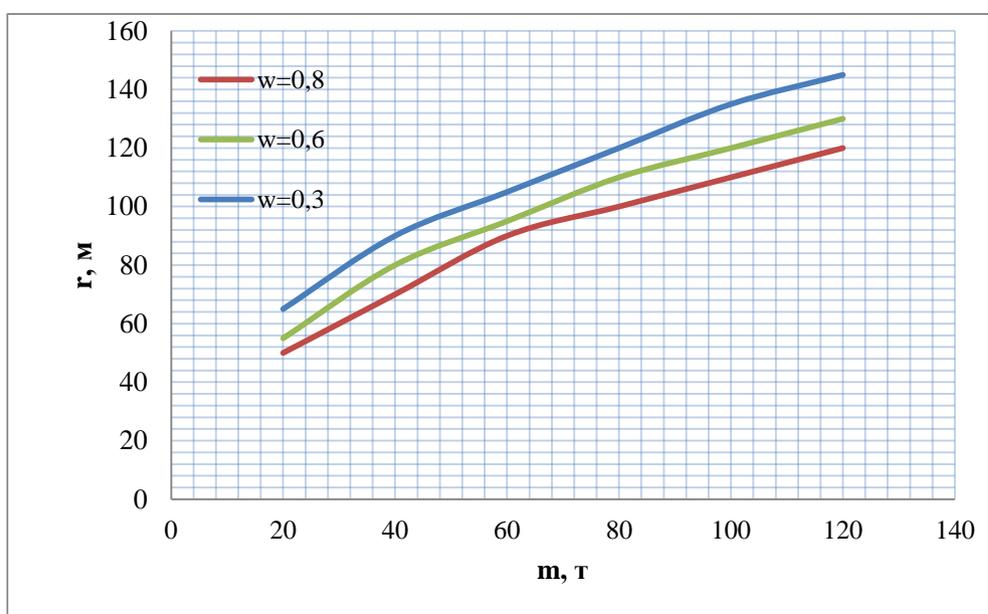


Рисунок 2.12 – Зависимость радиуса зажигания растительности от массы топлива

2.3. Оценка и анализ полученных данных

Как показывают рисунки 2.5–2.7, на величину радиуса зажигания растительного покрова r^* влияют угол наклона сосновых игл, а также общая поглощающая поверхность в вертикальном столбе растительности, которые выражаются через коэффициент ослабления пологом леса. При уменьшении угла наклона хвоинок и общей поглощающей поверхности в вертикальном столбе растительности радиус зажигания растительности увеличивается. Также были получены распределения температур концентраций, объемных долей, значения которых дают материал для более глубокого понимания протекающих термических и физико-химических процессов на первоначальном этапе зажигания полога леса в результате воздействия на него интенсивности теплового излучения. Помимо этого, из рисунка 2.12 видно, что по мере уменьшения влагосодержания ЛГМ и увеличения массы топлива радиус зажигания полога леса увеличивается. Полученные расчеты также показывают влияние текущего состояния ЛГМ, выраженного через влагосодержание, на радиус зажигания полога леса.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЖИГАНИЯ ЛЕСНОГО МАССИВА ОТ ОГНЕННОГО ШАРА В ОСЕССИММЕТРИЧНОЙ ДВУМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

3.1. Физико-математическая постановка зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода в двумерной постановке

В результате повреждения газопровода и последующего взрыва с образованием «огненного шара» вследствие воздействия интенсивного потока излучения на полог леса происходит его зажигание. Необходимо определить размеры зон зажигания до лесного массива.

Источником лучистой энергии является ОШ, находящийся на высоте H от земной поверхности (рисунок 3.1). Учитывая его совсем незначительные размеры в сравнении с радиусом Земли, будем считать точечным источником излучения, D – расстояние от центра источника до текущей точки поверхности лесного массива, h – высота лесного массива, O – эпицентр, r – радиус зоны зажигания. На верхнюю границу $z = h$ лесного массива действует интенсивный лучистый поток $q_R(r, t)$, который ослабляется по мере удаления от эпицентра O . Максимум интенсивности источника достигается при $t = t_m$ далее она затухает до нуля согласно данным о $q_R(r, t)$, которая может быть аппроксимирована следующим образом [40]:

$$q_R(r, t) = \frac{t_p P_m \sin L}{4\pi D^2} \begin{cases} t/t_m, t < t_m \\ \exp(-k_0(t/t_m - 1)), t \geq t_m \end{cases} \quad (20)$$

$$t_m = 0.92m^{0.1} \quad (21)$$

$$P_m = 450 \times 10^3 \quad (22)$$

$$D = \sqrt{H^2 + r^2} \quad (23)$$

Здесь t_m – время максимума тепловыделения источника излучения, с;

D – расстояние от центра источника излучения до полога леса, м;

t_p – коэффициент пропускания атмосферы;

P_m – максимальная величина светового импульса в момент времени t_m ,

Дж/с;

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

k_0 – аппроксимационный коэффициент ($k_0=0.75$).

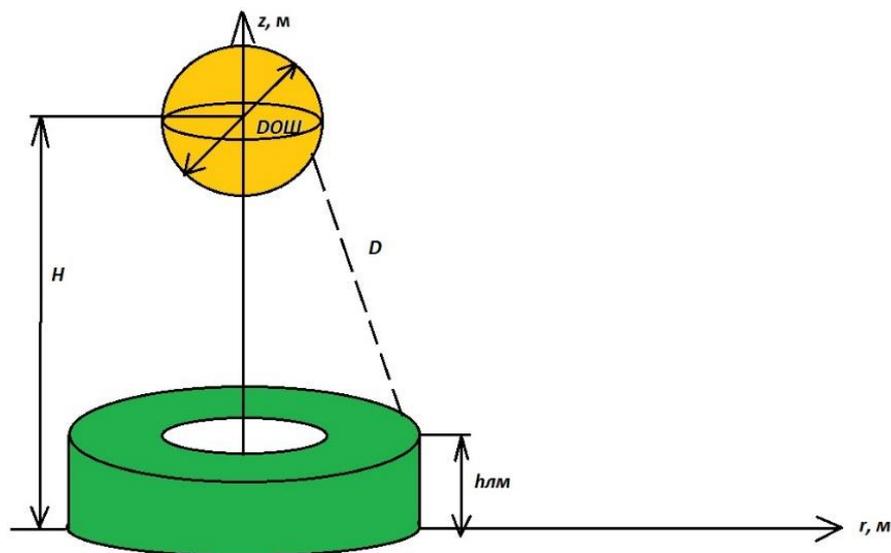


Рисунок 3.1 – Схема процесса зажигания лесного массива

Поступление лучистой энергии в растительный покров ($z_0 \leq z \leq h$) вызывает нагрев ЛГМ, испарение влаги и последующее термическое разложение твердого материала с выделением летучих продуктов пиролиза. Затем оставшиеся продукты пиролиза, взаимодействуя с кислородом, сгорают в атмосфере. Из-за присутствия силы тяжести, нагретые объемы воздуха начинают всплывать вверх, поэтому процессы объемного зажигания лесной растительности оказываются, в общем случае, связаны с гидродинамикой течения. В связи тем, что на периферии от эпицентра взрыва интенсивность лучистого потока в полог леса невелика, то там не происходит зажигания. По этой причине, за время действия источника излучения формируется зона первоначального зажигания лесного массива радиусом r , которая в идеальном случае будет иметь форму круга. Последующее формирование источника излучения определяется взаимодействием восходящих потоков полей ветра, т.к. является составляющей частью поверхностного слоя атмосферы и распространяют по окружающей местности горящие твердые элементы, а также формируют метеорологические и географические условия в данной местности.

Для целей данного исследования предполагаем, что скорость ветра в атмосфере относительно невелика, а энергия в основном передается излучением. Это позволяет рассматривать задачу в осесимметричной постановке. Т.к. сочетание различных физических факторов сопровождается

процесс зажигания леса, то целесообразно проводить описание на разных уровнях сложности. В работе будут указаны основные физические допущения и представления об объекте исследования, необходимые для понимания математической модели. Считается, что горизонтальная составляющая скорости ветра в пологе леса мало влияет на процесс зажигания и ось z направим вверх по пологу леса (рисунок 3.1), течение носит развитый турбулентный характер и молекулярным переносом пренебрегаем по сравнению с турбулентным, плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука, растительный покров считается недеформируемой средой.

Допустим, что полог леса можно моделировать однородной двухтемпературной многофазной пористой реагирующей средой [40]. При описании и решении задачи выделяют температуру конденсированной (твердой) T_s и газовой T фаз. К первой фазе относится сухое органическое вещество, влага, конденсированные продукты пиролиза, а также минеральная часть ЛГМ. В газовой фазе выделим самые необходимые для описания реакции горения компоненты: массовые концентрации c_α ($\alpha=1$ – кислород, 2 – горючие продукты пиролиза ЛГМ, 3 – остальные инертные компоненты, включая пары воды). Твердая фаза представлена главным образом тонкими ветками и хвоей в размере до 6 мм, водой в жидко-капельном состоянии и конденсированными продуктами пиролиза. Поэтому твердая фаза не имеет своей скорости и ее объемной долей, по сравнению с газовой фазой, можно не учитывать в соответствующих уравнениях, т.к. в единице объема растительного покрова находится меньше 0.5 кг [40]. С точки зрения гидродинамики, данная пористая среда, оказывает сопротивление каждому перемещению воздушных масс с силой [40]:

$$\bar{F} = \rho s c_d |\bar{v}| \bar{v} \quad (24)$$

Считается, что среда находится в локально-термодинамическом равновесии. Для замыкания системы уравнений использовалось равновесное приближение k_ε модель турбулентности.

Также при решении задачи учитываются физико-химические процессы, протекающие в пологе леса, скорости химических реакций R_i ($i=1, 2, 3, 5$) в функции температуры и иных параметров являются известными. Определяющим механизмом переноса энергии в этом случае считается излучение. В пологе леса поглощает, отражает и переизлучает в основном твердая фаза. Для описания переноса в такой специфической сплошной среде применяется диффузионное приближение. Данное приближение считается оправданным, т.к. протяженность свободного пробега излучения в пологе $l_R \ll l_0$, $l_0 \sim 10-15$ м, $l_R \sim 1$ м (l_0 – характерный масштаб высоты).

Направим ось z вертикально вверх вдоль оси r земной поверхности (рисунок 3.1). Для описания переноса тепла и массы в количестве лесной растительности с общими законами сохранения используются для многофазной среды. Так как любое движение воздушных потоков в атмосфере является турбулентным, а затем, чтобы описать их с помощью уравнения Рейнольдса. Задача сформулирована в системе цилиндрических координат и сводится к решению следующих уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = \dot{m} \quad (25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v w) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r \rho \overline{v'^2}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{v'w'}) - \rho s c_d v \sqrt{v^2 + w^2} \quad (26)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v w) \frac{\partial}{\partial z} (\rho w^2) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r \rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'^2}) - \rho s c_d w \sqrt{v^2 + w^2} - \rho g \quad (27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w c_p T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r \rho v c_p \overline{v'T'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho c_p \overline{w'T'}) + k_g (c U_R - 4\sigma T^4) + q_5 R_5 + \alpha_v (T_s - T) \quad (28)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_\alpha) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w c_\alpha) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r \rho \overline{v'c'_\alpha}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'c'_\alpha}) - R_{5\alpha}, \alpha = 1, 2 \quad (29)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} \right) - k c U_R + 4k_g \sigma T^4 + 4k_s \sigma T_s^4 = 0 \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{\rho i} \varphi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (c U_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s) \quad (31)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0 \quad (32)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_\alpha = 1, p_e = \rho R T \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \dot{m} = (1 - \alpha_c) \dot{R}_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3,$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, R_{52} = v(1 - \alpha_c) R_1 - R_5$$

$$R_{52} = v(1 - \alpha_c) R_1 - R_5$$

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_S}\right), R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_S^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_S}\right),$$

$$R_3 = k_3 \rho_3 \varphi_3 s_\alpha c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_S}\right),$$

$$R_5 = M_2 k_5 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \left(\frac{c_2 M}{M_2}\right) T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) \quad (33)$$

Начальные и граничные условия для системы уравнений (25)-(33) имеют следующий вид:

$$t = 0: v = 0, w = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, T_s = T_e, \varphi_i = \varphi_{ie}; \quad (34)$$

$$r = 0: v = 0, \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} = 0, \frac{\partial U_R}{\partial r} = 0; \quad (35)$$

$$r=r_e: \frac{\partial v}{\partial r} = 0, \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial r} + \frac{c}{2} U_R = 0; \quad (36)$$

$$z = z_0: \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2} U_R = 0; \quad (37)$$

$$z = h: \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2} U_R = 2q_R(r, t). \quad (38)$$

здесь v, w – проекции скоростей на оси r и z , z – отсчитывается от напочвенного покрова, а r от оси симметрии; α_v – коэффициент фазового обмена; ρ – плотность газа – дисперсная фаза; t – время; w_i – компонента скорости; U_R – плотность энергии излучения; P – давление; c_p – постоянное давление удельной теплоемкости газовой фазы; $R_1-R_5, R_{5\alpha}$ – массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарение влаги, горение конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образование сажи и пепла, образование α – компонентов газодисперсной фазы; $c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$ – удельные теплоемкости, истинные плотности, 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); T, T_s – температура газовой и твердой фаз; c_α – массовые концентрации ($\alpha=1$ – кислород, 2 – CO, 3 – инертные компоненты газовой фазы); p – давление; σ – постоянная Стефана-Больцмана; k – коэффициент ослабления излучения; k_g, k_s – коэф-ты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз; q_i, E_i, k_i – тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза; s_σ – удельная

поверхность элемента ЛГМ; M_a , M_c , M – молекулярный вес компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси; s , c_d – удельная поверхность фитомассы, эмпирический коэффициент полога леса; c – скорость света; α_c , ν – коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; \dot{m} – массовая скорость образования газодисперсной фазы. Индексы «о» и «е» причисляются к значениям функций в очаге горения и на значительном расстоянии от места пожара в соответствии. Верхний индекс-штрих «'» относится к пульсационной составляющей данной величины.

Для определения исходных данных, которые характеризуют приток (отток) массы в единице объема газодисперсной фазы, были использованы следующие формулы для расчета массовой скорости образования газодисперсной фазы \dot{m} , изменения кислорода R_{51} , изменения окиси углерода R_{52} . Скорости реакций (пиролиз, испарение, сжигание кокса и летучих горючих продуктов пиролиза) аппроксимируются законом Аррениуса. Начальные значения объемных долей определяются по следующим формулам:

$$\varphi_{1e} = \frac{d(1-\nu_z)}{\rho_1}, \varphi_{2e} = \frac{Wd}{\rho_2}, \varphi_{3e} = 0$$

где d – плотность поверхностного слоя, ν_z – коэффициент зольности лесного топлива, W – влагосодержание лесного горючего материала. Это предполагает, что оптические свойства среды не зависят от длины волны излучения и для математического описания переноса излучения при лесных пожарах использовалась диффузионная аппроксимация плотности потока излучения.

3.2. Результаты численного решения

На основе описанной физико-математической модели были проведены численные расчеты, результатом которых стало: определение максимального радиуса зажигания полога леса при воздействии теплового излучения на его поверхность при взрыве газопровода с образованием ОШ в двумерной постановке. Также стоит отметить, что решение осуществлялось с учетом текущего состояния и характеристик ЛГМ.

Предложенная модель дает детальную картину изменения скорости, температуры и концентраций со временем во всех областях, а также влияние

различных условий на распространение лесного пожара в кроне. Распределение изотерм газовой фазы (рисунки 3.2-3.5): 1–4 соответствуют изотермам $\bar{T}= 1.5, 2., 2.6, 3..$

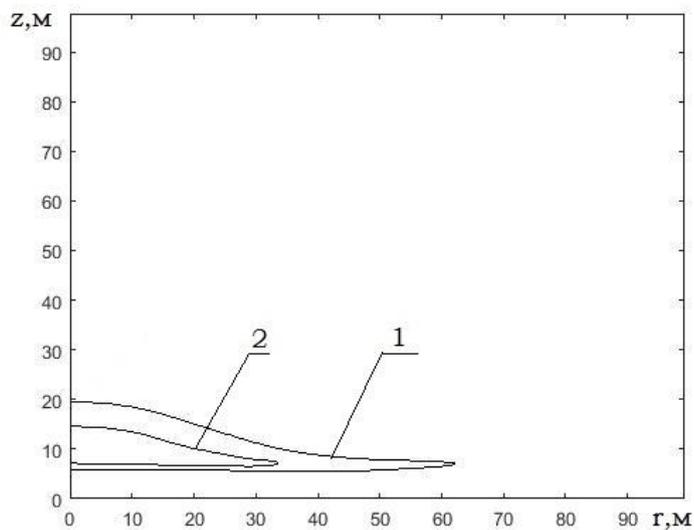


Рисунок 3.2 – Распределение температур газовой фазы при $w=0,666$ и $m=20\ 000$ кг: 1 – $\bar{T}=1.5$, 2 – $\bar{T}=2..$

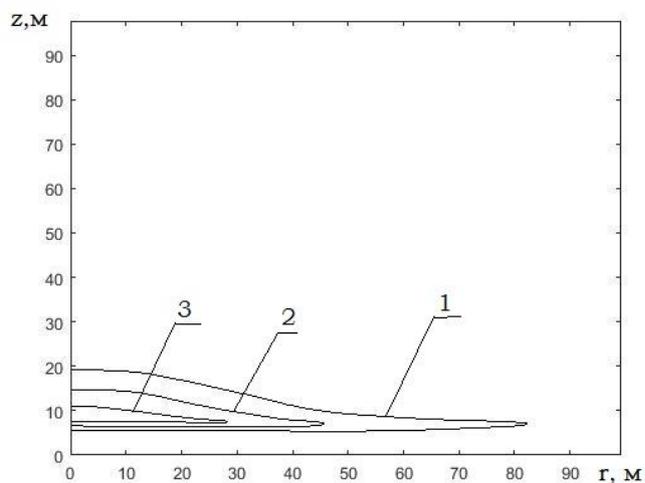


Рисунок 3.3 – Распределение температур газовой фаз при $w=0,666$ и $m=40\ 000$ кг: 1 – $\bar{T}=1.5$, 2 – $\bar{T}=2..$, 3 – $\bar{T}=2.6$.

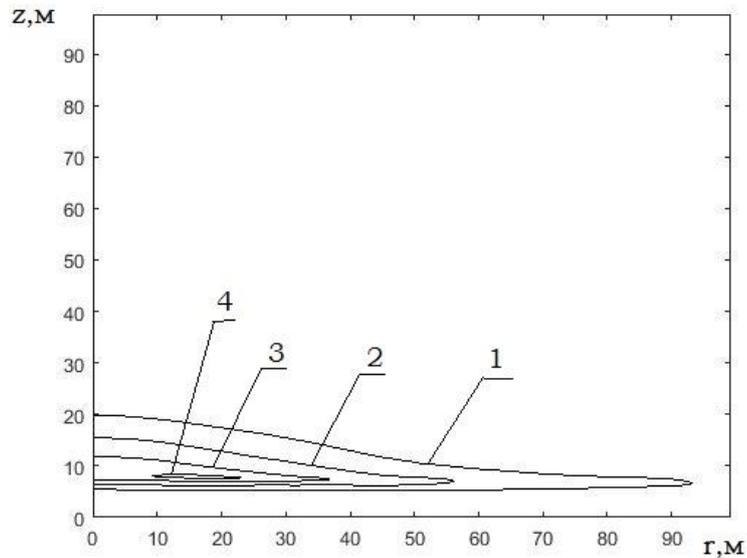


Рисунок 3.4 – Распределение температур газовой фазы при $w=0.666$ и $m=60\ 000$ кг: 1 – $\bar{T}=1.5$, 2 – $\bar{T}=2.$, 3 – $\bar{T}=2.6$, 4 – $\bar{T}=3$.

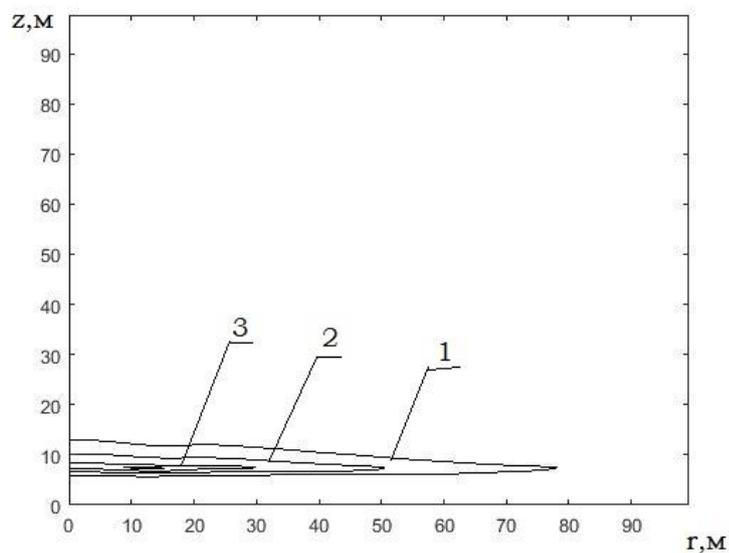


Рисунок 3.5 – Распределение температур газовой фазы при $w=0.8$ и $m=60\ 000$ кг: 1 – $\bar{T}=1.5$, 2 – $\bar{T}=2.$, 3 – $\bar{T}=2.6$.

При значении запаса ЛГМ $z=0.3$ кг/м³ наибольшее значение радиуса зажигания $r^*=95$ м получили при влагосодержании ЛГМ $w=0.666$ и массе топлива $m=60\ 000$ кг (рисунок 3.4), при $m=20\ 000$ кг максимальный радиус зажигания составил $r^*=62$ м (рисунок 3.2), при $m=40\ 000$ кг равен $r^*=82$ м (рисунок 3.3). Также был сделан расчет при $w=0,8$ и $m=60$ т, где радиус зажигания составил $r^*=80$ м (рисунок 3.5).

А также были построены поля скоростей для данных распределений температур (рисунок 3.6).

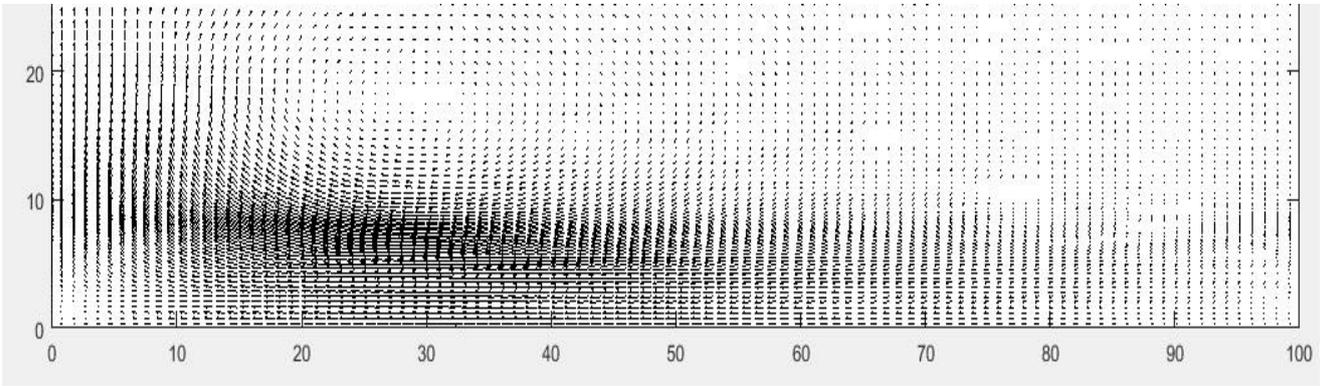


Рисунок 3.6 – Поле скорости температуры при массе 20 000 кг

Следующим этапом по результатам численного расчета были получены распределения массовой концентрации продуктов пиролиза (рисунки 3.7-3.10).

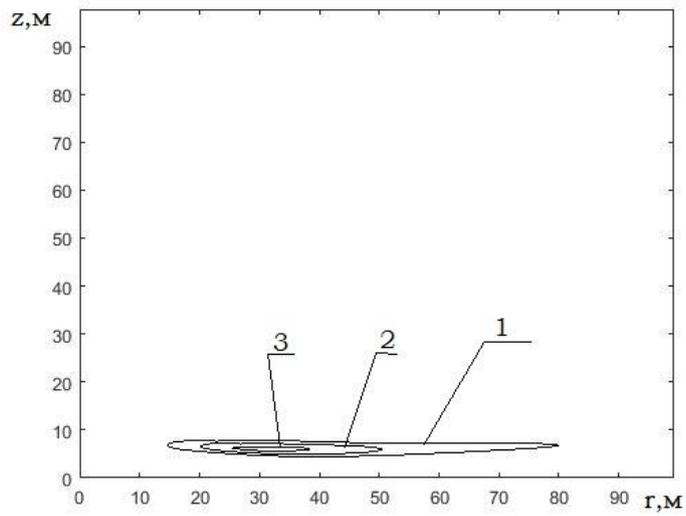


Рисунок 3.7 – Распределение \bar{c}_2 при $w=0,666$ и $m=20\,000$ кг: 1 – $\bar{c}_2=0.05$,
2 – $\bar{c}_2=0.07$, 3 – $\bar{c}_2=0.1$

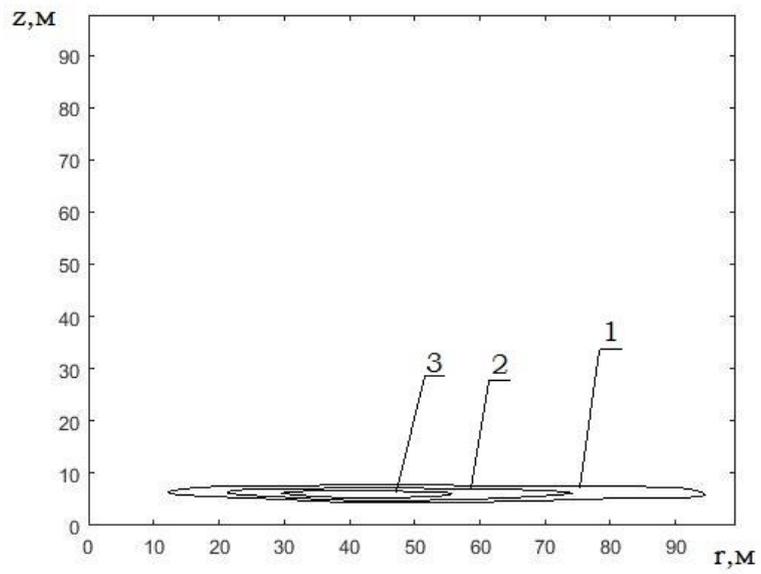


Рисунок 3.8 – Распределение \bar{c}_2 при $w=0,666$ и $m=40\ 000$ кг: 1 – $\bar{c}_2=0.05$,
2 – $\bar{c}_2=0.07$, 3 – $\bar{c}_2=0.1$

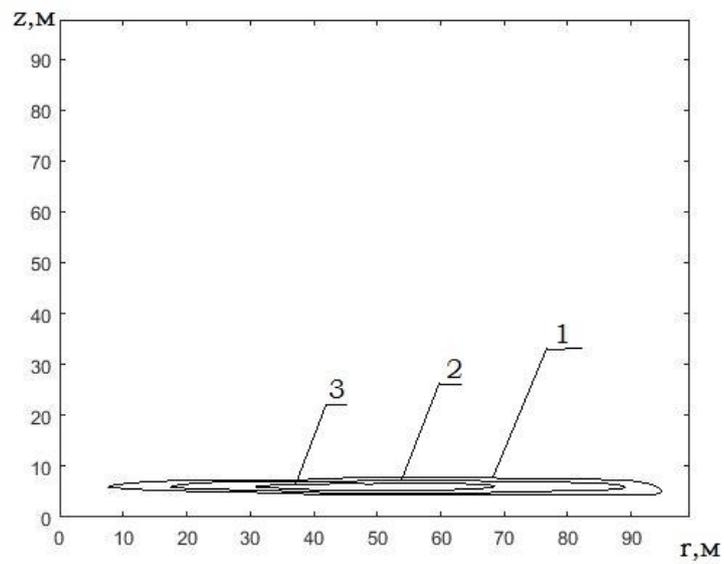


Рисунок 3.9 – Распределение \bar{c}_2 при $w=0,666$ и $m=60\ 000$ кг: 1 – $\bar{c}_2=0.05$,
2 – $\bar{c}_2=0.07$, 3 – $\bar{c}_2=0.1$

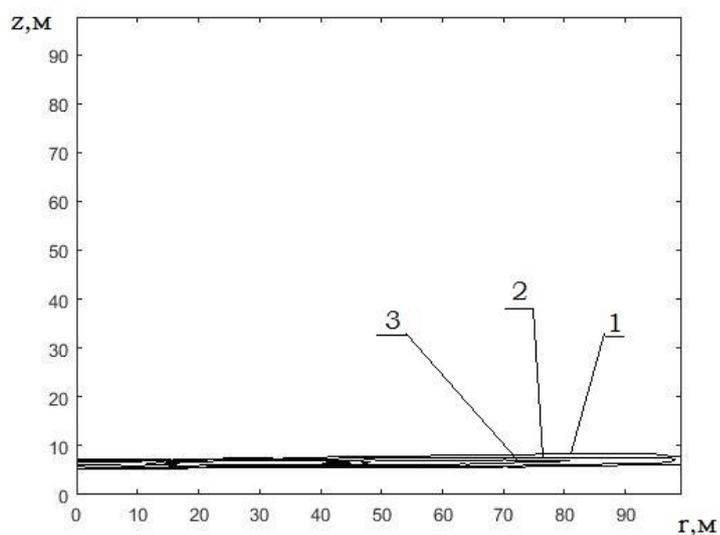


Рисунок 3.10 – Распределение \bar{c}_2 при $w=0,8$ и $m=60\ 000$ кг: 1 – $\bar{c}_2=0.05$,
2 – $\bar{c}_2=0.07$, 3 – $\bar{c}_2=0.1$

На основании этих данных определены значения радиусов воспламенения лесного массива под воздействием теплового излучения от огненного шара, которое зависит от влажности, содержания основной массы лесных горючих материалов и массы топлива. Радиус воспламенения растительности максимальный при влагосодержании $w = 0,666$ и массе топлива равная 60 000 кг.

3.3. Оценка и анализ полученных данных

Как показывают рисунки 3.2–3.5, на величину радиуса зажигания растительного покрова r^* влияют влагосодержание ЛГМ и масса топлива. При уменьшении влагосодержания ЛГМ и увеличении массы топлива радиус зажигания растительности увеличивается. Также в результате численного решения задачи были получены распределение массовых концентраций продуктов пиролиза, а также векторные поля скорости.

4. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ

4.1. Метод решения одномерной задачи

Дифференциальное уравнение, которое описывает процесс тепломассообмена и гидродинамики подчиняются обобщенному закону сохранения. Если обозначить некую интересующую функцию Φ , то обобщенное дифференциальное уравнение для одномерной задачи принимает вид [43]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + S \quad (39)$$

где t, x – временная и пространственная координаты, ρ – плотность, v – компонент вектора скорости, Γ_{Φ} – коэффициент переноса (например, Γ_{Φ} – коэффициент турбулентной вязкости, теплопроводности, диффузии и т.д.), S – источниковое слагаемое. Так же в S возможен вход притока тепла за счет химических реакций в уравнении энергии или увеличения (уменьшения) концентраций компонентов в результате химических реакций в уравнении диффузии. Конкретный вид Γ_{Φ} и S зависит от смысла переменной Φ . В обобщенное дифференциальное уравнение входят четыре члена: нестационарный, конвективный, диффузионный и источниковый [43].

Построение дискретного аналога для уравнения вида (37) проводилось на основе метода контрольного объема. Настоящее расположение граней контрольного объема e и w не должно сказываться на окончательную форму записи, допустим, что грань e размещена посередине между узловыми точками P и E , а грань w – посередине между W и P (рисунок 4.1).

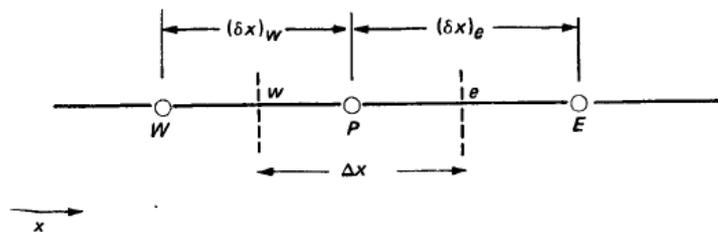


Рисунок 4.1 – Шаблон узловых точек для одномерной задачи [44]

Физический смысл метода контрольного объема заключается в том, что расчетная область разбивается на n -ое количество контрольных объемов, таким образом, что каждый контрольный объем содержит одну узловую точку. Для

каждого контрольного объема решается дифференциальное уравнение, решение которого осуществляется через кусочные профили, в результате которого получается дискретный аналог.

Одномерный дискретный аналог можно представить в следующем виде:

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (40)$$

где

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [|-F_e, 0|] \quad (41)$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + [|-F_w, 0|] \quad (42)$$

$$a_P = a_E + a_W \quad (43)$$

$$b = \bar{S} \Delta x \quad (44)$$

Проводимости для массовых расходов F_e и F_w представим в виде:

$$D_e = \frac{\Gamma_e}{(\delta x)_e} \quad (45)$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w}{(\delta x)_w} \quad (46)$$

а числа Пекле

$$P_e = \frac{F_e}{D_e} \quad (47)$$

$$P_w = \frac{F_w}{D_w} \quad (48)$$

Полученное алгебраическое уравнение (40) решается методом прогонки (TDMA). Для удобства записи алгоритма введем некоторые обозначения. Присвоим узловым точкам, изображенным на рисунке 1, номера 1, 2, 3, ..., N. Номера 1 и N относятся к точкам на границе (рисунок 4.2). Дискретный аналог можно записать в следующем виде:

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad (49)$$

где $i=1, 2, 3, \dots, N$. Таким образом, температура T , связана с соседними значениями T_{i+1} и T_{i-1} . Запись уравнений для узловых точек на границе дает

$$c_1 = 0, b_N = 0 \quad (50)$$

следовательно, температуры T_0 и T_{N+1} не будут иметь смысла (в том случае, когда температуры на границе заданы, уравнения для граничных точек записываются в обычной форме, например, если T_1 задано, имеем $a_1 b_1 = 0, c_1 = 0$ и d_1 равно заданному значению T_1) [48].



Рисунок 4.2 – Расположение сетки

Записанные условия означают, что T_1 известна в зависимости от T_2 . Уравнение для $i=2$ представляет собой соотношение между T_1 , T_2 и T_3 . Но так как T_1 может быть выражена через T_2 , то это соотношение приводится к соотношению между T_2 и T_3 . Другими словами, T_2 можно выразить через T_3 . Процесс подстановки можно продолжать до тех пор, пока значение T_N не будет выражено через T_{N+1} . Но поскольку T_{N+1} не существует, мы в действительности на данном этапе получим численное значение T_N . Это позволит начать процесс обратной подстановки, в котором T_{N-1} получится из T_N , T_{N-2} - из T_{N-1} , ..., T_2 - из T_3 и T_1 - из T_2 . Это и составляет алгоритм трехдиагональной матрицы [48].

Предполагается, что при прямой подстановке имеем зависимой

$$T_i = P_i T_{i+1} + Q_i \quad (51)$$

после того, как получено

$$T_{i-1} = P_{i-1} T_i + Q_{i-1} \quad (52)$$

Подставляя (52) в (49), получаем следующее соотношение:

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i (P_{i-1} T_i + Q_{i-1}) + d_i \quad (53)$$

которое можно привести к виду (51). Коэффициенты P_i и Q_i запишем в виде:

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (54)$$

$$Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (55)$$

Эти соотношения определяют P_i и Q_i через P_{i-1} и Q_{i-1} . Заметим, что в начале процесса уравнение (51) для $i=1$ по форме почти совпадает с (49). Таким образом, P_i и Q_i определяются следующим образом:

$$P_1 = \frac{b_1}{a_1} \quad (56)$$

$$Q_1 = \frac{d_1}{a_1} \quad (57)$$

На другом конце последовательности P_i и Q_i имеем $b_N = 0$. Это дает $P_N = 0$, и из (47) получаем $T_N = Q_N$ [45].

Скорость сходимости метода прогонки (TDMA) достаточно высока, так как сведения о граничных условиях на концах линии мгновенно переходят во внутреннюю долю области, вне зависимости от числа точек на линии.

4.2. Метод решения двумерной задачи

Дифференциальное уравнение, которое описывает процесс тепломасообмена и гидродинамики подчиняются обобщенному закону сохранения. Если обозначить некую интересующую функцию Φ , то обобщенное дифференциальное уравнение для одномерной задачи принимает вид [43]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(v\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + S \quad (58)$$

где t , x – временная и пространственная координаты, ρ – плотность, v – компонент вектора скорости, Γ_Φ – коэффициент переноса (например, Γ_Φ – коэффициент турбулентной вязкости, теплопроводности, диффузии и т.д.), S – источниковое слагаемое. Так же в S возможен вход притока тепла за счет химических реакций в уравнении энергии или увеличении (уменьшении) концентраций компонентов в результате химических реакций в уравнении диффузии. Конкретный вид Γ_Φ и S зависит от смысла переменной Φ . В обобщенное дифференциальное уравнение входят четыре члена: нестационарный, конвективный, диффузионный и источниковый [43].

Построение дискретного аналога для уравнения вида (58) проводилось на основе метода контрольного объема.

Часть двумерной сетки показана на рисунке 4.3. Для узловой точки P соседние точки W и E расположены по направлению оси x , точки N и S (обозначающие север и юг) – по направлению оси y . Контрольный объем, окружающий точку P , показан штриховыми линиями. Глубина объема в направлении оси z предполагается равной единице.

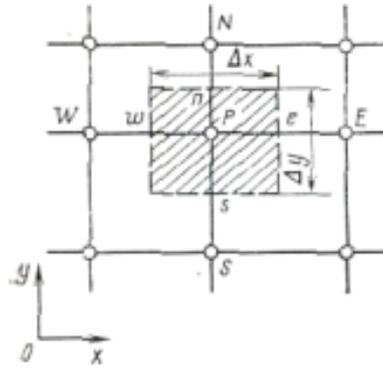


Рисунок 4.3 – Контрольный объем для двумерной задачи

Двухмерный дискретный аналог можно представить в следующем виде:

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (59)$$

где

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [|-F_e, 0|] \quad (60)$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + [|-F_w, 0|] \quad (61)$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + [|-F_n, 0|] \quad (62)$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + [|-F_s, 0|] \quad (63)$$

$$a_p^0 = \rho c \Delta x \Delta y / \Delta t \quad (64)$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y + a_p^0 T_p^0 \quad (65)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^0 - S_p \Delta x \Delta y \quad (66)$$

Произведение $\Delta x \Delta y$ представляет собой контрольный объем. Полученное алгебраическое уравнение (59) решается методом прогонки (TDMA).

Проводимости для массовых расходов F_e и F_w представим в виде:

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (67)$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (68)$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (69)$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (70)$$

а числа Пекле

$$P_e = \frac{F_e}{D_e} \quad (71)$$

$$P_w = \frac{F_w}{D_w} \quad (72)$$

$$P_n = \frac{F_n}{D_n} \quad (73)$$

$$P_s = \frac{F_s}{D_s} \quad (74)$$

Следует отметить, что даже на этой стадии физический смысл различных коэффициентов понятен. Коэффициенты в соседних точках a_e , a_w , a_n и a_s учитывают влияние конвекции и, диффузии для четырех граней контрольного объема, которые зависят от массового расхода F и проводимости D .

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данной работы является создание математической модели зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода с образованием «огненного шара» на основе законов механики сплошных сред и экспериментальных данных. Модель позволяет рассчитать максимальные размеры зон зажигания в зависимости от количества выделившегося горючего вещества, от текущего состояния атмосферы. Рассчитав максимальные размеры зон зажигания можно определить безопасные противопожарные расстояния от газопроводов до лесных массивов и прогнозировать ущерб, с учетом полученных в результате моделирования данных.

Методом исследования в данной работе, как отмечалось во введении, является метод математического моделирования на основе численного анализа с помощью программного обеспечения Visual Studio. На рынке представлено большое количество программ, позволяющих решить различные задачи, связанные с моделированием потоков жидкостей и газов. Среди таких программ можно отметить следующие: ANSYS, Phoenics, Fluent, STAR-CD, FASTEST-3, Sigma6, Gas Dynamics Tool и другие. Однако не все программы позволяют оперативно определить безопасные расстояния. Как правило большинство программ при численном решении требуют больших временных затрат и высокой производительности ПЭВМ.

Нами во главе с д. ф.–м. н. Перминовым В.А. было создано приложение для определения радиуса зажигания лесной растительности при воздействии на них теплового потока в результате взрыва на газопроводе с образованием ОШ и безопасных расстояний от газопровода до лесных угодий с помощью программы Visual Studio на языке Fortran.

Visual Studio – это интегрированная среда разработки программного обеспечения от компании Microsoft. С помощью Visual Studio можно создавать приложения для Windows, iOS, Android и других платформ. В Visual Studio включены инструменты не только для создания desktop приложений, но и web, мобильные и облачные инструменты разработки. Имеется возможность

написания кода на таких языках как: C++, C#, Visual Basic, F#, JavaScript, Python, TypeScript. Помимо всего этого она включает в себя конструкторы, редакторы, отладчики, профилировщики, а также огромное количество расширений для разных областей применения.

Fortran – первый язык программирования высокого уровня, имеющий транслятор. Создан в период с 1954 по 1957 год группой программистов под руководством Джона Бэкуса в корпорации IBM. Название Fortran является сокращением от FORmula TRANslator (переводчик формул). Фортран широко используется в первую очередь для научных и инженерных вычислений. Одно из преимуществ современного Фортрана — большое количество написанных на нём программ и библиотек подпрограмм.

Созданное приложение имеет рабочее название «Fireball», и позволяет при минимальных временных затратах и минимальном количестве исходных данных (исходная масса топлива, характеристики лесных горючих материалов) определить радиус зажигания для лесных массивов, через который определяется безопасные расстояния.

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

5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов проведенного исследования был проанализирован целевой рынок и проведено его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка.

Сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

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

Учитывая область наших исследований, которые направлены на обеспечение пожарной и экологической безопасности, можно выделить следующие сегменты рынка (таблица 5.1):

- научно-исследовательские институты;
- высшие учебные заведения;
- профессионально-ориентированные школы;
- крупные газодобывающие предприятия;
- Департаменты лесного хозяйства;
- специалисты лесной охраны;
- управления МЧС России;
- проектные организации.

Таблица 5.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию программных продуктов для определения безопасных расстояний при авариях на ОПО

		Возможности приложения «Fireball»		
		Наличие бесплатной Shareware версии	Возможность работы с исходными текстами программ (встроенные модули)	Тематическая библиотека активного режима пользования
Сферы потребления приложения	Образование (высшие учебные заведения, профессионально-ориентированные школы)			
	Наука (научно-исследовательские институты, проектные организации)			
	Федеральное агентство лесного хозяйства (специалисты лесной охраны)			
	Крупные промышленные предприятия			

Продолжение таблицы 5.1

	Министерство чрезвычайных ситуаций (управления МЧС России)				
	приложение «Fireball»		FLUENT (Fluent Inc.)		ANSYS

Приложение «Fireball» может быть использовано в нефтехимической промышленности, в которой поток жидкости и газа играет ключевую роль.

Исходя из анализа результатов проведенного сегментирования, приложение занимает более выгодное положение для потенциальных покупателей, и оставляет возможным его ориентирование и доработку на конкретного потребителя по сравнению с дорогостоящими CFD-программами. Бесспорным преимуществом «Fireball» является наличие возможности бесплатного пилотного варианта приложения, как одного из путей его продвижения на рынке. Также преимуществом приложения является возможность работы с исходными текстами программы, осуществлять ее доработку и отладку, дополняя и совершенствуя.

5.1.2. Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения проводится с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
2. Удобство интерфейса	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
3. Адекватность рассчитанных моделей	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
4. Функциональные возможности (встроенные модули)	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
5. Энциклопедия решенных примеров	0,1	1	3	3	0,1	0,3	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	1	5	4	0,1	0,5	0,4
2. Уровень проникновения на рынок	0,1	1	4	3	0,1	0,4	0,3
3. Цена	0,1	5	2	2	0,5	0,2	0,2
4. Послепродажное обслуживание	0,2	5	3	3	1	0,6	0,6
Итого	1	33	28	26	3,3	2,8	2,6

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 1.2, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Данная разработка сравнивается с программными продуктами: американские программы FLUENT (K1) и ANSYS (K2). Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (75)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

5.1.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

SWOT-анализ проводится в несколько этапов.

На первом этапе мы описываем сильные и слабые стороны проекта, выявляем возможности и угрозы при его реализации, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Сильные стороны. Низкая стоимость по сравнению с другими программами. Послепродажное обслуживание и консультирование специалистами, а также возможность доработки для конкретного покупателя данного приложения.

Слабые стороны. Отсутствие тематической библиотеки для активного пользования. Трудный путь вывода данного продукта на рынок, т.е. получения патента для данного продукта.

Возможности. Приложение позволяет решать одномерные, двумерные и трёхмерные задачи с учетом тепло- и массопереноса, турбулентности, переноса энергии излучением и химических реакций. Данная программа может быть использована для изучения процессов тепло- и массообмена в различных областях, в том числе и при решении задач в области пожарной и экологической безопасности. Создание модели тепломассопереноса осуществляется с учетом уже встроенных моделей турбулентности и излучения. Это приложение может быть использовано как в образовательных целях, так и в научных целях.

Угрозы. На рынке представлено большое количество программ, позволяющих решить различные задачи, связанные с моделированием потоков жидкостей и газов. Без глубоких знаний математики и программирования отсутствует возможность решения сложных задач и построение адекватных полноценных моделей.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должно быть направлено на выявление степени необходимости проведения стратегических изменений (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Интерактивная матрица проекта

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

В рамках *третьего этапа* составляем итоговую матрицу SWOT-анализа научно-исследовательского проекта (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>C1. Возможность доработки данного приложения с ориентацией на конкретного потребителя.</p> <p>C2. Возможность работы с исходными данными программы, в том числе с кодом программы.</p> <p>C3. Относительно низкая стоимость по сравнению с другими CFD-программами.</p> <p>C4. Короткое время расчета модели.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Необходима разработка документации приложения с подобными примерами решения различных задач</p> <p>Сл2. Использование приложения «Fireball» требует специальной подготовки пользователей в области вычислительной математики, механики жидкости и газа, программирования и т.д.</p> <p>Сл3. Самостоятельное изучение программы, без консультаций специалиста по данному пакету не раскрывает всех возможностей программы.</p>
--	---	---

Продолжение таблицы 5.4

<p>Возможности: В1. Программа позволяет решать одномерные, двумерные и трёхмерные задачи как в области пожарной, так и в области экологической безопасности. В2. Создание модели тепломассопереноса с учетом уже внесенных в программу моделей турбулентности. В3.Создание модели тепломассопереноса с учетом уже внесенных в программу моделей излучения.</p>	<p>В1С1С2С3С4, В2В3С4: при совмещении сильных сторон и возможностей НИР улучшается качество создаваемой модели. Результаты моделирования могут быть использованы в области пожарной и экологической безопасности.</p>	<p>В1В2В3В4В5Сл3: совмещение возможностей и слабых сторон позволяет пользователю самостоятельно в рамках программы создавать адекватные модели любой сложности.</p>
<p>Угрозы: У1. На рынке моделирования большое количество аналогичных программ. У2. Требование высокой квалификации специалистов, обучающих возможностям данной программы. У3. Без глубоких знаний математики и программирования отсутствует возможность решения сложных задач и построение адекватных моделей.</p>	<p>У1С4: пользователи без основательных знаний математики, программирования и при отсутствии обучения не имеют возможности использовать все возможности данной программы и решать задачи повышенной сложности.</p>	<p>У2У3Сл1Сл2, У3Сл3: при должном финансировании и профессиональном обучении пользователей возможности программы могут быть в полной мере реализованы в сферах экологической и пожарной безопасности для решения сложных актуальных задач.</p>

Результаты проведенного SWOT-анализа будут учтены при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

5.2. Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового научно-исследовательского проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание, фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта .

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика научно-исследовательского проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

5.2.1. Цели и результат проекта

Таблица 5.5 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Научно-исследовательские институты, высшие учебные заведения	Проведение исследований в областях, в которых поток жидкости и газа играет ключевую роль.
Исследовательские лаборатории и службы мониторинга промышленных предприятий	Проведение исследований и разработок в области экологической и пожарной безопасности.
Проектировочные организации и институты	Проведение исследований и разработок в области экологической и пожарной безопасности.
Федеральное агентство лесного хозяйства, управление МЧС России	Использование результатов исследований с целью проведения профилактических мероприятий в области пожарной безопасности. Возможность проведения оценки, анализа и прогноза лесных пожаров.
Нефтеперерабатывающее производство	Применение безопасных противопожарных расстояний от газопроводов до лесных массивов с учетом полученных в результате моделирования данных.

Ниже представлена информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Цели проекта включают в себя цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 5.6 –Цели и результат проекта

Цели проекта:	Создание модели зажигания растительного покрова в результате аварии на газопроводе и определение безопасного противопожарного расстояния от газопровода до лесных массивов с учетом полученных в результате моделирования данных.
Ожидаемые результаты проекта:	Определение безопасного противопожарного расстояния от газопроводов до лесных массивов.
Критерии приемки результата проекта:	Практическая значимость результата проекта реализуется как в области пожарной, так и в области экологической безопасности, а именно - моделирование оценки воздействия теплового излучения на растительный покров.

Продолжение таблицы 5.6

Требования к результату проекта:	Требования:
	Использование программного обеспечения VS для построения модели зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода с образованием «огненного шара».
	Определение безопасного расстояния от газопровода до лесных массивов.
	Применения полученных результатов в области пожарной и экологической безопасности.

5.2.2. Организационная структура проекта

На данном этапе работы были решены следующие вопросы: кто входил в рабочую группу данного проекта, определена роль каждого участника в данном проекте, прописаны функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте.

Таблица 5.7– Рабочая группа проекта

п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, час.
	Перминов В.А., профессор ОКД НИ ТПУ	Координация (руководитель проекта)	Координирование деятельности	220
	Акчина С.С., магистрант ОКД НИ ТПУ	Выполнение (исполнитель проекта)	Выполнение исследовательской работы.	640
ИТОГО:				860

5.2.3. План проекта

В рамках планирования научного проекта был построен линейный график проекта (таблица 5.8).

Расчет продолжительности и последовательности работ дает возможность своевременно и эффективно выполнять запланированный объем работ.

Таблица 5.8 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, рабочие дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1.1	Выбор темы научно-исследовательской работы. Постановка цели и задач.	5	20.10.19	24.10.19	В.А. Перминов, С.С. Акчина
1.2	Выбор объектов и методов исследования.	5	27.10.19	31.10.19	В.А. Перминов, С.С. Акчина
1.3	Анализ литературы.	60	20.10.19	9.02.20	С.С. Акчина
2.1	Исследования в период прохождения научно-производственной практики: моделирование оценки воздействия теплового излучения на растительный покров.	25	9.02.20	13.03.20	В.А. Перминов, С.С. Акчина
2.2	Построение модели тепломассопереноса лесного пожара с помощью ПО VS и изучение его воздействия на растительность.	10	16.03.20	27.03.20	В.А. Перминов, С.С. Акчина
2.3	Использование программного обеспечения VS для численного решения уравнений.	10	30.03.20	10.04.20	В.А. Перминов, С.С. Акчина
2.4	Оценка и анализ полученных результатов для определения безопасного противопожарного расстояния от газопровода до лесных массивов.	14	13.04.20	30.04.20	С.С. Акчина
3.1	Оформление проекта к сдаче.	25	5.05.20	06.06.20	С.С. Акчина
Итого:		155			

Далее требуется построить диаграмму Ганта. Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются

протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Диаграмма представлена в таблице 5.9.

5.3. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования был составлен перечень всех видов осуществленных расходов, которые были произведены в процессе его выполнения.

5.3.1. Расчет затрат на материалы

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов).

Затраты сгруппированы по статьям и представлены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Затраты на сырье и материалы

Наименование	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Распечатка материалов диссертации	120 листов	1,5	180
Канцелярские товары	1 комплект	200	200
Всего за материалы, руб.			380
Транспортно-заготовительные расходы (5%), руб.			19
Электроэнергия, руб.			200
Итого по статье, руб.			599

5.3.2. Расчет затрат на оборудование

В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по данной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. Данные по затратам на оборудование приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Затраты на оборудование

пп/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб	Общая стоимость оборудования, тыс. руб
1	Ноутбук	1	25	25
22	USB Flash накопитель	1	0,4	0,4
ИТОГО			25,4	

5.3.3. Расчет основной заработной платы

В настоящую статью включена основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда).

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (76)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} \quad (77)$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{м} \cdot M}{F_{д}} \quad (78)$$

где $Z_{м}$ – 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_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней (таблица 5.12).

Таблица 5.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер (исполнитель)
Календарное число дней	222/365	222/365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	104	104
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	28
- невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	144/247	144/247

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot k_p \quad (79)$$

где Z_b – базовый оклад, руб.;

$Z_b = 33162,87$ руб – базовый оклад руководителя (профессор, доктор ф.м.н),

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

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад Z_b определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия. Размер окладов ППС и НС ТПУ представлен на корпоративном портале ТПУ.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Месячный должностной оклад научного руководителя:

$$Z_m = 33162,87 \cdot 1,3 = 43111,7 \text{ руб.}$$

Среднедневная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = 43111,7 / 22 = 1959,62 \text{ руб.}$$

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_b , руб.	k_p	Z_m , руб	$Z_{\text{дн}}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	33162,87	1,3	43111,7	1959,62	144	282485,66

5.3.4. Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды. На 2020 год общие тарифы страховых взносов следующие (таблица 5.14):

Таблица 5.14 – Общие тарифы страховых взносов на 2020 г.

Ставка ПФР	Ставка ФСС	Ставка ФФОМС
22,0%	2,9%	5,1%

Совокупная ставка общих страховых взносов равен 30%. То есть 30% от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением ВКР.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (80)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Соответственно сумма страховых отчислений равна:

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \times (282485,66 + 42372,84) = 98\,107,3 \text{ (руб)} \text{ (Для руководителя)}$$

5.3.5. Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70–90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

В связи с тем, что при проведении исследования использовалось оборудование на базе ТПУ затраты на накладные расходы будут меньше и составят 16 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (81)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов, $k_{\text{накл}} = 0,4$.

$C_{\text{накл}} = 0,16 \times (282\,485,66 + 42\,372,84) = 51\,977,36$ (руб) (для руководителя)

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляем калькуляцию плановой себестоимости исследования на тему «Математическое моделирование оценки воздействия верховых лесных пожаров на здания и сооружения» приведенный в таблице 5.15:

Таблица 5.15 – Калькуляция плановой себестоимости исследования

Наименование статей затрат	Сумма, руб
Материалы	599
Оборудование	25 400
Заработная плата	282 485,66
Страховые взносы	98 107,5
Накладные расходы	51 977,36
Итого себестоимость исследования	458 569,52

5.3.6. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информацию по данному разделу сведена в таблицу 5.16.

Таблица 5.16 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1.	Получение неадекватной модели и как следствие ошибочных данных.	Получение неверного результата	средняя	высокое	высокий	Проведение доп. консультаций со специалистом	Отсутствие самостоятельного изучения ПО
2.	Некорректный ошибочный перевод англояз. интерфейса и библиотеки.	Получение неверного результата	низкая	высокое	высокий	Углубленное изучение англ. языка	Отсутствие базовых знаний англ. языка
3.	Прекращение консультаций от поставщика ПО	Увеличение затрат времени на реализацию проекта.	низкая	среднее	низкий	Самостоятельное изучение энциклопедии ПО	Прекращение связи с поставщиком ПО

5.4. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность.

По результатам проекта была проведена оценка социальной и экономической эффективности приложения «Fireball», позволяющего создавать модели в отраслях, где поток жидкости и газа играет ключевую роль.

5.4.1. Оценка социальной эффективности исследования

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта 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. В таблице 5.17 приводится оценка социальной эффективности проекта

приложения «Fireball» для построения модели зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода с образованием «огненного шара».

Таблица 5.17 – Критерии социальной и экономической эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Дорогостоящий эксперимент по моделированию растительного покрова от теплового потока.	Низкая стоимость приложения по сравнению с затратами на эксперимент.
Невозможность проведения эксперимента в силу большого риска и невозможности получения модели на практике.	Получение модели по средствам компьютера без риска и опасности для здоровья людей и окружающей среды.
Большие затраты времени на постановку эксперимента. Сложная, а порой и невозможная постановка эксперимента.	Существенная экономия времени, наглядность результатов моделирования.
Высокие затраты на реализацию эксперимента.	Экономия средств при создании модели с помощью «Fireball».

5.4.2. Оценка сравнительной эффективности исследования

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (82)$$

где I_{Φ}^p - интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Вариант №1: Visual Studio. Стоимость пакета равна 2,6 тыс. евро (около 220 000 руб).

Вариант №2: FLUENT (Fluent Inc.). Полная стоимость одного профессионального рабочего места в год составляет 55 тыс. евро (3 130 000 руб).

Вариант №3: STAR-CD (Computational Dynamics Ltd.). Стоимость пакета равна ПО STAR-CD пакета равна 17,5 тыс. евро (около 1000 000 руб).

$$I_{\Phi B1}^p = \frac{220000}{3130000} = 0,07, I_{\Phi B2}^p = \frac{3130000}{3130000} = 1, I_{\Phi B3}^p = \frac{1000000}{3130000} = 0,32$$

Полученная 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).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p \quad (83)$$

где I_m^a – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

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

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 5.18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии оценки	Вес. коэф.	$I_{\text{тп}}$	Аналог1 (FLUENT)	Аналог2 (STAR-CD)
1	2	3	4	5
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	5	5
2. Удобство интерфейса	0,1	5	4	4
3. Адекватность рассчитанных моделей	0,1	4	4	4
4. Функциональные возможности (встроенные модули)	0,1	5	3	3
5. Энциклопедия решенных примеров	0,1	5	3	3
6. Конкурентоспособность продукта	0,1	4	5	4
7. Уровень проникновения на рынок	0,1	3	4	3
8. Цена	0,1	5	2	2
9. Послепродажное обслуживание	0,2	5	4	4
Итого	1	41	34	32

$$I_{\text{тп}} = 5 \times 0,1 + 5 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 5 \times 0,1 + 5 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 3 \times 0,1 + 5 \times 0,1 + 5 \times 0,2 = 4,6$$

$$\text{Аналог1} = 5 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 3 \times 0,1 + 3 \times 0,1 + 5 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 2 \times 0,1 + 4 \times 0,2 = 3,8$$

$$\text{Аналог2} = 5 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 3 \times 0,1 + 3 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 3 \times 0,1 + 2 \times 0,1 + 4 \times 0,2 = 3,6$$

$$I_m^p = \frac{41}{41} = 1; I_m^{a1} = \frac{34}{41} = 0,83; I_m^{a2} = \frac{32}{41} = 0,78$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{\text{финр}}^p$) и налога ($I_{\text{финр}}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p}, I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\text{ф}}^a}, \quad (84)$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{1}{0,07} = 14,2; I_{\text{финр}}^{a1} = \frac{0,83}{1} = 0,83; I_{\text{финр}}^{a2} = \frac{0,78}{0,32} = 2,44$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{ф}}^p}{I_m^a} \quad (85)$$

где \mathcal{E}_{cp} – сравнительная эффективность проекта; I_{ϕ}^p – интегральный финансовый показатель разработки; I_m^a – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов.

$$\mathcal{E}_{cp}^p = \frac{0,07}{1} = 0,07 ; \mathcal{E}_{cp}^{a1} = \frac{1}{0,83} = 1,2 ; \mathcal{E}_{cp}^{a2} = \frac{0,32}{0,78} = 0,41$$

Таблица 5.19 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог 1 (FLUENT)	Аналог 2 (STAR-CD)	Разработка (PHOENICS)
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,32	0,07
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,8	3,6	4,6
3	Интегральный показатель эффективности	0,83	2,44	14,2
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,2	0,41	0,07

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

5.5. Вывод

В результате проделанного анализа экономической эффективности было проведено сегментирование рынка, по результатам которого были выбраны наиболее перспективные сегменты. Анализ перспективности данной разработки показал, что она является весьма перспективной. Продукт является высокотехнологичной продукцией, востребованной в сфере промышленности.

В ходе работы была разработана математическая модель для нахождения безопасных расстояний от газопровода до лесных массивов и получены адекватные результаты. С помощью приложения «Fireball» мы значительно сократили время и затраты на проведение дорогостоящих экспериментов без риска и опасности для здоровья людей и окружающей среды.

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Разработана математическая модель воздействия теплового излучения от огненного шара, появившегося в результате разгерметизации газопровода на лесной массив. Модель позволяет определить максимальные размеры зон зажигания в зависимости от количества выделившегося горючего и характеристик объектов. Определив максимальные размеры зон зажигания можно определить безопасное расстояние газопровода до лесного массива и до окружающих объектов, прогнозировать ущерб.

Работа, предполагает использование персональной электронно-вычислительной машины – персонального компьютера (ПК). Работа представляет собой сбор информации, её обработка, проведение расчётов. А также составление рекомендаций, на основе полученных данных. Выполняется в закрытом помещении на персональном компьютере, с помощью которого обрабатывается вся информация.

6.1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды

ПЭВМ, безусловно увеличивает производительность человека при выполнении работ, но может оказывать вредное воздействие на организм работающего за ПК.

Опасные и вредные факторы, которые постоянно или периодически действуют на человека за работой на ПЭВМ, представлены в Таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Опасные и вредные факторы при работе на ПЭВМ

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа за ПЭВМ: 1. рабочее место; 2. кондиционеры и различные печатающие устройства; 3. искусственное освещение; 4. системный блок, монитор;	1. отклонение показателей микроклимата; 2. повышенный уровень шума; 3. недостаточная освещенность рабочей зоны; 4. электромагнитное излучение;	1. электрический ток; 2. возникновение пожара.	Параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4.548-96 [46]. Параметры шума устанавливаются СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [48].

5. выполнение должностных обязанностей.	5. напряженность, монотонность трудового процесса.		Параметры освещенности рабочей зоны устанавливаются СНиП 23-05-95 [49]. Параметры электромагнитного излучения устанавливаются СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 [50].
---	--	--	--

Обоснование допустимых норм вредных и опасных факторов на работающего на ПЭВМ и рекомендации по уменьшению воздействия вредных и опасных факторов.

1. На рабочем месте пользователей должны обеспечиваться оптимальные и допустимые параметры микроклимата (таблица 6.2) [46].

Таблица 6.2 – Оптимальные и допустимые значения микроклимата в рабочей зоне [46]

Параметры микроклимата	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения, м/с
Оптимальные значения	20-22	40-60	не более 0,1
Допустимые значения	15-28	20-80	не более 0,5

Интенсивность теплового излучения от нагретых поверхностей, осветительных приборов не должна превышать 35 Вт/м². Чистота воздушной среды достигается удалением загрязненного, нагретого или ионизированного воздуха из рабочего помещения с подачей свежего воздуха. Для поддержания нормального микроклимата необходим достаточный объем вентиляции, для чего в помещениях с работающими компьютерами предусматривается кондиционирование воздуха, осуществляющее поддержание постоянных параметров микроклимата независимо от внешних условий. Параметры микроклимата поддерживаются в холодное время года за счет систем водяного отопления с нагревом воды до 100°С, а в теплое время года – за счет кондиционирования. Для повышения влажности воздуха в помещениях следует применять увлажнители воздуха [47].

2. На человека в зале с ПК воздействует шум. Основными источниками шума в рабочих помещениях, оснащенных компьютерной техникой являются принтеры, МФУ и кондиционеры, а в самих компьютерах – вентиляторы охлаждения и трансформаторы блока питания. Печатающее оборудование, являющееся источником шума, следует устанавливать на звукопоглощающей поверхности автономного рабочего места пользователя. Если уровни шума от печатающего оборудования превышают нормируемые, оно должно быть расположено вне помещения с ПК.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 82 дБА.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть СКЗ и СИЗ.

СИЗ: применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

СКЗ: устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования; изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения; применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения [48].

3. Создание оптимальной световой среды занимает важное место в комплексе мероприятий по охране труда и оздоровлению условий труда при работе с ЭВМ и компьютерной техникой. Помещения, оснащенные ЭВМ и компьютерной техникой должны иметь как естественное, так и искусственное освещение. В таких помещениях используется естественное боковое одностороннее освещение в дневное время, в вечернее время используется искусственное общее равномерное освещение [49].

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения $A = 5$ м, ширина $B = 3$ м, высота = 3,5 м. Высота рабочей

поверхности над полом $h_p = 1,0$ м. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 150 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь помещения:

$$S = A \times B = 5 \times 3 = 15 \text{ м}^2,$$

где A – длина, м; B – ширина, м.

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c=50\%$, свежепобеленного потолка $\rho_{IT}=70\%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_3 = 1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$.

Выбираем лампу дневного света ЛД-40, световой поток которой равен $\Phi_{ЛД} = 2600$ Лм.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина – 265 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda=1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса, h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухламповых светильников ОДОР: $h_n = 3,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2,00 \text{ м.}$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,00 = 2,2 \text{ м}$$

Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{4}{2,2} = 1,81 \approx 2$$

Число светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{5}{2,2} = 2,27 \approx 2$$

Общее число светильников:

$$N = Na \cdot Nb = 2 \cdot 2 = 4$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$5 = 2 \cdot 1,53 + L_1 + \frac{2}{3}L_1$$

$$L_1 = 1,2 \text{ м}$$

$$l_1 = \frac{L_1}{3} = \frac{1,2}{3} = 0,4 \text{ м}$$

$$3 = 2 \cdot 0,27 + L_2 + \frac{2}{3}L_2$$

$$L_2 = 1,4 \text{ м}$$

$$l_2 = \frac{L_2}{3} = \frac{1,4}{3} = 0,46 \text{ м}$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке 6.1 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

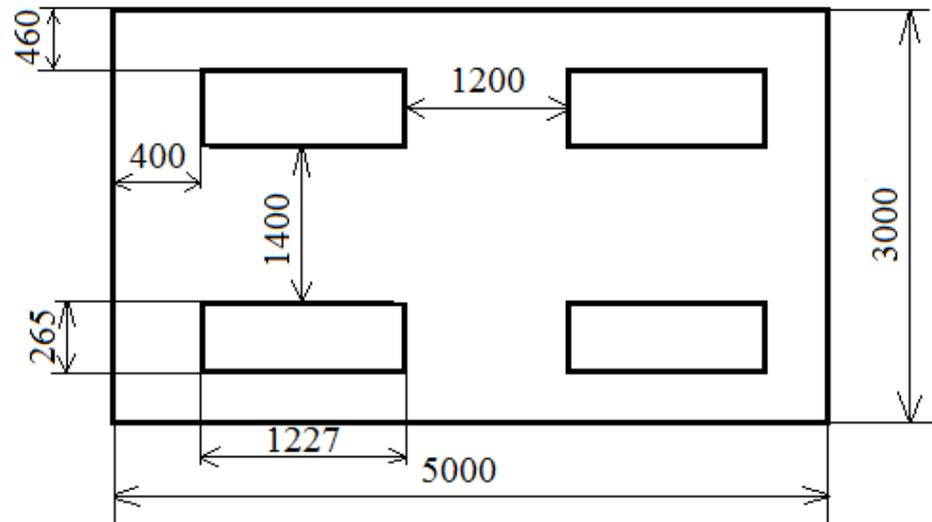


Рисунок 6.1 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{5 \cdot 3}{2,00 \cdot (5 + 3)} = 0,93$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при $\rho_{\text{П}} = 70\%$, $\rho_{\text{С}} = 50\%$ и индексе помещения $i = 0,86$ равен $\eta = 0,40$.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{П}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 0,40} = 2321 \text{ лм}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% \leq 20\%;$$

$$\frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% = \frac{2600 - 2321}{2600} \cdot 100\% = 10,8\%.$$

Таким образом: $-10\% \leq 10,8\% \leq 20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

4. Электромагнитное излучение от компьютера генерируется всеми частями данного устройства. Процессор, например, производит низкочастотное излучение, которое распространяется в окружающем пространстве в виде электромагнитных волн, дезориентирующих и ухудшающих работу биомагнитного поля человеческого тела.

Рассматривая вредное воздействие от монитора, следует принимать во внимание тот факт, что передняя часть экрана производит относительно меньше вредного излучения, поскольку защищена специальным покрытием, которое блокирует чрезмерное распространение излучения. Боковые стороны и задняя поверхность монитора генерируют гораздо больше вредного излучения.

Предельно допустимые уровни облучения:

В диапазоне СВЧ = 300...300000 МГц допустимая плотность потока мощности (ППМ_{доп}) в течение всего рабочего дня составляет:

- от 10 до 1000 мкВт/см² время пребывания в рабочей зоне составляет 2 часа;

- более 100 мкВт/см² время работы 15-20 мин,

- 1000 мкВт/см² (при обязательном использовании защитных очков).

В остальное рабочее время интенсивность облучения не должна превышать 10 мкВт/см². Для лиц, профессионально не связанных с облучением, и для населения в целом ППМ не должен превышать 1 мкВт/см² [6].

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами:

СКЗ: защита временем; защита расстоянием; снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения; экранирование источника; защита рабочего места от излучения.

СИЗ: очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга).

При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера. Ежедневная

защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами.

Вместо обычных стекол используют стекла, покрытые тонким слоем золота или диоксида олова (SnO_2).

Экранирование источника излучения и рабочего места осуществляется специальными экранами по ГОСТ 12.4.154.

5. Рабочее помещение, оснащенное компьютерной техникой, относится к помещениям с повышенной опасностью. В таких помещениях обязательным является: защитное заземление; изоляция, ограждение и обеспечение недоступности токоведущих частей; применение малого напряжения и двойной изоляции.

К средствам защиты от статического электричества и электрических полей промышленной частоты относят комбинезоны, очки, спецобувь, заземляющие браслеты, заземляющие устройства, устройства для увлажнения воздуха, антиэлектростатические покрытия и пропитки, нейтрализаторы статического электричества.

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает предельно допустимые напряжения и токи, протекающие через тело человека при нормальном режиме работы электроустановок производственного и бытового назначения постоянного и переменного тока частотой 50 и 400 Гц. Для переменного тока 50 Гц допустимое значение напряжения прикосновения составляет 2 В, а силы тока — 0,3 мА, для тока частотой 400 Гц — соответственно 2 В и 0,4 мА; для постоянного тока — 8 В и 1,0 мА (эти данные приведены для продолжительности воздействия не более 10 мин в сутки).

На рабочем месте пользователя находятся системный блок, клавиатура и монитор. При включении монитора на электронно-лучевой трубке формируется большое напряжение в несколько киловольт. Поэтому 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 [51].

б. Особенностью работы на ПК является постоянное и значительное напряжение функций зрительного анализатора, обусловленное необходимостью различения объектов в условиях: строчной структуры экрана, мелькания изображений, недостаточной освещенности поля экрана, недостаточной контрастности объектов различения и необходимости постоянной переадаптации зрительного аппарата к различным уровням освещенности экрана, оригинала, клавиатуры. Повышенные статические и динамические нагрузки у пользователей ПК приводят к жалобам на боли в спине, шейном отделе позвоночника и руках. А также обуславливается монотонностью, т.к. мы выполняем однообразные рабочие действия и их многократное повторение.

Для обеспечения оптимальной работоспособности и сохранения здоровья профессиональных пользователей на протяжении рабочей смены должны устанавливаться регламентированные перерывы. СанПиН рекомендует руководителям организаций, трудовая деятельность которых связана с использованием персональных компьютеров, производить чередование трудовой деятельности сотрудников с работой за компьютером и без него.

Если все же специфика трудовой деятельности не допускает таких чередований, ответственным лицам по охране труда следует

- осуществить организацию перерывов в трудовой деятельности продолжительностью от 10 до 15 минут;
- проводить такие перерывы через каждый час работы.

Данные перерывы в работе должны включаться в общее время трудовой деятельности, а также увеличиваться на 30 %, если сотрудник работает за компьютером в ночное время суток. Совокупная продолжительность перерывов: при рабочем дне продолжительностью 8 часов – от 50 минут до 1,5 часа; при 12-часовом – от 80 до 140 минут [47].

Санитарные правила рекомендуют устраивать для сотрудников «физкультурные» минутки с целью снижения их психофизического напряжения и недопущения гиподинамии и гипокинезии.

6.2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды

6.2.1. Факторы электрической природы

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статистического электричества.

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (помещения особо опасные).

В отношении опасности поражения людей электрическим током различают:

1. Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.

2. Помещения с повышенной опасностью, которые характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой.

3. Особо опасные помещения, которые характеризуются наличием оборудования свыше 1000 В и одного из следующих условий, создающих особую опасность: особой сырости, химически активной или органической среды, одновременно двух или более условий повышенной опасности.

Территории размещения наружных электроустановок в отношении опасности поражения людей электрическим током приравниваются к особо опасным помещениям [52].

Кабинет относится к помещению без повышенной опасности поражения электрическим током.

6.2.2. Факторы пожарной и взрывной природы

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 - В4, Г и Д, а здания - на категории А, Б, В, Г и Д. По пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории Ан, Бн, Вн, Гн и Дн.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудно сгораемым материалам). Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией в помещениях, где находится рабочее место оператора с ПК, является пожар.

Пожарная безопасность – состояние объекта, при котором исключается возможность пожара, а в случае его возникновения предотвращается воздействие на людей опасных его факторов и обеспечивается защита материальных ценностей .

Противопожарная защита – это комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также на создание условий для успешного тушения пожара.

В России в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 [54] пожарная безопасность обеспечивается:

1. системами предотвращения пожара (они должны исключать возникновение пожара, обеспечивать ПБ объекта и безопасность материальных ценностей);

2. системами противопожарной защиты и организации техническими мероприятиями (эти системы должны иметь уровень обеспечения ПБ не менее 0,99999);

Во всех служебных зданиях обязательно должен быть «План эвакуации людей при пожаре», регламентирующий действия персонала в случае возникновения пожара и указывающий месторасположения пожарной техники.

При обнаружении возгорания действовать необходимо быстро, используя все доступные способы для тушения огня. Если потушить огонь в кратчайшее время невозможно, вызовите пожарную охрану. При эвакуации горящие помещения и задымленные места проходить следует быстро, задержав дыхание, защитив нос и рот влажной плотной тканью. В сильно задымленном помещении передвигаться следует ползком или пригнувшись [54].

6.3. Охрана окружающей среды

6.3.1. Утилизация компьютерной техники

Широкое распространение микроэлектроники, компьютеров индивидуального пользования, мощных средств автоматизированной обработки текста и графической информации, высоко эффективных устройств ее хранения и поиска, современных средств связи и сетей электронно-вычислительных машин позволяют некоторым специалистам ставить вопрос о перспективах создания электронных офисов будущего.

Каждый компьютер содержит более 30 компонентов, многие из них высокотоксичны. Их демонтаж относится к производству по переработке вторичного сырья, которое сейчас активно развивается. Однако объемы компьютерных компонентов, требующих утилизации, растут быстрее мощностей по их переработке. Деление отходов на отдельные классы опасности для окружающей природной среды установлено Федеральным классификационным каталогом отходов, утвержденным приказом Министерства природных ресурсов РФ от 2 декабря 2002 г. № 786 [53]. Наименее опасными считаются так называемые практически неопасные

отходы. Кроме них существуют только более опасные: малоопасные, умеренно опасные, высокоопасные и чрезвычайно опасные.

К опасным ТБО относятся: попавшие в отходы батарейки и аккумуляторы, электроприборы, лаки, краски и косметика, удобрения и ядохимикаты, бытовая химия, медицинские отходы, ртутьсодержащие термометры, барометры, тонометры, лампы.

Пользователь ПК, выбрасывает отслужившие детали компьютера на свалку. Компоненты компьютера после попадания в почву начинают гнить, при этом выделяют ядовитые газы, которые усугубляют общий объем загрязнения окружающей среды, поэтому компьютеры надо утилизировать. Для этого требуется помощь специализированных компаний, которые все сделают правильно, поэтапно, согласно требованию законодательства.

Утилизация ПЭВМ проходит в несколько этапов:

1. Ручное удаление всех опасных компонентов. В современных настольных ПК и принтерах таких компонентов практически нет.

2. Затем удаляются все крупные пластиковые части. В большинстве случаев эта операция также осуществляется вручную. Пластик сортируется в зависимости от типа и измельчается для того, чтобы в дальнейшем его можно было использовать повторно. Оставшиеся после разборки части отправляют в большой измельчитель – шредер, и все дальнейшие операции автоматизированы.

3. Измельченные в гранулы остатки компьютеров подвергаются сортировке. Сначала с помощью магнитов извлекаются все железные части. Затем приступают к выделению цветных металлов, которых в ПК значительно больше. Алюминий добывают из лома посредством электролиза. В сухом остатке получается смесь пластика и меди. Медь выделяют способом флотации – гранулы помещают в специальную жидкость, пластик всплывает, а медь остается на дне.

6.3.2. Утилизация промышленных отходов

Картриджи. Правила утилизации контейнеров с тонером от принтеров определяет закон «Об отходах производства и потребления». Вышедшие из строя картриджи – это ТБО, относящиеся к III или IV классу опасности отходов. С целью соблюдения правильной процедуры утилизации изделий нужно сделать паспорт отхода, где должен быть указан его определенный класс опасности. Далее для дальнейшей утилизации нужно обратиться в специализированную компанию, имеющую лицензию на осуществление подобной деятельности, внести плату за оказание этой фирмой услуг. Процедура оканчивается получением акта утилизации заказчиком.

В настоящее время утилизация данных отходов осуществляется двумя способами:

1. Переработка. Отработанные детали принтеров отправляются на перерабатывающие предприятия, где картриджи чистят, ремонтируют и вновь заправляют с целью их последующей продажи уже под новым брендом.

2. Механическое и термическое разложение. Изделия подвергаются сортировке и разделению на составляющие компоненты, после чего пластиковые части измельчают и переплавляют при высокой температуре с получением вторсырья. Утилизация тонера подразумевает воздействие на него температуры в 1000°C, в процессе не происходит образование вредных соединений. Способ является экологически безопасным.

Бумага. Существуют определенные стандарты, которые нужно соблюдать при сортировке и утилизации офисной макулатуры и черновиков. Это многоэтапный процесс, целью которого является восстановление бумажного волокна и некоторых других компонентов материала, необходимых для повторного использования. Поскольку разные виды бумаги в разной степени поддаются утилизации, использованная бумажная продукция собирается и отсортировывается, доставляется в соответствующие перерабатывающие предприятия.

Люминесцентные лампы. Отработанные лампы для хранения и транспортировки необходимо поместить в упаковку из гофрокартона, в которой они находились при покупке, или обернуть мягкой бумагой, газетой. Желательно положить в герметичную тару и поставить ее туда, где они не разобьются.

Выкидывать такие лампы вместе с остальным мусором ни в коем случае нельзя. Их следует сдать в специализированную организацию, занимающуюся утилизацией ртути содержащих приборов.

Утилизация люминесцентных и других ртути содержащих ламп – довольно сложный процесс, который проводят в заводских условиях на специализированных предприятиях. Лампы дробят в вибромеханической установке, разделяя цоколи, стекло и опасное вещество люминофор. Ртуть подвергается термической возгонке в вакуумной камере, а затем вымораживанию жидким азотом. Автоматически составляющие распределяются по разным емкостям. Битое стекло захоранивают вместе с твердыми бытовыми отходами или используют в качестве заполнителя бетона. Металл идет на заводы по переплавке. В специальной герметичной таре ртуть поступает на дальнейшую переработку, где очищается и впоследствии идет на повторное производство термометров и других электронных устройств.

6.4. Защита в ЧС

Университет находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть природного характера (сильные морозы) и техногенного характера (диверсии).

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Сильные морозы, могут привести к увеличению количества аварий, связанных с нарушениями на коммунальных системах жизнеобеспечения населения (электро-, тепло-, водоснабжение), нарушений в работе транспорта.

При подготовке к зимнему сезону необходимо выполнить следующие основные мероприятия:

- Ремонт, замена оборудования, зданий и сооружений, котельных, электрических и тепловых сетей, внутренних инженерных систем зданий;
- Проверка технического состояния котлов;
- Проверка трубопроводов наружной прокладки;
- Проверка электрических сетей;
- Подготовка резервных источников питания.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи и оповещения, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве.

6.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

1. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
2. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
3. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
4. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных здания и на территории жилой застройки.
5. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.
6. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона.
7. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
8. ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследовательской работы было проведено математическое моделирование зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода в одномерной и двумерной постановке. В ходе проделанной работы были осуществлены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода.
2. Численно решена поставленная задача.
3. Изучено влияние массы топлива на изменение радиуса зажигания.
4. Изучено влияние влагосодержания ЛГМ на радиус зажигания.

По результатам исследовательской работы был найден определяющий параметр безопасности – максимальный радиус зажигания для полога леса в результате воздействия на его поверхность лучистого источника энергии в виде ОШ, образованного в результате взрыва газопровода. И установлено влияние структурных особенностей и характеристик ЛГМ на радиус зажигания, что позволяет сделать вывод о необходимости учета данных параметров при определении безопасных расстояний от газопроводов до лесных угодий. Также было проведено сравнение результатов поставленных задач. Значения радиусов зажигания при одинаковых исходных данных практически совпадают. Поэтому был сделан еще один вывод, что для расчета максимальных зон зажигания практичнее использовать одномерную постановку, т.к. результаты были получены в более короткие сроки.

Список публикаций

1. Акчина С.С., Алтамирова Э., Перминов В.А. Анализ и оценка параметров огненного шара по существующим методикам.// XXI век. Техносферная безопасность. 2018, Т. 3, №1, с. 84-94.
2. Акчина С.С. Влияние текущего состояния атмосферы на расчет интенсивности теплового излучения от «огненного шара»// Всероссийская научная конференция студентов физиков. ВНКСФ 24. Томск, 2018, 536 с.
3. Акчина С.С. Математическое моделирование зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода. Техносферная безопасность в XXI веке. VIII Всероссийская научно-практическая конференция. Сборник научных трудов магистрантов, аспирантов и молодых ученых – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. – 424 с.
4. Акчина С.С., Перминов В.А. Численное решение зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода. Всероссийская молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Все грани математики и механики»: сборник статей – Томск: Изд. Дом Томского гос. ун-та, 2019 г. – 260 с.
5. Акчина С.С. Численное решение задачи о зажигании лесного горючего материала лучистым тепловым потоком в многоярусном лесном массиве. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2019»: сборник статей – Томск: Изд. ТУСУР, 2019 г.
6. Акчина С.С., Перминов В.А. Математическое моделирование зажигания лесного горючего материала лучистым тепловым потоком в многоярусном массиве в результате разрыва газопровода. I всероссийская научно-практическая конференция «Техносферная безопасность – 2019. Современные реалии»: сборник статей – Дагестан: Изд. Даггостехуниверситет, 2019 г.
7. Акчина С.С. Численное решение задачи о зажигании лесного массива световым излучением в результате разрыва газопровода. VIII

Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее»: сборник научных трудов – Томск: Изд. ТПУ. – 378 с.

8. Акчина С.С. Численное решение задачи о зажигании лесного массива световым излучением в результате разрыва газопровода. III Международная научно-практическая конференция «Современные пожаробезопасные материалы и технологии»: сборник материалов – Иваново: Изд. ИПСА ГПС МЧС России, 2019 г. – 716 с.

Список литературы

1. Классификация и монтаж магистрального газопровода [Электронный ресурс]. / URL: <https://promzn.ru/gazovaya-promyshlennost/ustrojstvo-magistralnogo-gazoprovoda.html>, свободный, Загл. с экрана. – Яз.рус. Дата обращения: 30.03.2020 г.
2. Магистральные трубопроводы [Электронный ресурс]. / URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Магистральные_трубопроводы, свободный, Загл. с экрана. – Яз.рус. Дата обращения: 30.03.2020 г.
3. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы. М: Госстрой, 1996. – 113 с.
4. Капитонова Т.А., Стручкова Г.П. Анализ причин и последствий аварий протяженных линейных технических систем // Наука и образование. – 2014. – №2. – 4 с.
5. Куликов В. В. Огненный шар: метод. рекомендации/ В. В. Куликов, И. И. Гаврилин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2015. – 24 с.
6. William E. Martinsen and Jeffrey D. Marx. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs. 1999 International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials San Francisco, California September 28 – October 1, 1999.
7. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989. – 150–160 с.
8. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – М: Госстандарт, 2014. – 86с.
9. Методика оценки пожаробезопасных расстояний при проектировании промышленных предприятий. – М: Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2016. – 225 с.
10. Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Хайруллин И.Р., Качалкин В.А. Горение газов в огненном шаре: тезисы докладов и сообщений VI Минского

международного форума по теплообмену. – Минск, 2008. – С. 327–329.

11. Болодьян И.А. Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Анализ состояния проблемы/И.А.Болодьян, В.П.Молчанов, Ю.И.Дешевых и др. // Пожарная безопасность. – 2000.– №2. – С. 86–93.

12. Елохин А. Анализ и управление риском: теория и практика. – М.: ПолиМЕдиа, 2002. – 189 с.

13. Лисанов М.В. и др. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 7. – С. 16–22.

14. Mathematical models for the prediction of heat flux from Fire Balls/M. Skrinski, J. Skrinskyi, V. Sluka and al.// Wseas transactions on heat and mass transfer. – 2014. – Vol. 9. – P. 243–250.

15. Самые крупные аварии на трубопроводах и газопроводах Америки [Электронный ресурс] / URL: <http://rgk-palur.ru/big-accident-on-gas-oil-pipelines-in-the-us-and-canada/>, свободный, – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 03.04.2020 г.

16. Олейник А.П. Сравнительный анализ аварийности на объектах трубопроводного транспорта в России и США // Вестник РУДН. – 2016. – №4. – С. 84–90.

17. Статистические данные по авариям в России на объектах газораспределения и потребления [Электронный ресурс]. / URL: http://studbooks.net/1555969/bzhd/statisticheskie_dannye_avariyam_rossii_obektah_gazoraspredeleniya_potrebleniya, свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 03.04.2020 г.

18. ЧП на нефтегазовых предприятиях в России в 2018-2019 годах [Электронный ресурс]. / URL: <https://ria.ru/20191107/1560672660.html>, свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 03.04.2020 г.

19. Анализ риска аварий на магистральном трубопроводе, транспортирующем широкую фракцию легких углеводородов / С.И. Сумской,

А.В. Пчельников, Е.Л. Шанина, М.В. Лисанов, В.В. Зозуля// Безопасность труда в промышленности. – 2007. – №2. – С. 48-52.

20. Гимранов Ф. М. Возможные сценарии развития аварий на нефтехимических производствах// Промышленная и экологическая безопасность. – 2012. –№1. – С. 54–56.

21. Пожары и взрывы на предприятиях угледобывающей и нефтедобывающей промышленности [Электронный ресурс]. / URL: <http://poznayka.org/s59577t1.html>, свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 10.03.2018 г.

22. Анализ риска аварий на магистральных трубопроводах при обосновании минимальных безопасных расстояний [Электронный ресурс]. / URL: <http://prom-nadzor.ru/content/analiz-riska-avariy-na-magistralnyh-truboprovodah-pri-obosnovanii-minimalnyh-bezopasnyh>, свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 12.05.2018 г.

23. Савонин С.С., Москаленко А.Д. Анализ основных причин аварий, произошедших на магистральных газопроводах // Инженерная защита. – 2015. – № 11. – 7 с.

24. СТО Газпром 2-2.3-400-2009. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром». – М: Газпром, 2009. – 343 с.

25. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. – Томск: Изд.-во ТГУ, 1981. – 277 с.

26. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 239 с.

27. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.

28. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров : дис. ... док. физ.-мат. наук : 01.02.05 / Перминов Валерий Афанасьевич; [Место защиты: Томск. гос. ун-т].– Томск, 2010.– 282 с.

29. Лес [Электронный ресурс]. / URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Лес>, свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. Дата обращения: 05.04.2018 г.
30. Ходаков В.Е., Жарикова М.В. Лесные пожары: методы исследования. – Херсон: Гринь Д.С., 2011. – 470 с.
31. Барановский Н.В., Гоман П.Н. Экспериментальное исследование зажигания лесного горючего материала лучистым тепловым потоком // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – 8 с.
32. Волокитина А.В., Софронова Т.М. Картографирование растительных горючих материалов // Сибирский лесной пожар. – 2014. – №6. – С. 8–28.
33. Тушение лесных пожаров: учеб. пособие/ под ред. Служба спасения. – Архангельск. –2013. – 106 с.
34. Кузнецов В.Г., Барановский Н.В. Оценка условий зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения // Технологии техносферной безопасности. – 2011. – №4. – 9 с.
35. Касперов Г.И., Гоман П.Н. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2010. Вып. XVIII. С. 337–340.
36. Кузнецов В.Т., Фильков А.И. Воспламенение различных видов древесины потоком лучистой энергии // Физика горения и взрыва. – 2011. – №1. – С. 74–79.
37. Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Бартак М. Воспламенение и горение древесины под влиянием тепловых потоков // Физика горения и взрыва. – 1986. – Т.22, №1. – С. 10–13.
38. Determination of the Effects of Heating Mechanisms and Moisture Content on Ignition of Live Fuels / D. Weise, T. Fletcher, S. Mahalingam and al.// Joint fire science program. – 2019. – 26 p.
39. Flammability studies for wildland and wildland–urban interface fires applied to pine needles and solid polymers / A. Simeoni, J.C. Thomas, P. Bartoli and

al.// Fire Safety Journal. – 2012. – Vol. 54. – P. 203–217.

40. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров : дис. ... док. физ.-мат. наук : 01.02.05 / Перминов Валерий Афанасьевич; [Место защиты: Томск. гос. ун-т].– Томск, 2010.– 282 с.

41. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.

42. Росс Ю.К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 342 с.

43. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

44. Moukalled F. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics/ F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish //Springer International Publishing Switzerland. – 2016. – P. 791.

45. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

46. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

47. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

48. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных здания и на территории жилой застройки.

49. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.

50. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона.

51. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

52. Классификация помещений по опасности поражения током [Электронный ресурс]. / URL: <https://elektroshkola.ru/obshhie-voprosy/klassifikaciya-pomeshhenij-po-opasnosti-porazheniya-tokom/>

53. Приказ Министерства природных ресурсов РФ от 2 декабря 2002 г. № 786 (ред. от 30.07.2003) Об утверждении федерального классификационного каталога отходов.

54. ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

55. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ // Собрание законодательства РФ. 2002. № 1 (ч. 1).

Приложение А

Раздел 1.1

The phenomenon of the fireball

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM81	Акчина Суркурай Сергеевна		

Консультант ОКД:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	д.ф.-м.н.		

Консультант-лингвист ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Панамарева Анна Николаевна	к.ф.н.		

1.1. The phenomenon of the fireball

The phenomenon of the «fireball» began to be studied in detail from the second half of the 20th century after a number of major accidents occurred, followed by the formation of huge fireball and numerous victims. The sudden release of a superheated inflammable liquid (gas) from a storage tank or process vessel is the beginning of a complex event that often results in the formation of a short fireball.

The fireball is a cloud of flaming gas or vapor rising above the ground surface which can emit a large amount of radiant energy during its short life and is capable of causing serious wounds and injuries at distances several times greater, than the size of the fireball. According to Marshall, the «fireball» is a steam cloud mixed with air, but overflowing with fuel and unable, therefore, to a volumetric deflagration or detonation. When a source of ignition appears, the ignition starts to burn around its shell at the expense of ambient air. According to the All-Union State standard 12.3.047-2012 «The system of Labour Safety Standards. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control», a «fireball» is a large-scale diffusion flame of burning mass of fuel or steam cloud rising above the ground. Based on the above-mentioned definitions, we shall consider that the «fireball» is a large-scale diffusion combustion of a vapour-gas-air cloud, realized during the depressurization of the tank with an inflammable liquid, gas under pressure, liquefied gases.

After a relatively short period of time after the ignition, the hot shell of the flame begins to lift the ball of fire above the ground, resulting in an increased area of dangerous radiation exposure. As the ball of fire rises, it forms a mushroom cloud whose foot is a strong ascending convective current. Due to the thermal expansion of the envelope, the air penetrates into the fireball, increasing the size and height of the fireball during combustion, and it begins to fade by breaking into smaller gas cavities, some of which continue to burn. During the combustion of the fireball carbon or natural gas forms soot, resulting in a luminous flame with a radiative capacity close to one in hydrocarbons and less than one in natural gas. The temperature of the fireball may exceed 2000°C.

There are two scenarios for the fireball escalation:

- 1) The fuel ignition, partly mixed with the air, occurs at the initial stage of the emergency discharge, at which the rich mixture will burn in diffusion mode.
- 2) The ignition is delayed, while most of the fuel is mixed with the air, the combustion products and the involved air expand intensively and the volume of the burning cloud far exceeds the initial volume of the combustible gas.

Looking at these scenarios, it is only natural that, given the mass of fuel produced by the fireball and the resulting heat flux, the second scenario would be far more dangerous in scale and effect than the first.

In the middle of the twentieth century, Marshall gave the model of the fireball escalation at the production facility, from the origin of the accident to the point of extinction. Four main stages can be distinguished in the accident:

- 1) time from loss of pipeline tightness to the moment of ignition;
- 2) the period from the moment of ignition to the moment of exhaust;
- 3) time duration from the moment of extension to full breaking-out;
- 4) time from complete breaking-out to the extinction.

The duration of the combustion and the dimensions of the fireball shall be determined by the total mass of the liquid or gas in the container at the time of the explosion. The fuel mass involved in the formation of the fireball is an integral part of the diameter and time-of-existence equations. This mass may be the same as the mass contained inside the vessel before it is depressurized, but it may also be smaller than the original mass of the fuel. The mass of the accidental emission of flammable hydrocarbon gases may vary from 1 to 5,000 tonnes, the maximum diameter of the fireball from 50 to 800 m, and the burning time – from 6 to 100 seconds.

The form of fireball is generally considered as a sphere. Video and other random and experimental observations show that most “fireball” can be described in the form of a sphere.

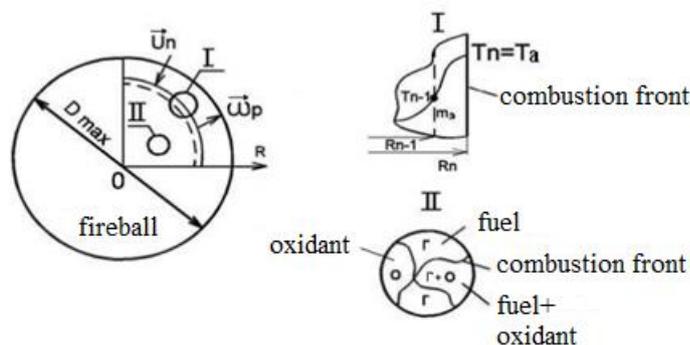


Figure 1.1 – Structure of the fireball flame

According to figure 1.1, in the first zone there is superficial combustion at the boundary of the fireball, in the second zone there is volumetric combustion of the partially mixed gas mixture. Both the first and second zones are diffuse combustion of the gas mixture, where the velocity of the mixture depends not only on mixing conditions but also on kinetic parameters. According to the classical theory of diffusion combustion of gas mixtures, the combustion front is established in those local volumes where the oxidizer and the fuel are supplied in stoichiometric terms.

Taking into account the nature of the fireball, its stage and the characteristics of its formation and existence, it can be concluded that in the phenomenon of the fireball, dangerous factors are its high temperature, its large size and its ability to move in airflows, so they can be the source of fires in their trajectory. However, the most significant is the potential danger to a person, who can be severely burned by heat even at a great distance from the fireball.

1.2. The problem of explosions forming a «fireball» in industry

The problem of explosions forming a «fireball» in industry is urgent for many countries, including the Russian Federation. In recent decades, there has been a fundamental change in industry, characterized by a change in the pattern of primary energy consumption. For all developed countries, including the Russian Federation, more than 60% of the fuel and energy balance is currently occupied by oil and gas, up from 20% in the 1930s. There is also a steady increase the shares of chemical, fire, explosive technologies that use liquefied hydrocarbon gases - propane, butane, ethylene, butylene, propylene, etc. Therefore, liquefied petroleum gases pipelines may have an explosion with fireball evolution.

There is always a risk of explosive gas and vapour-air mixtures in the processes associated with extraction, transport, processing, receipt, storage and use of combustible gases and HIL (highly inflammable liquids). Mixtures of gases with air and other oxidants (oxygen, ozone, chlorine, nitrogen oxides, etc.) and substances liable to explosive transformation (acetylene, ozone, hydrazine, etc.) can form an explosive medium.

An explosion with fireball formation can also cause a cascade of accidents and is therefore highly dangerous. Thermal radiation is one of the most dangerous effects of the main pipeline facilities in the event of a fireball accident.

1.2.1. Survey of «fireball» accidents abroad

Both in Russia and in other countries, accident data are collected at the State level in accordance with national legislation. In Russia, the regulatory body is the «Federal Service for Environmental, Technological and Atomic Supervision» (Rostehnadzor), in the United States – Office of Pipeline Safety under the Hazardous and Pipeline Materials Safety Administration, PHMSA. Collected accident data are publicly available.

Table 1.1 presents the largest fireball accidents in foreign countries over the past half century.

Table 1.1 – List of accidents with the formation of a fireball abroad

Date	Location	Fuel	Quantity, t.	Damage
1970	Crescent City, USA	Propane	275	66 wounded
1972	Tewksbury, USA	Propane	28	unavailable
1972	Lynchburg, USA	Propane	9	2 dead 5 wounded
1974	Oneonta, USA	Propane	288	25 wounded
1975	Eagle Pass, USA	Propane	18	16 dead
1978	Waverly, USA	Propane	45	16 dead 43 wounded
1979	Pazton, USA	Propane	unavailable	8 wounded
1984	Mexico City, Mex.	Propane	3000	650 dead
1984	Romeoville, USA	Propane	unavailable	15 dead 22 wounded
1996	Palermo, Italy	Propane	unavailable	5 dead 25 wounded
1998	Alberta City, USA	Propane	40	2 dead

				7 wounded
2002	Cairo, Egypt	Butane	unavailable	373 dead
2004	Washington, USA	Propane	10	10 dead
2010	San Bruno, USA	Propane	unavailable	8 dead 66 wounded
2011	Allentown, USA	Propane	unavailable	5 dead
2013	Washington Parrish, USA	Propane	unavailable	-
2016	Greensburg, USA	Propane	unavailable	1 wounded

Accidents on gas and oil pipelines in the United States are very common. The total length of all pipelines in America is 2.5 million. Hundreds of leaks and ruptures occur every year, causing many casualties in some cases. And as pipeline systems age, the risk of accidents on these lines will only increase. More than 400 cases have been recorded since the beginning of XXI century.

In the United States of America, most federal laws on pipeline safety were passed in the 1960s and 1970s, and safety standards for newly constructed lines were established. However, pipelines built earlier than this date were not subject to these regulations. The length of pipelines and the huge budget allocated for their maintenance is still a challenge, even for the US. The Integrity Management Program is a program in the United States that aims to detect and prevent pipeline malfunctions. The US Office of Pipeline Safety under the Hazardous and Pipeline Materials Safety Administration also requires pipeline operators to implement a number of safety measures aimed to significantly reduce threats to the country's main pipelines.

1.2.2. Review of accidents in the USSR/Russian Federation

On the territory of the Russian Federation, a unique system of main pipelines (MP) is laid down in terms of length and productivity. In recent years, accident statistics show a low probability of accidents resulting in injury and death. Despite this fact, there is still a possibility of MP-related accidents.

Today there is an intensive construction of new pipelines, as well as reconstruction of existing gas and oil transportation systems. Most of the system is laid or located close to settlements and forests, so the problem of security remains urgent. The high spread, the effect of fire on the environment and the public are the

most dangerous factors of accidents on the MPs transporting liquefied hydrocarbon gases. The risk of gases emission with further ignition and the creation of drifting clouds affects large radius. It is therefore of particular importance to assess the effects of accidental releases of such substances. Therefore, obtaining adequate MP hazard assessments is an important and necessary part of safety management, as confirmed by accident statistics.

Thus, in 1989, there was an explosion at MP «Messoyakh fields - Norilsk», in 1993 on MP «Ukta - Torzhok» in Yaroslavl region there was an explosion of gas and a subsequent fire of the forest massif. Another one was in 1994 in the Moscow region; there was destruction of one of the three strands of gas pipeline. In 2006, an explosion occurred at MP «Mozdok - Tbilisi» PJSC «Gazprom» because of which gas supply to Georgia was stopped. Also, in 2006 at 1473.8 km MP «Urengoy - Petrovsk» PJSC «Gazprom» in the process of preparation for in-line inspection at the supply of pressure there was a breakdown of the piston launching chamber (2 people died). In 2018 at the petrochemical plant "Synthesis-Rubber" in Bashkiria during the pipeline repair there was a fire due to the leakage of hydrocarbon - isopentane. The area of the fire was approximately 30 m² (4 people were injured). In 2019 at MP «Rosneft» because of depressurization of one of the auxiliary pipelines, there was a fire, where the flame captured the area of 10 m².

Many cases alike can be counted, but the most significant event in the history of the USSR at that time was the Ufa disaster, which caused enormous damage caused by the explosion of fireball.

In 1989, a major technological accident occurred near Ufa on the Kuibyshev railway, which took lives of 1,224 people, as well as causing various degrees heavy damage to the rest of the population. According to the statistics, in this accident the maximum number of casualties was recorded when an inflammable mixture was released into the atmosphere and ignited. The fire spread to about 250 hectares, where the area was mostly covered with dense deciduous forests.

After the accident, specialists analyzed the causes and factors of the accident. The power-operated disconnection device was located 10 km apart and the pumping

stations of the pipeline system 555 km apart. It also transpired that the pipeline was not equipped with remote control and pressure reduction alarms, which prevented the emergency section from being closed and deactivated promptly. The gas leak created a cloud of air-fuel mixture, which spread over the ground over a distance of more than 900 m and reached the railway. During the passage of two passenger trains, there was a catastrophic explosion of a cloud of fuel and air mixture due to the breakage of nearby pipeline.

After the disaster, safety requirements were tightened, and additions were made to the Construction Directives and Rules 2.05.06-85* «Main pipelines», where they significantly increased the minimum distances from main pipelines to populated areas.

Today the CDR 2.05.06-85* contains requirements that limit not only the minimum permissible distances to built-up areas, buildings, structures and environmental facilities, but also the diameter of the pipeline. As practice has shown, compliance with these requirements is not cost-effective or possible at all. In addition, the majority of the current pipeline network was built before adjustments to the CDR 2.05.06-85*. Both technical and organizational measures and the clarification of dangerous areas are used to justify deviations from the prescribed limits, as well as comparing MP crash zones with comprehensive programs and methods. It is therefore important to correctly calculate the leak mass when the pipeline is depressurized, which will then be used to calculate the maximum impact areas.

1.3. Probable accident scenarios with the formation of a «fireball»

The depressurization of equipment and pipelines in the petrochemical industry leads to the exhaustion of combustible substances, which are usually accompanied by fires and explosions. This industry is distinguished by the fact that technological systems have a large amount of products and raw materials that are explosion-resistant to fire, and the processes are carried out at high pressures and temperatures, in some cases close to critical conditions. In addition, defective processes, faulty equipment, failure of automatic control and protection systems,

maintenance errors may cause accidents. The above characteristics create a high risk of emergencies.

A fireball explosion can occur at any stage of the production cycle from mining and transportation to processing and storage. The development of new oil and gas fields, as well as their production during drilling, may result in a fire. The source of ignition may be a small spark formed by friction of a grain of sand or pebble against a metal structure, which ignites an oil or gas fountain. The firestorm has such temperature that everything that can burn will be on fire. Such fires are very difficult to extinguish: fire is poured, blanketed, brought down with directed explosions and air jets. And yet sometimes the flames burn for years. In 1985. An explosion occurred at the «Tengiz» field in Kazakhstan with the further fire occurrence. It took months to put out the fire. The flame reached almost 150 m.

The bulk of oil and gas products on the continental territories are moved by using pipelines. The number of accidents during oil and gas products transportation is increasing every year. Much of the pipeline stock is quite outdated. According to various data, 20 to 50 million tons of extracted oil and gas flows from MP annually in Russia. External corrosion and mechanical deterioration of pipelines, untimely and slow repairs, errors and defects in construction, and breaches of technical safety regulations suggest that the number of accidents will increase, will cause enormous damage to the economy of the country as well as to our ecology (figure 1.2). MP accidents often cause fires and explosions of transportable fuel products. Minimum safe distances between a high-risk object and forestland are a major concern for fire and industrial safety. Required minimum distances for construction and construction of MPs are in number of regulatory instruments. The definition of minimum safe distances in connection with the development of the MP and MGP system is therefore particularly relevant. The analysis and evaluation of accident statistics at Russian MPs shows that the loss of life are rare enough. However, the possibility of huge damage is not excluded in installation and construction near settlements, infrastructure and woodlands in the event of an accident. Minimum safe distance means the minimum allowable distance from the axis of the linear part of the main

pipeline to environmental objects (buildings, settlements, transport routes) installed to ensure the safety of people.

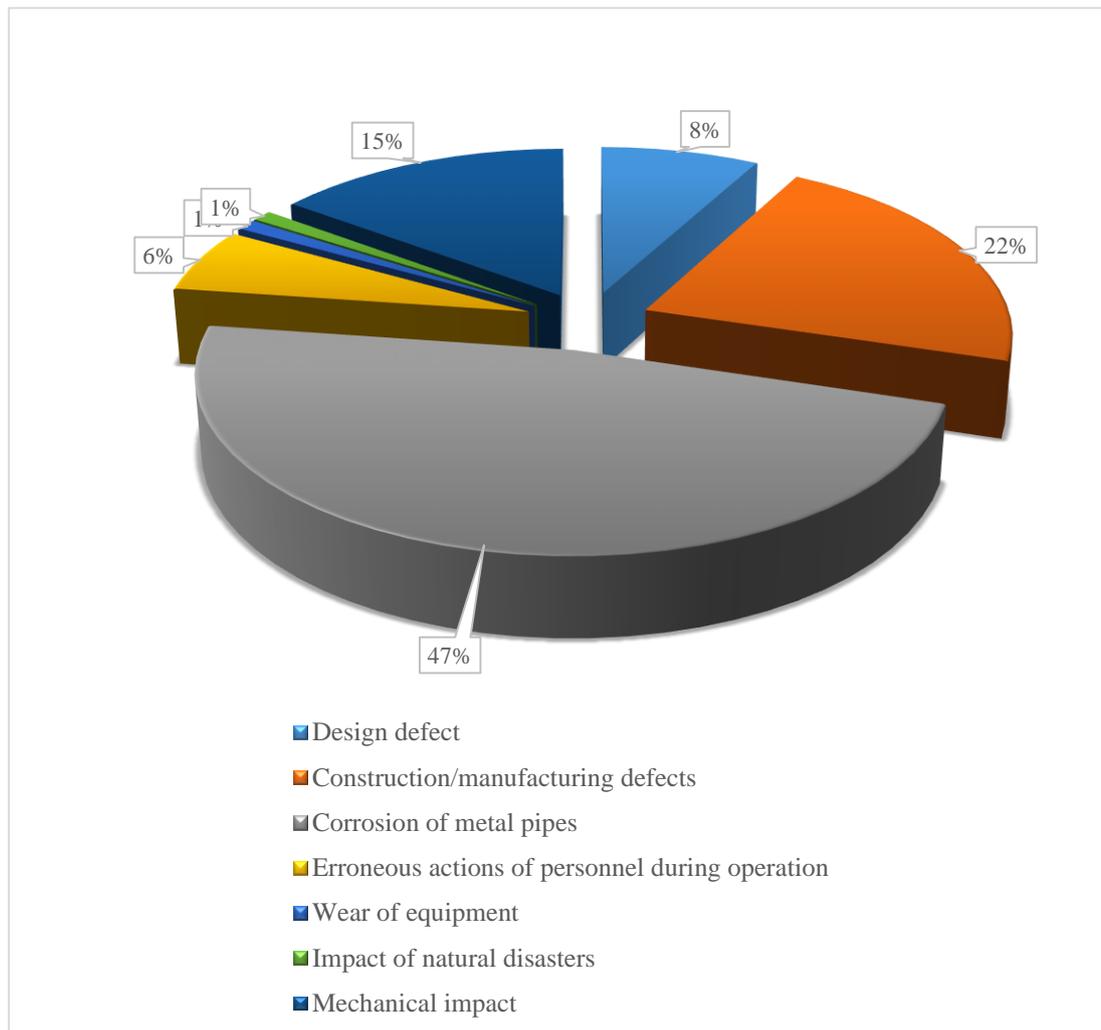


Figure 1.2 – Total distribution of accident causes per MG according to Rostekhnadzor data

Fires and explosions at oil tanks and fuel depots can also have serious consequences. The most prospective cause of accidental release or exhaustion of a combustible substance may be leakage of the equipment due to failure of the process and malfunctioning of the emergency systems and devices. When equipment is depressurized and fuel gas is released into the environment as a result of high evaporation rates, large-scale vapour clouds may be formed, depending on the amount of instantaneous gas or the rate of exhaustion, as well as climatic conditions (wind speed, air temperature).

Likely scenarios of an accident on gas pipelines

There are three typical cases of gas pipelines emergencies on gas production facilities:

- 1) Inter-dimensional manifold rupture between the Gas-Gathering Station (GGS) and the Head Structure;
- 2) Venting of the inter-field manifold of the boosting compressor station (GGS and Complex Gas Treatment Unit, CGTU) downstream of the gas flow;
- 3) Exhaustion of the gas pipeline in the cluster.

Some of the factors determining the specific scenarios of an accident on gas pipelines can contribute to the accident dynamics as shown in table 1.2 below.

Table 1.2 – Factors determining accident scenarios on field gas pipelines

Factor	The nature of the impact
Factors affecting the accident	
1. Location of the accident site relative to the starting point of the gas pipeline and linear stopcocks.	It affects the intensity and duration of gas flow from the ends of a ruptured gas pipeline.
2. Pressure in the gas pipeline (at the point of rupture) before the accident.	Determines the intensity of the gas flow, the amount of excess pressure when the compressed gas expands.
3. Time from the moment of depressurization to the closure of the emergency section.	Affects the duration of an emergency gas outflow.
4. Geometry of the relative location of the ends of the destroyed gas pipeline.	It affects the features of the dynamic interaction of the jets of the gas flowing from the two ends of the gas pipeline, and therefore, the shape of the flame during a column fire or the direction of independent burning jets during jet burning.
Factors affecting the spread of hazardous substances and energy flows in the environment	
5. Meteorological factors: wind speed and direction, atmospheric stability class, air humidity.	Determine the various options for the dispersion of the gas, set the angle and direction of the flame; humidity determines the permeability of the atmosphere to thermal radiation.
6. The surface roughness near the gap.	It affects the features of dispersion of the jet or gas loop.
7. Distribution over the territory of other hazardous facilities adjacent to the well (for example, other wells).	Affects the likelihood of a cascading accident.
8. Efficiency and literacy of the actions of personnel and emergency special services to localize the accident and its impact zones.	Affect the duration of the accident, the course of its development and the size of the zones, negative impacts.

The pipeline's technological parameters (its energy potential) and the characteristics of the ground (consistency, the presence of rocky inclusions) have an impact to the extent of the rupture and the probability of a gas emission with further ignition. Large-diameter pipelines (1200–1400 mm) have long breaks (50–70 m or more) and a high probability of gas fire (0,6–0,7).