

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность  
 Отделение контроля и диагностики

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Математическое моделирование зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода

УДК 632.187.1:622.691.48

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1E41	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
Старший преподаватель ОСГН	Николаенко Валентин Сергеевич			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева Ирина Леонидовна			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП 20.03.01 Техносферная безопасность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ларионова Екатерина Владимировна	к.х.н.		

## Результаты освоения образовательной программы по направлению 20.03.01 Техносферная безопасность

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки		
P1	Способность понимать и анализировать социальные и экономические проблемы и процессы, применять базовые методы гуманитарных, социальных и экономических наук в различных видах профессиональной и социальной деятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, 2, ОПК-2). CDIO Syllabus (2.4, 4.1, 4.2.7, 4.7). Критерий 5 АИОР (п. 2.12)
P2	Демонстрировать понимание сущности и значения информационных технологий в развитии современного общества и для ведения практической инновационной инженерной деятельности в области техносферной безопасности	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК-1). CDIO Syllabus (3.2). Критерий 5 АИОР (п. 2.5)
P3	Способность эффективно работать самостоятельно, в качестве члена и руководителя интернационального коллектива при решении междисциплинарных инженерных задач с осознанием необходимости интеллектуального, культурного, нравственного, физического и профессионального саморазвития и самосовершенствования	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-3, 5, 6, 7, ОПК-1, ОПК-3, ОПК-5, ПК-8). CDIO Syllabus (2.4, 2.5, 3.1, 3.3, 4.2), Критерий 5 АИОР (п. 2.9, 2.12, 2.14)
P4	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4, ОПК-4). CDIO Syllabus (3.2). Критерий 5 АИОР (п. 2.11)
P5	Способность применять основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования с целью выбора и оптимизации устройств, систем и методов защиты человека и природной среды от опасностей.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-8, ОПК-1, ПК-5). CDIO Syllabus (1.1, 2.1). Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.4, 2.6, 2.7, 2.8)
Профиль		
P6	Уметь выбирать, применять, оптимизировать и обслуживать современные системы обеспечения техносферной безопасности на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях, в том числе при реализации инновационных междисциплинарных проектов	Требования ФГОС ВО (ОПК-5, ПК-5, ПК-6, ПК-7). CDIO Syllabus (1.3, 2.1–2.5). Критерий 5 АИОР (п. 2.2, 2.4, 2.4, 2.6, 2.7, 2.8), требованиями проф.стандарта 40.056 Профессиональный стандарт «Специалист по противопожарной профилактике»
P7	Уметь организовать деятельность по обеспечению техносферной безопасности на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях, в том числе при реализации инновационных междисциплинарных проектов	Требования ФГОС ВО (ПК-9, ПК-10, ПК-11, ПК-12, ОПК-3, 4, 5). CDIO Syllabus (1.3, 2.1–2.5, 3.1) Критерий 5 АИОР (п. 2.6, 2.12), требованиями проф.стандарта 40.056 Профессиональный стандарт «Специалист по противопожарной профилактике»
P8	Уметь оценивать механизм, характер и риск воздействия техносферных опасностей на человека и природную среду	Требования ФГОС ВО (ПК-12, ПК-16, ПК-17). CDIO Syllabus (1.3, 2.1–2.5). Критерий 5 АИОР (п. 2.2–2.8), требованиями проф.стандартов 40.056 «Специалист по противопожарной профилактике», 40.054 «Специалист в области охраны труда»
P9	Применять методы и средства мониторинга техносферных опасностей с составлением прогноза возможного развития ситуации	Требования ФГОС ВО (ПК-12, ПК-14, ПК-15, ПК-17, ПК-18). CDIO Syllabus (1.3, 2.1–2.5). Критерий 5 АИОР (п. 2.2–2.8)

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность  
 Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 20.03.01 Техносферная безопасность  
 \_\_\_\_\_ Е.В. Ларионова  
 05.02.2018 г.

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
1E41	Акчиной Суркурай Сергеевне

Тема работы:

Математическое моделирование зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	13.06.2018 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></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». Для решения поставленной задачи использовалась общая математическая модель лесных пожаров Гришина А.М.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b></p>	<p>1) Обзор существующих теоретических и экспериментальных методов изучения зажигания полога леса в результате воздействия лучистого</p>

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

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	05.02.2018 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	д.ф.-м.н.		05.02.2018 г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Е41	Акчина Суркурай Сергеевна		05.02.2018 г.

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность  
 Уровень образования бакалавриат  
 Отделение контроля и диагностики  
 Период выполнения весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа
---------------------

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	13.06.2018 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
12.03.2018 г.	Введение 1. Литературный обзор 1.1 Природа «огненного шара»	20
26.03.2018 г.	1.2 Проблема взрывов с образованием «огненного шара» в промышленности 1.2.1 Обзор аварий связанных с образованием «огненного шара» за рубежом 1.2.2 Обзор аварий на территории СССР/Российской Федерации	10
09.04.2018 г.	1.3 Вероятные сценарии аварий на объектах повышенной опасности с образованием «огненного шара» 2. Оценка и анализ существующих методов расчета параметров «огненного шара» 2.1 Анализ существующих методов расчета параметров «огненного шара»	15
23.04.2018 г.	2.2 Влияние текущего состояния окружающей среды на изменение параметров «огненного шара» 2.3 Зажигание растительности в результате воздействия «огненного шара» при взрыве газопровода	15
07.05.2018 г.	3. Физико-математическая постановка задачи о зажигании растительного покрова и ее численное решение 3.1 Физико-математическая модель зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода 3.2 Метод решения поставленной задачи 3.3 Результаты численного решения 3.4 Оценка и анализ полученных данных	10
21.05.2018 г.	4. Разработка раздела «Финансовый менеджмент»,	10

	ресурсоэффективность и ресурсосбережение» 5. Разработка раздела «Социальная ответственность» Заключение	
	Оформление и представление ВКР	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	д.ф.-м.н.		05.02.2018

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП 20.03.01 Техносферная безопасность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ларионова Е.В.	к.х.н.		05.02.2018

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1E41	Акчина Суркурай Сергеевна

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение</b>	<b>ОКД</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	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	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических изданиях, нормативно-правовых документах; наблюдение.
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 и альтернатив проведение НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Определение потенциального потребителя результатов исследования, анализ конкурентных технических решений, SWOT-анализ.
2. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка сравнительной эффективности проекта.

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Карта сегментирования рынка услуг
2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений
3. Матрица SWOT
4. Критерии социальной и экономической эффективности

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Учёная степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Старший преподаватель ОСГН	Николаенко Валентин Сергеевич			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1E41	Акчина Суркурай Сергеевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1E41	Акчина Суркурай Сергеевна

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение</b>	<b>ОКД</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	20.03.01/20.04.01 Техносферная безопасность

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения

*Исследование математической модели зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода за ПК. Область применения: в нефтехимической промышленности при проектировании и строительстве газопроводов, прогнозирование ущерба.*

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

**1. Производственная безопасность**

1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности.  
1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности.

1.1. Воздействие на оператора вредных факторов, таких как, неблагоприятный микроклимат, недостаточная освещенность рабочей зоны, повышенный уровень шума на рабочем месте, напряженность и монотонность трудового процесса.  
1.2. Воздействие на оператора опасных факторов: электробезопасность (статистическое электричество, отсутствие заземления), пожаробезопасность.

**2. Экологическая безопасность:**

Загрязнение окружающей среды токсичными веществами при утилизации ПК.

**3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:**

Возможны возгорания вследствие короткого замыкания из-за ошибки оператора и нарушения целостности электрических проводов. Наиболее типичным ЧС будет пожар. Превентивными мероприятиями являются установка заземлителей, наличие плана



	эвакуации на месте работы оператора
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева Ирина Леонидовна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Е41	Акчина Суркурай Сергеевна		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 97с., 24 рис., 11 табл., 61 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» с учетом структурных особенностей и характеристик лесных горючих материалов (ЛГМ).

**В результате исследования были получены:** 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.

**Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики:** данная программа позволяет, 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.

## **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.....	15
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	17
1.1 Природа «огненного шара» .....	17
1.2 Проблема взрывов с образованием «огненного шара» в промышленности .....	20
1.2.1 Обзор аварий связанных с образованием «огненного шара» за рубежом .....	21
1.2.2 Обзор аварий на территории СССР/Российской Федерации.....	23
1.3 Вероятные сценарии аварий на объектах повышенной опасности с образованием «огненного шара».....	28
2. ОЦЕНКА И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ «ОГНЕННОГО ШАРА» .....	33
2.1 Анализ существующих методов расчета параметров «огненного шара» .	33
2.2 Влияние текущего состояния окружающей среды на изменение параметров «огненного шара».....	41
2.3 Зажигание растительности в результате воздействия «огненного шара» при взрыве газопровода.....	44
3. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ЗАЖИГАНИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И ЕЕ ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ .....	52
3.1 Физико-математическая модель зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода.....	52
3.2 Метод решения задачи .....	57
3.3 Результаты численного решения.....	60
3.4 Оценка и анализ полученных данных .....	68
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И	

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	70
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	71
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	71
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений .....	73
4.1.3 SWOT-анализ .....	75
4.2 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	77
4.2.1 Оценка социальной эффективности исследования.....	78
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	79
5.1 Производственная безопасность .....	79
5.2 Экологическая безопасность .....	85
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	86
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	90
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	91

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний момент протяженность газопроводов составляет десятки тысяч километров по всему миру. Такая большая протяженность представляет потенциальную опасность для объектов окружающей среды, находящихся вблизи газопроводов. Поэтому их безопасная эксплуатация является одной из актуальных проблем в наше время. Аварии, возникшие на объектах магистрального газопровода (МГ), могут привести к большим экономическим потерям и нанести значительный ущерб окружающей среде.

Целью данного исследования является определение максимального радиуса 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 текущего состояния и характеристик полога леса на изменение радиуса зажигания.
4. Изучение термических и физико-химических параметров на верхней границе полога леса в начальный момент зажигания.
5. Изучение влияния влагосодержания ЛГМ на радиус зажигания.
6. Оценка и анализ полученных результатов.

Объектом исследования в данной работе является процесс зажигания полога леса 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.

Ранее в данной исследовательской области были рассмотрены модели аварий меньших масштабов, и изучалось влияние лишь влагосодержания ЛГМ на изменение радиуса зажигания. Не затрагивалось влияние структурных особенностей и характеристик ЛГМ, а также особенности среды, в которой происходит тепловое излучение.

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



# 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Природа «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 [1]. По мнению Маршалла [2] «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» [3], «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 [4].

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 [2]. 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 [5].

Развитие ОШ может осуществляться по двум сценариям. Согласно первому сценарию зажигание топлива, которое частично перемешано с воздухом, происходит на начальной стадии аварийного выброса, при котором богатая смесь будет гореть в диффузионном режиме. По второму сценарию зажигание происходит с задержкой, при этом 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 [4].

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 [2]:

- 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 [1]. 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 [6]

Форму ОШ в основном рассматривают в виде сферы. Видео и другие случайные и экспериментальные наблюдения показывают, что большинство ОШ допустимо описывать в форме сферы [1].

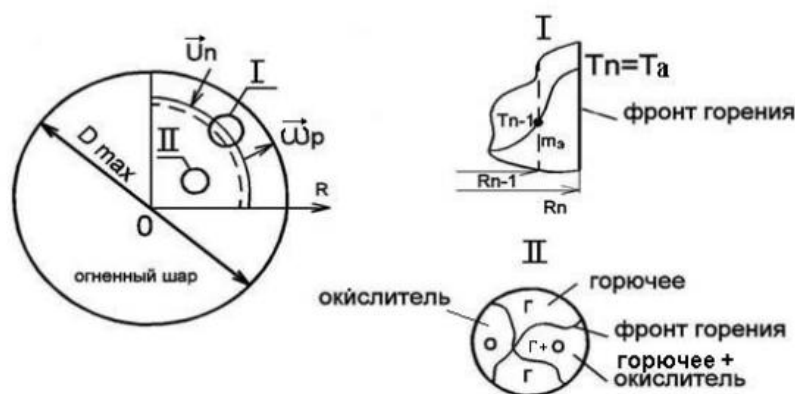


Рисунок 1.1 – Структура пламени ОШ [6]

Согласно рисунку 1.1 в первой зоне происходит поверхностное горение на границе ОШ, во второй зоне – объемное горение частично перемешанной газовой смеси. В обеих зонах происходит диффузионное горение газовой смеси, 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 [6].

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. Одно из изменений в промышленности стало появление и постоянное увеличение доли химически-, пожаро-, взрывоопасных технологий, использующих сжиженные газы, прежде всего углеводородные – пропан, бутан, этилен, бутилен, пропилен и др. [7,8]. Поэтому на газопроводах, транспортирующие сжиженные углеводородные газы (СУГ), может произойти с взрыв с образованием ОШ.

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 технологических установках всегда представляют опасность масштабного развития аварий, в особенности при больших плотностях энергоносителей на производственных площадях [9]. 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 [10]

В таблице 1.1 представлены данные по самым крупным авариям и катастрофам с образованием ОШ в зарубежных странах за последние полвека.

Таблица 1.1 – Список аварий с образованием ОШ за рубежом [11]

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

Продолжение таблицы 1.1

Дата	Место аварии	Вещество	Масса вещества, т	Ущерб, чел
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	Ромеовилль, 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 [12].

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 [12]. В течение последнего десятилетия Управление по безопасности трубопроводов и опасным материалам Министерства транспорта США потребовало от операторов трубопроводов реализации ряда программ по безопасности, которые нацелены

на существенное снижение угроз на трубопроводных системах страны. Осуществляется Программа управления целостностью – Integrity Management Program (IMP), направленная на выявление и предотвращение нарушений в работе трубопроводов [13].

### **1.2.2 Обзор аварий на территории СССР/Российской Федерации**

На территории нашей страны проложена уникальная по протяженности и производительности система магистральных трубопроводов (далее МТ). Несмотря на то, что статистика аварийности в последние годы показывают низкую вероятность возникновения аварий, приводящих к гибели людей, все равно в настоящее время существует вероятность возникновения экстренных аварийных ситуаций, связанных с эксплуатацией МТ, которые при аварийном выбросе могут образовывать облака топливно-воздушных смесей, характеризующиеся способностью перемещаться на большие расстояния с сохранением способности к воспламенению [13].

Так в 1989 г. произошел взрыв на трубопроводе «Мессояхские месторождения – Норильск», в 1993 г. на газопроводе «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» произошел взрыв, вследствие которого была прекращена подача газа в Грузию. Также в 2006 году на 1473,8-м км. МГ «Уренгой – Петровск» ООО «Пермтрансгаз» ОАО «Газпром» в процессе подготовки к проведению работ по внутритрубной диагностике при подаче давления произошло разрушение камеры запуска поршня вследствие чего погибли два человека [14]. Таких случаев можно насчитать очень много, но самым значительным происшествием в истории тогда еще СССР стала Уфимская катастрофа, нанесящая колоссальный ущерб, причиной которого стал взрыв с образованием ОШ.

### *Оценка и анализ Уфимской катастрофы*

В 1989 году около Уфы произошла крупнейшая в истории России и СССР железнодорожная катастрофа. В момент прохождения двух пассажирских поездов произошёл катастрофический взрыв облака топливно-воздушной смеси, образовавшейся в результате аварии на проходящем рядом трубопроводе, по которому сжиженный газ перекачивался из Западной Сибири в европейскую часть Советского Союза. Возникший при взрыве пожар охватил территорию около 250 га [15].

*Причины.* Причиной катастрофы под Уфой является объемный взрыв газа, который диффундировал из трубопровода через трещину длиной 1.7 метра, вдоль которой проходят пути Транссибирской магистрали. В наше время затруднительно сказать, отчего вспыхнула газовая смесь, и до сих пор идут споры о том, что привело к образованию трещины в трубе и утечке газа [16]. Однако, по мнению многих специалистов, непосредственной причиной взрыва стала случайная искра, проскочившей между пантографом (токоприемником) и контактным проводом, также искра могла образоваться в любом другом узле электровозов. Есть и другая версия, что газ взорвался от сигареты, но большинство специалистов склоняются к первой версии вспышки газа.

Установить саму причину утечки газа из трубопровода оказалось гораздо сложнее. По официальной версии трубопровод был поврежден от экскаваторного ковша во время строительства в октябре 1985 года, и под воздействием постоянных нагрузок в месте повреждения возникла трещина. Согласно этой версии трещина в трубопроводе открылась всего за 40 минут до аварии, и за это время в низине скопилось довольно большое количество газа. По другой версии, утечка газа началась еще за две-три недели до катастрофы. Сначала в трубе возник микросвищ – небольшое отверстие, через которое началась утечка газа. Со временем отверстие расширилось, и выросло в длинную трещину. Появление свища было вызвано, возможно, коррозией, возникшей в результате электрохимической реакции под воздействием «блуждающих токов» от железной дороги.



Также существует несколько факторов, которые связаны с возникновением аварийной ситуации и способствовали такому масштабному развитию аварии. В первую очередь, были нарушены нормы при строительстве и эксплуатации трубопровода. Изначально он задумывался, как нефтепровод диаметром 750 мм, однако позднее, когда трубопровод был фактически построен, он был перепрофилирован в продуктопровод для транспортировки сжиженной газобензиновой смеси. Делать этого нельзя было, но это было проигнорировано. [16]. Еще одним фактором, связанным с аварией, является погодные условия в день катастрофы. По словам очевидцев и пострадавших, в этот день было очень жарко, погода была солнечная и безветренная, на улице стояла 30 °С жара. Взрывоопасная смесь скопилась в низине и поезда входили уже в полностью загазованную зону, где для мощного взрыва было достаточно маленькой искры [17].

Полная протяженность трубопровода составляла 1852 км, из которых 273 км пролегали в непосредственной близости от железных дорог. Кроме того, объект в целом ряде случаев опасно сближался с населенными пунктами, включая довольно крупные города. Например, на участке с 1428-го по 1431-й км трубопровод «Сибирь – Урал – Поволжье» прошел менее чем в километре от башкирской деревни Средний Казаяк. Специальный обвод вокруг деревни начали строить только в следующем году после обнаружения грубых нарушений норм безопасных расстояний. В октябре 1985 года во время проведения земляных работ при вскрытии ПК-1086 на 1431-м километре его длины получил значительные механические повреждения. Более того, после окончания сооружения обвода изоляция вскрытого и оставленного открытым участка в нарушение строительных норм проверена не была [18].

Как утверждают специалисты, этой страшной аварии можно было избежать. Еще за несколько дней машинисты, проезжавшие по данным путям, сообщали о повышенной загазованности, однако данные сообщения были проигнорированы. Также на данном участке трубопровода за несколько часов до аварии упало давление газа, однако проблема была разрешена просто –

увеличением подачи газа, что, как теперь понятно, лишь усугубило ситуацию. В итоге об утечке никто не узнал, и вскоре прогремел взрыв [19].

*Последствия.* По разным оценкам, сила взрыва составляла от 250–300 (официальная версия) до 12 000 тонн тротилового эквивалента. Свет от взрыва было видно на расстоянии до 100 км, ударной волной выбило стекла во многих домах поселка Аша, которое находилось на расстоянии 11 км от места взрыва. В результате было разрушено порядка 350 метров железнодорожных путей и 3-х км контактной, повреждено около 17 км воздушных линий связи. Повреждения получили два локомотива и 37 вагонов, из которых 11 вагонов были сброшены с путей ударной волной. Почти все вагоны выгорели, многие из них были смяты, у части вагонов отсутствовала крыша и обшивка. Из-за взрыва начался пожар, охвативший территорию свыше 250 гектар. Повреждения получил и трубопровод. После катастрофы было принято решение не восстанавливать его, и вскоре он был ликвидирован [19].

Железнодорожная катастрофа унесла жизнь 575 человек, из них 181 ребенок. Еще 623 человека получили серьезные травмы, и впоследствии остались инвалидами различной категории. На месте взрыва погибло 258 человек, но никто не знает точных цифр погибших, которые остались под восстановленным железнодорожным полотном. Еще 317 человек умерло в больницах в течение нескольких дней после аварии. Многие люди получили ожоги 100% поверхности тела, переломы и другие повреждения, поэтому шансы на выживание были минимальными. На мемориале на месте катастрофы выбиты 675 имен, а по неофициальным данным, погибли около 780 человек [19].

*Выводы.* Большое количество ошибок, допущенных начиная с этапа строительства, игнорирование технических проблем, нарушение безопасных расстояний являются самыми главными причинами этой катастрофы. Были нарушены нормы эксплуатации трубопроводов – на трубе отсутствовали датчики контроля утечек, не проводился и визуальный осмотр инженерами. Но опаснее было другое: трубопровод на своем протяжении имел 14 опасных

сближений (менее 1 километра) и пересечений с железными и автомобильными дорогами. Проблемный трубопровод демонтировали, однако проблема не была решена. Для предотвращения аварий на газопроводах с образованием ОШ должен вестись мониторинг, но решение этой проблемы затруднительно, ведь в стране проложены десятки тысяч километров трубопроводов, и за каждым метром этих труб невозможно уследить.

Одним из наиболее эффективных способов обеспечения безопасности людей является соблюдение определенной дистанции – их удаление от опасного источника на необходимое расстояние. После Уфимской катастрофы 1989 г. в СНиП 2.05.06-85\* «Магистральные трубопроводы» был внесен ряд изменений, повлекшие за собой приостановку проектирования и строительства новых продуктопроводов сжиженных углеводородных газов. Следствие этой катастрофы - десятикратное увеличение нормативных значений безопасных расстояний от МТ СУГ до объектов с присутствием людей. Таким образом, установление минимальных безопасных расстояний до объектов инфраструктуры при проектировании МТ СУГ является одной из ключевых задач промышленной безопасности в свете государственного Плана развития газо- и нефтехимии России до 2030 г. [13].

Однако действительно существенные шаги для предотвращения подобных катастроф в будущем были сделаны спустя 15 лет после этой аварии. В 2004 году ОАО «Газпром» разработало систему контроля переходов МТ через дороги, которая с 2005 года и по сегодняшний день внедряется на трубопроводах России [19].

Еще в первой половине XX века начали говорить о концепции «безопасных расстояний», которая основана на анализе аварий. Для оценки безопасных расстояний применяли два подхода: прагматический, основанный на исследовании произошедших аварий и определяет приблизительные расстояния, исходя из местоположения убитых, пострадавших с различными степенями тяжести поражения и тех, кто укрылся от опасности; теоретический, заключающийся в вычислении размеров ОШ и интенсивности излучения на

заданных расстояния, чтобы прогнозировать физиологические эффекты от теплового потока [2]. Второй подход до сих пор используется в наше время. Для того чтобы не допустить возникновения катастрофы такого масштаба еще раз требуется соблюдать безопасные расстояния.

### **1.3 Вероятные сценарии аварий на объектах повышенной опасности 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. Характерной особенностью данной отрасли является наличие в технологических системах больших объемов взрывопожароопасных продуктов и сырья, ведение технологических процессов при высоких давлениях и температурах, в ряде случаев близких к критическим показателям. Кроме этого, имеет место несовершенство технологических процессов, возможны неисправности применяемого оборудования, отказы систем автоматического управления и защиты, ошибки обслуживающего персонала и т.д. Все это создает высокий риск возникновения аварий [20].

Взрыв с образованием ОШ может произойти на любом этапе производственного цикла от добычи и транспортировки до переработки и хранения. Очень опасны пожары на объектах нефтегазодобывающей промышленности и на нефтяных месторождениях во время разведочного бурения, когда от искры, образованной в результате трения песчинки или гальки о металлические конструкции, 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. Только через несколько месяцев удалось потушить пламя в очаге пожара, достигавшее высоты почти 150 м [21].

Основная доля нефтегазопродуктов на континентальных территориях государства перемещается с использованием трубопроводного транспорта. Количество аварийных ситуаций при транспортировке нефтегазопродуктов ежегодно возрастает. Значительная часть трубопроводного фонда довольно устарела. Ежегодно в России из магистральных трубопроводов вытекает, согласно различным оценкам, от 20 до 50 млн. т добываемой нефти. Наружная коррозия трубопроводов, медленные темпы их капитального ремонта, дефекты в строительстве, нарушения правил технической безопасности дают все основания предполагать, что число аварий будет возрастать, а это, в свою очередь, может привести к огромным экономическим потерям и экологическим бедствиям. Зачастую аварии на трубопроводном транспорте вызывают возникновение пожаров и взрывов транспортируемых топливных продуктов. Одна из основных проблем обеспечения промышленной и пожарной безопасности является установление минимальных безопасных расстояний между объектами повышенной опасности и окружающей среды. Требования к обоснованию минимальных безопасных расстояний, в том числе на основе моделирования и расчета последствий аварий, содержатся в ряде нормативных правовых документов. Особенно актуальна задача определения минимальных безопасных расстояний в связи с развитием системы МТ и МГ. Анализ аварийности показывает, что аварии с гибелью людей на российских трубопроводах достаточно редки, однако в условиях их прокладки вблизи населенных пунктов, объектов производственной и транспортной 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].

Также тяжелые последствия могут вызвать пожары и взрывы, которые возникают на нефтехранилищах и складах горючего материала. Наиболее

вероятной причиной аварийного выброса или истечения продукта является нарушение герметичности оборудования в результате несоблюдения технологического процесса и неисправности противоаварийных систем и устройств. При разгерметизации оборудования и выходе СУГ в атмосферу 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].

#### *Каскадное развитие аварии*

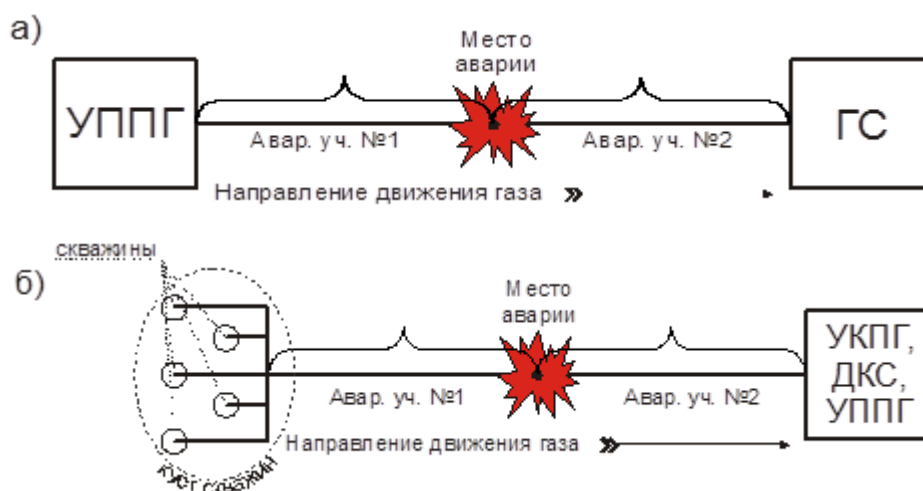
Каскадное развитие аварии представляет собой неблагоприятный сценарий развития аварийной ситуации, при котором возможен выход поражающих факторов аварии за пределы аварийного блока, оборудования или объекта и вовлечение опасного вещества, находящегося в расположенном рядом неаварийном оборудовании, в последующую стадию развития аварии.

Каскадное развитие аварии характеризуется смещением ряда возможных сценариев аварий в сторону наиболее неблагоприятных факторов и явлений, а именно: огненный шар, загазованность или дрейф с последующим взрывом облака большой массы топливно-воздушной смеси, дрейф облака токсичного вещества значительной массы [23].

#### *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 1.2 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 1.2 б);



**Рисунок 1.2 – Типовые случаи аварийных разрывов**

**а) разрыв межпромыслового, магистрального газопровода;**

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

На динамику аварии могут способствовать некоторые факторы, определяющие конкретные сценарии аварии на газопроводах, приведены ниже в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Факторы, определяющие сценарии аварии на промысловых газопроводах [24]

Фактор	Характер влияния
Факторы, влияющие на «функцию источника»	
1. Расположение места аварии относительно начальной точки газопровода и линейных запорных кранов.	Влияет на интенсивность и продолжительность истечения газа из концов разорвавшегося газопровода.
2. Давление в газопроводе (в месте разрыва) до аварии.	Определяет интенсивность истечения газа, величину избыточного давления при расширении сжатого газа.
3. Время от момента разгерметизации до перекрытия аварийной секции.	Влияет на продолжительность аварийного истечения газа.
4. Геометрия взаимного расположения концов разрушенного газопровода.	Влияет на особенности динамического взаимодействия струй истекающего из двух концов газопровода газа, а следовательно, на форму пламени при колонном пожаре или направление независимых горящих струй при струевом горении.
Факторы, влияющие на распространение опасных веществ и потоков энергии в окружающей среде	
5. Метеорологические факторы: скорость и направление ветра, класс стабильности атмосферы, влажность воздуха.	Определяют различные варианты дисперсии газа, задают угол и направление наклона пламени; влажность воздуха определяет проницаемость атмосферы для тепловой радиации.

Продолжение таблицы 1.2

Фактор	Характер влияния
6. Шероховатость поверхности вблизи места разрыва.	Влияет на особенности рассеивания струи или шлейфа газа.
7. Распределение по территории других опасных объектов, прилегающей к скважине (например, других скважин).	Влияет на вероятность возникновения каскадного развития аварии.
8. Оперативность и грамотность действий персонала и аварийных спецслужб по локализации аварии и зон ее воздействия.	Влияют на продолжительность аварии, ход ее развития и размеры зон, негативных воздействий.



## **2. ОЦЕНКА И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ «ОГНЕННОГО ШАРА»**

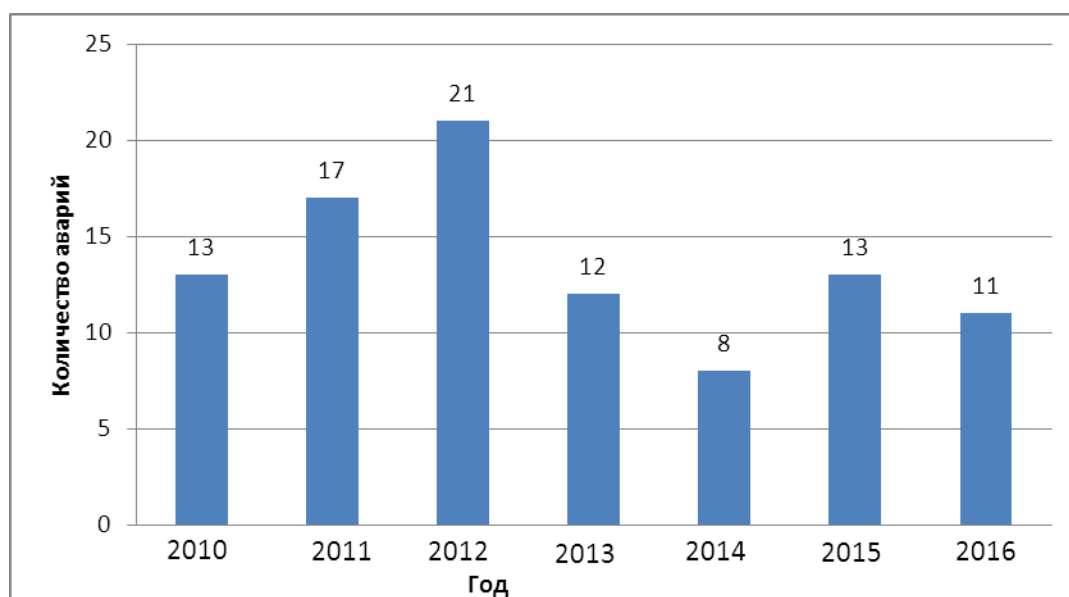
### **2.1 Анализ существующих методов расчета параметров «огненного шара»**

На сегодняшний день общая протяженность линейной части МТ в Российской Федерации составляет более 266,4 тыс. км, из которых магистральные газопроводы – 188,4 тыс. км. Более 7000 поднадзорных Ростехнадзору объектов в настоящее время эксплуатируется в системе магистрального трубопроводного транспорта. Специфика эксплуатации трубопроводного транспорта напрямую связана с риском развития аварий [25].

Разрыв газопровода с образованием ОШ представляет собой один из вероятных сценариев развития аварий. Газопровод, как правило, проходит по безлюдным и незастроенным территориям, а что самое опасное, он также может пролегать вблизи отдаленных населенных пунктов, лесных массивов и иных незащищённых объектов ОС. В случае разрыва газопровода одним из основных поражающих факторов является тепловое излучение, под воздействием которого люди, оказавшиеся в радиусе поражения, могут получить серьезные травмы, а здания различные разрушения, как и в целом, окружающая среда, прилегающая к эпицентру взрыва территории. Облако пара, смешанное с воздухом, но с преобладанием горючего вещества, не способное объемно детонировать, начинает гореть вокруг своей внешней оболочки и вытягивается, образуя ОШ. Такие ОШ крайне опасны, они излучают тепло, которое может причинить смертельные ожоги наблюдателям, а также вызвать пожары [2].

Согласно годовому отчету о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2016 году количество аварий на газопроводах на территории РФ за 2015 и 2016 год составило 10 и 9 соответственно [25].

Ниже на рисунке 2.1 представлена динамика аварийности и производственного травматизма за 2010–2016 гг. на опасных производственных объектах магистрального газопроводного транспорта на территории РФ[25].



**Рисунок 2.1 – Динамика аварийности магистрального газопроводного транспорта за 2010–2016 гг.**

За последние несколько лет наиболее социально значимая авария (учитывая высокую плотность дачных застроек, транспортную и инженерную инфраструктуры района) произошла 29 апреля 2016 года на 5.6 км магистрального газопровода «Белоусово – КГМО», эксплуатируемого ООО «Газпром трансгаз Москва». В режиме эксплуатации этого магистрального газопровода произошло разрушение трубной секции диаметром 820 мм с утечкой и возгоранием газа. Материальный ущерб от аварии составил 14 490 тыс. рублей [25].

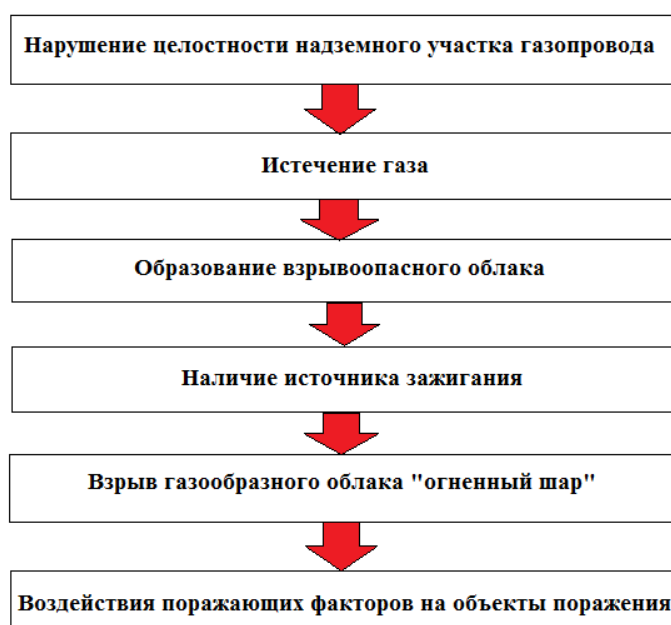
Согласно методике анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» СТО Газпром 2-2.3-400-2009 [24] с учетом основных физических проявлений аварий и сопутствующим им поражающих факторов рассматриваются 2 сценария развития аварии на промысловых газопроводах:

- 1) разрыв газопровода с воспламенением газа и образованием струевых пламен или колонного пожара в грунтовом котловане (поражающие

факторы: разлет осколков, воздушная волна сжатия, скоростной напор струи газа, прямое воздействие пламени, тепловое излучение);

2) разрыв газопровода без воспламенения газа, который истекает в виде свободной(ых) струи(й) из концов разрушенного газопровода или в виде колонного шлейфа из грунтового котлована (поражающие факторы: разлет осколков, воздушная волна сжатия, скоростной напор струи газа, загазованность).

Мы рассмотрим первый сценарий аварии, а именно разрыв газопровода с воспламенением газа. Основные этапы развития аварии представлены в виде схемы на рисунке 2.2 [26]:



**Рисунок 2.2 – Этапы развития аварии на газопроводе**

В настоящее время существует более десятка различных методик определения основных параметров взрыва по типу ОШ, большая часть из них описана в исследовательских работах, другие описывают расчет в ГОСТИрованных документах[3,27], стандартах организаций[24], методических руководствах[5]. В основе этих методов лежат различные модели нахождения основных параметров ОШ. Под основными параметрами, определяющими масштабы и последствия подразумеваются диаметр ОШ ( $D_{ОШ}$ ), время существования ОШ ( $t_{ОШ}$ ) и интенсивность теплового излучения ( $q_{ОШ}$ ).

Главной исходной информацией для нахождения основных параметров ОШ является масса горючего вещества (продукта поступившего в окружающее пространство [3,27], масса топлива [24]). Также не менее важными исходными данными для расчета является информация о соотношении горючего вещества и окислителя.

Теперь перейдем к более подробному рассмотрению основных параметров. Формула для нахождения диаметра ОШ в большинстве существующих методиках [3,5,24,27] представляется в виде следующего уравнения:

$$D_{\text{ОШ}} = Km^{1/3} \quad (1)$$

В этой формуле помимо массы горючего вещества на значение диаметра ОШ влияют также внешние условия, физический смысл которых представлен в уравнении через коэффициент  $K$ . При выводе этого коэффициента исследователи учитывают температуру окружающей среды, температуру самой смеси, давление смеси, энтальпию и также соотношение массы горючего вещества и окислителя [5].

При проведении экспериментов различных исследователей [28–35] в качестве горючего вещества ими были использованы различные горючие жидкости, такие как пропилен, пентан и октан с различной массой в диапазоне от 3.1 до 5000 кг, таким образом, поставленные эксперименты и модели в них были различных масштабов.

К примеру, Хай [30] использовал керосин в качестве горючего массой от 1 до 5000 кг и вывел следующее уравнение:

$$D = 6,2m^{0,32} \quad (2)$$

Харди и др. [31,32] использовали в качестве горючего пропан и метан до 220 кг и получили такое уравнение:

$$D = 6,24m^{1/3} \quad (3)$$

Анализируя экспериментальные данные различных авторов [28–35], а также данные по результатам произошедших аварий с образованием ОШ, можно заключить, что для оценки максимального диаметра ОШ для широкого

диапазона величины выпускаемого газа и, в особенности, для больших масс (десятки и сотни тонн) можно рекомендовать использовать для расчета следующую формулу:

$$D = 5,8m^{1/3} \quad (4)$$

Информация о длительности основных стадий формирования ОШ необходима специалистам для достоверной оценки его поражающего действия. Выделяют несколько стадий формирования ОШ: время горения топлива, время достижения максимальных размеров, время подъема и время существования ОШ [5].

Среди исследователей в определении времени существования ОШ существуют широкие расхождения. Их причины кратко рассматриваются в работе [33], в которой отмечается, что корреляция распадается на два класса. Для нахождения  $t$  используются ниже представленные формулы 5,6.

В первом варианте рассматривается случай вероятной аварии с вовлеченной массой горючего вещества до 1000 кг:

$$t \approx m^{1/6} \quad (5)$$

Второй представлен экспериментами с ракетным топливом:

$$t \approx m^{1/3} \quad (6)$$

Хай [30], используя длительность свечения ОШ за счет теплового излучения, образовавшегося от горения ракетного топлива, вывел следующее уравнение:

$$t = 0,49m^{0,320} \quad (7)$$

Робертс [34] на основании систематизации данных по суммарной продолжительности существования ОШ делает заключение, что для массы горючего вещества более 5 кг лежат между границами, определяемыми следующими уравнениями:

$$t = 0,45m^{1/3} \quad (8)$$

$$t = 0,90m^{1/3} \quad (9)$$

Для маломасштабных опытов Фэй [35] получил:

$$t = 2,53m^{1/6} \quad (10)$$

а Харди[32] для метана:

$$t = 2,57m^{1/6} \quad (11)$$

Анализ моделей предложенных разными авторами [30,32,34,35] в результате показывает, что для определения времени существования ОШ для горючих веществ менее 100 кг можно пользоваться формулой:

$$t = 1,01m^{0,1} \quad (12)$$

а для больших масс более 100 кг будет справедливо следующее уравнение:

$$t = 0,45m^{1/3} \quad (13)$$

Для определения поражающего действия ОШ нам необходимо уметь, в первую очередь, оценивать величину теплового потока с поверхности ОШ, далее уметь вычислить интенсивность теплового излучения уже на цели. И завершающим этапом для специалиста определение согласно нормативным документам (далее НД) безопасных расстояний от места взрыва до вероятной цели.

$$q = E_f F_q \tau \quad (14)$$

Представленная выше формула (14) для нахождения интенсивности теплового потока на цели в НД [3,27] находится с учетом следующих параметров: среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени ( $E_f$ ), угловой коэффициент облученности ( $F_q$ ) и коэффициент пропускания атмосферы ( $\tau$ ).

Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени по ГОСТИрованным расчетным методикам берется табличным значением. В ранее используемом ГОСТе 98 года [27] она равна 450 кВт/м<sup>2</sup>, в актуальном ГОСТе 2012 [3] ее значение рекомендуется брать равным 350 кВт/м<sup>2</sup>. В методических пособиях [5,24] она считается более подробно для каждого вещества с учетом низшей теплоты сгорания, а также доли энергии теплового излучения, массы

топлива, времени существования ОШ и расстояния от поверхности ОШ до облучаемого объекта.

Угловой коэффициент облученности в разных НД[3,24,27] считается по разным формулам, приведенные ниже (15,16,17):

Ранее используемый ГОСТ Р 12.3.047-98 [27]

$$F_q = \frac{H/D_s + 0,5}{4[(H/D_s + 0,5)^2 + (r/D_s)^2]^{1,5}} \quad (15)$$

Актуальный ГОСТ Р 12.3.047-2012 [3]

$$F_q = \frac{D_s^2}{4[H^2 + r^2]} \quad (16)$$

СТО Газпром [24]

$$\varphi = \left( \frac{r_{\text{ОШ}}}{r_{\text{ОШ}} + S} \right)^2 \quad (17)$$

Как мы видим, в ГОСТИрованном документе [3,27] для нахождения коэффициента облученности используются одни и те же параметры, как в старой редакции ГОСТа 98, так и в действующем сейчас ГОСТе 2012: высота центра ОШ ( $H$ ), эффективный диаметр ОШ ( $D_s$ ) и расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром ОШ ( $r$ ). А в СТО Газпром [24] должны быть известны параметры, как радиус ОШ ( $r_{\text{ОШ}}$ ) и расстояние от поверхности ОШ до облучаемого объекта ( $S$ ).

Большая часть существующих и рассмотренных выше моделей для нахождения интенсивности теплового излучения на цели учитывают текущее состояние атмосферы, которое выражается через коэффициент пропускания атмосферы.

В источнике [3,27] нахождение коэффициент пропускания атмосферы осуществлялось и осуществляется по следующей формуле:

$$\tau = \exp \left[ -7 \times 10^{-4} \left( \sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_s}{2} \right) \right] \quad (18)$$

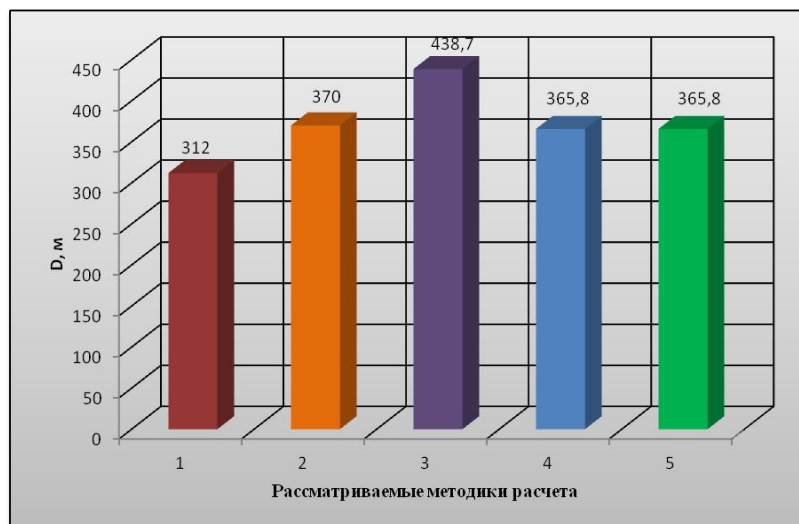
Также есть другой вариант расчета данного коэффициента, представленный в источниках [5,24], в котором учитывается также относительная влажность воздуха:

$$v = a - 0,12lg(r) \quad (19)$$

Ниже на рисунках 2.3–2.5 представлены данные по основным параметрам ОШ, полученные различными расчетными методами в ГОСТИрованных и исследовательских работах.

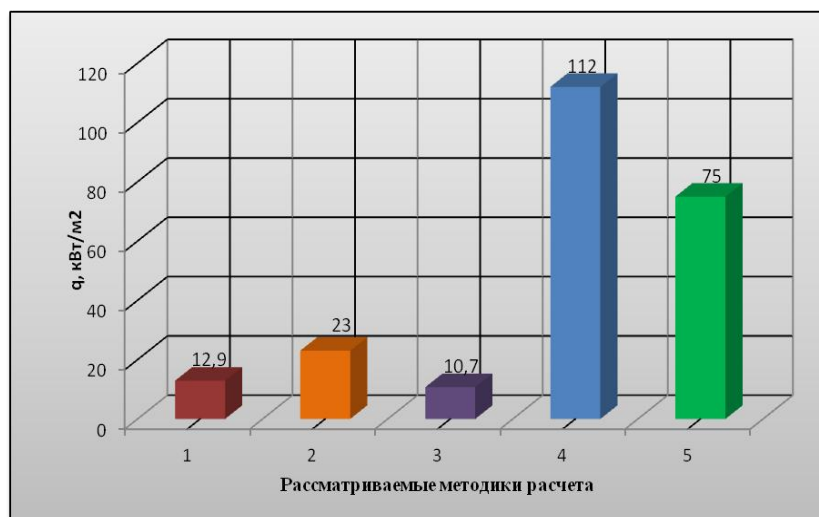


**Рисунок 2.3 – Расчетные данные времени существования ОШ по различным методикам (1 – ГОСТ Р 12.3.047-98; 2 – ГОСТ Р 12.3.047-2012, 3 – СТО Газпром, 2009; 4 – Методика оценки ПБР ФЦНС, 2016 (без учета ослабления атмосферой); 5 – Методика оценки ПБР ФЦНС, 2016 (с учетом ослабления атмосферой))**



**Рисунок 2.4 – Расчетные данные диаметра ОШ по различным методикам**





**Рисунок 2.5 – Расчетные данные интенсивности теплового излучения по различным методикам**

Наибольшее значение интенсивности теплового излучения ( $q_{max}$ ) получено по модели 4 согласно рисунку 2.5, где не учитывается текущее состояние атмосферы, следовательно, не учитывается ослабление интенсивности теплового излучения с поверхности ОШ при прохождении через приземный слой атмосферы.

Наименьшее значение ( $q_{min}$ ) получено по методике расчета СТО Газпром [24] с учетом состояния атмосферы, которая выражается как раз с учетом влажности воздуха. Также на значение интенсивности теплового излучения в этих расчетах повлияла среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, которая находится более сложным расчетным путем в отличие от ГОСТированных методик.

## **2.2 Влияние текущего состояния окружающей среды на изменение параметров «огненного шара»**

С точки зрения экологии существует три состояния атмосферы, которые рассматриваются как благоприятное и неблагоприятное при рассеивании примесей в воздухе, где в значительной степени влияют вертикальные потоки воздуха [36]:

1. Инверсия в атмосфере – это повышение температуры воздуха по мере увеличения высоты, т.е. нижние слои воздуха холоднее верхних слоев. Инверсия в приземных слоях чаще всего образуется в безветренные ночи.

Инверсионный слой является задерживающим, который препятствует движению воздуха по высоте, и это приводит к образованию дыма, тумана и облаков. Инверсия может возникать при ясной погоде или в малооблачные дни летом при скорости ветра до 4 м/с за час до захода солнца и разрушается в течение часа после восхода солнца, а также в зимние дни. Колебания температуры в этом слое от 0 до 15–20°C.

2. Изотермия характеризуется тем, что в пределах 20–30 м от земной поверхности температура и плотность воздуха примерно одинаковы. Наблюдается при пасмурной погоде, а также в зимние дни, когда, даже при отсутствии облачности, нагревание нижнего слоя воздуха будет незначительным.

3. В летние дни при отсутствии облачности наблюдается конвекция. Нагретая земля отдает свое тепло прилегающим к ней слоям воздуха. Эти слои, становясь менее плотными, поднимаются вверх, а нижние вытесняясь, становятся более холодными и плотными слоями воздуха. Нагревание слоев воздуха происходит неравномерно, поэтому при конвекции образуются течения, непрерывное перемешивание воздуха. Рассеивание примесей происходит очень быстро, скорость потоков может превышать 20–30 м/с.

Особенность атмосферных течений состоит в том, что мгновенные скорости отдельных масс воздуха испытывают нерегулярные, случайные отклонения. В связи с этим и другие характеристики воздуха, такие как давление, температура, плотность, содержание водяного пара, изменяются в пространстве и времени также нерегулярно. В случае турбулентности в атмосфере образуются вихри различных масштабов. Масштабы эти могут быть размером с долю сантиметра и более: до многих десятков и сотен метров [37].

В экологии инверсия и изотермия являются неблагоприятными условиями, т.к. задерживают примеси. Но в нашем случае наоборот являются благоприятными условиями, которые будут способствовать ослаблению теплового излучения.

Приземным слоем атмосферы называют нижнюю часть слоя атмосферы от земной поверхности до высоты в несколько десятков метров. Наиболее подвержен влиянию земной поверхности слой атмосферы до 2–3 метров. Толщина приземного слоя атмосферы изменяется в достаточно широких диапазонах в зависимости от величины скорости ветра, термической стратификации атмосферы, а также шероховатости земной поверхности. В приземном слое наблюдается быстрое изменение метеорологических параметров с высотой: вертикальные градиенты скорости ветра, температуры и влажности в десятки раз превышают величины, чем в вышележащих слоях, но уменьшаются по абсолютной величине с увеличением высоты. Скорость ветра с высотой в приземном слое возрастает, а направление его практически не изменяется. Приземный слой атмосферы содержит в себе основную часть водяных паров всей атмосферы, так в слое до 5 км содержится 90 % водяного пара, поэтому именно в приземном слое происходят такие процессы как образование облаков, выпадение осадков и т.д. [38].

Содержание паров воды в воздухе зависит от ряда причин: от его температуры и давления, от наличия водоемов вблизи потенциального источника аварии, от интенсивности испарения с земной поверхности, от атмосферной циркуляции. Известно, что с увеличением температуры содержание паров растет, основное количество водяного пара содержится в нижнем слое атмосферы. Кроме газов, пара в нижних слоях атмосферы постоянно имеются примеси: аэрозоли в виде пыли, дыма, различных частиц, капелек воды, которые делают атмосферу замутненной и ухудшают условия распространения потока излучения [39].

Аэрозоли являются нормальной составляющей атмосферы. У земной поверхности ее содержание колеблется от нескольких мкг/м<sup>3</sup> в очень чистом воздухе до величины 100 мкг/м<sup>3</sup> в загрязненной атмосфере. К аэрозолям относятся переносимые ветром частицы пыли, продукты сгорания (сажа, пепел), конденсированные органические остатки и вещества, которые образуются в результате химических реакций в атмосфере. Макрочастицы, в

большинстве случаев, удаляются из атмосферы вследствие гравитации, конденсации на частицах с последующим выпадением с дождем, а также за счет захвата выпадающими осадками. Для расчета свойств атмосферы, определяющих ослабление излучения, или оптических ее свойств, нужно знать характеристики аэрозолей, а также их молекулярный состав [39].

Иными словами, тепловое излучение ослабляется при прохождении через приземный слой воздуха вследствие поглощения и рассеяния молекулами газа, скоплениями молекул (аэрозолями), дождем, снегом, а также дымом, туманом, дымкой, смогом. Влажность воздуха оказывает существенное влияние на перенос и рассеивание примесей, поступающих в атмосферу. Например, капли воды в тумане поглощают примесь, причем не только вблизи подстилающей поверхности, но и из вышележащих, наиболее загрязненных слоев воздуха. Из-за этого концентрация примесей сильно возрастает в слое тумана и уменьшается над ним [40].

Сложность в том, что способность атмосферы ослаблять тепловое излучение неодинакова в разных местах, в течение суток и даже часа. Одна крайняя ситуация – это условия, соответствующие большой высоте и ясной морозной погоде; другая – тропический муссон. Кроме того, осложняет дело тот факт, что излучение различных длин волн ослабляется в разной степени [2].

### **2.3 Зажигание растительности в результате воздействия «огненного шара» при взрыве газопровода**

Лес как экологическая система представляет собой структурный слой на поверхности земли, имеющий в своем составе разнородные элементы, каждый из которых может рассматриваться как отдельный горючий материал. В состав биоценоза леса входят разные группы лесных растений (деревья, кустарники, трава, мхи, лишайники и т.д.). В состав неживых компонентов входит опад, состоящий из отмерших веточек, хвоинок, листвы, а также сухая трава и сухие веточки на деревьях и кустарниках (рисунок 2.6). С точки зрения механики сплошной среды лес представляет собой некоторый слой многокомпонентной многофазной реакционноспособной сплошной массы, обладающей

неоднородными свойствами в вертикальном и горизонтальном направлениях [41].

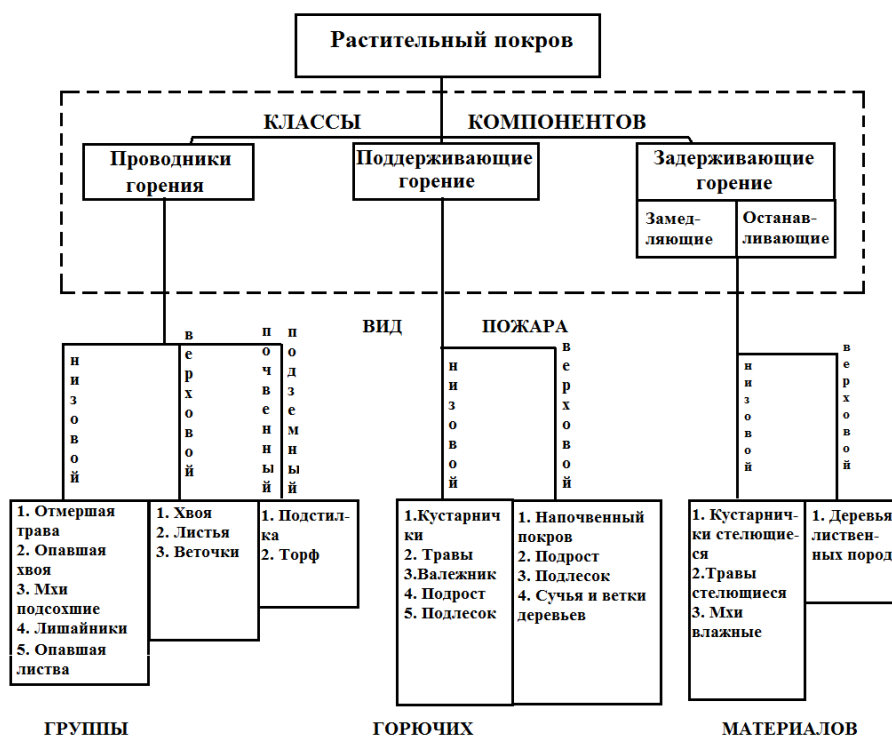


Рисунок 2.6 – Растительный покров как объект горения [42]

В зависимости от особенностей растений, их возраста и определённых физико-географических условий в лесу развивается многоярусная система (рисунок 2.7) [43]:

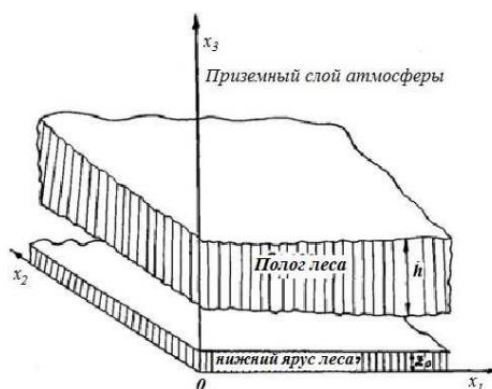
- 1) полог леса – совокупность крон взрослых деревьев до 25 м и высоту нижней границы крон 1–7 м;
- 2) подлесок – совокупность крон молодых деревьев до 6 м;
- 3) кустарники высотой до 2 м;
- 4) травянистые растения от 0.1 до 0.8 м;
- 5) кустарнички толщиной от 10 до 20 см;
- 6) ярус мхов, лишайников 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) [43]:

- 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 [41]



**Рисунок 2.7 – Схема расположения лесных горючих материалов в лесном массиве [44]**

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 [45]. К настоящему времени разработано множество способов классификации лесов. Например, их классифицируют по географическому распространению (восточные, тропические, притундровые, горные и другие), по происхождению (естественные и искусственные), по возрасту насаждений (молодняки, средневозрастные и другие), по положению в рельефе (равнинные, пойменные и т.д.) и по другим признакам. Их также группируют по сезонному аспекту. Так, леса считаются вечнозелеными, если живая листва сохраняется на деревьях круглый год. В листопадном лесу 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 из 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 [46].

В механике газа лесные массивы могут классифицироваться как непродуваемые и проницаемые, 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 [43].

Лесной массив у нас является горючим материалом, который делится на следующие группы [46]:

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

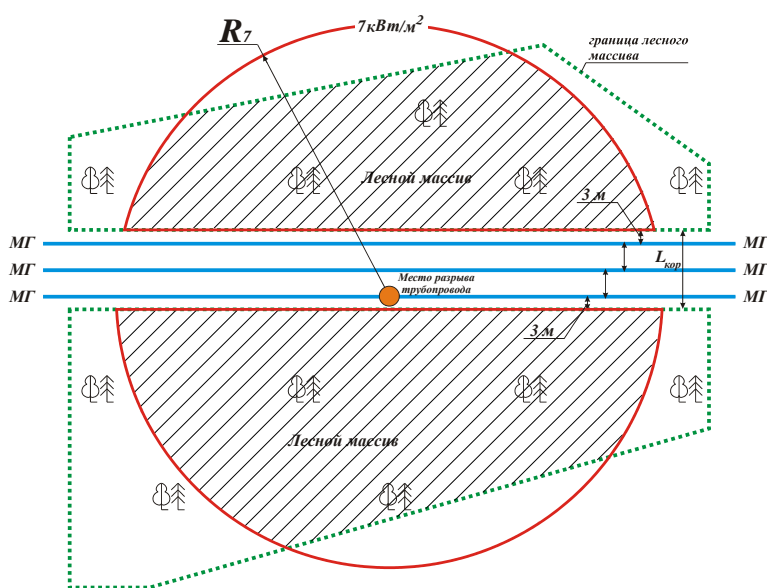
Были проведены опытные исследования по определению особенностей воспламенения ЛГМ сосновых насаждений под воздействием теплового излучения в средневозрастных сосновых насаждениях. Образцы после определения массы при естественной влажности просушивались в сушильном шкафу до абсолютно сухого состояния при температуре 105°C. Эксперименты

проводились на установке с целью испытания образцов 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 хвой сосны, является  $20 \text{ кВт/м}^2$ . Следует отметить, что при воздействии плотности теплового потока менее  $20 \text{ кВт/м}^2$  наблюдалось активное выделение газообразных продуктов горения ЛГМ, однако воспламенение образцов не наблюдалось [47].

В СТО Газпром прописан рекомендуемый порядок определения площадей уничтоженных и поврежденных лесных угодий от теплового воздействия. Рекомендован следующий порядок [24]:

1) для территории вокруг рассматриваемой точки разрыва МГ с нанесенным контуром лесных угодий рассчитывается распределение удельного теплового потока облучения на момент времени  $t_{\text{хар}}=90 \text{ с}$  после начала истечения и строится зона теплового воздействия, ограниченная линией теплового потока  $q_y=7 \text{ кВт/м}^2$ ;

2) определяется площадь  $S_{\text{лес-у}}$  (га) уничтоженного леса, которая попадает в зону теплового воздействия (рисунок 2.8);



**Рисунок 2.8 - К расчету площади уничтоженного леса в результате теплового воздействия от пожара на трубопроводе [24]**



Для характерного случая простираения леса за пределы зоны  $7 \text{ кВт/м}^2$  (по всему ее периметру) площадь  $S_{\text{лес-у}}$  приближенно рассчитывается по следующим формулам:

1) для круговой зоны теплового воздействия (см. рисунок 2.9,а)

$$S_{\text{лес-у}} = 0,0001 \cdot (\pi \cdot R_7^2 - 2 \cdot R_7 \cdot L_{\text{кор}}) \quad (20)$$

где  $R_7$  - радиус круговой зоны теплового воздействия, ограниченной изолинией  $7 \text{ кВт/м}^2$ , м;

$L_{\text{кор}}$  - ширина коридора трубопроводов с учетом ширины расчищенных от растительности полос по обе стороны от коридора, м;

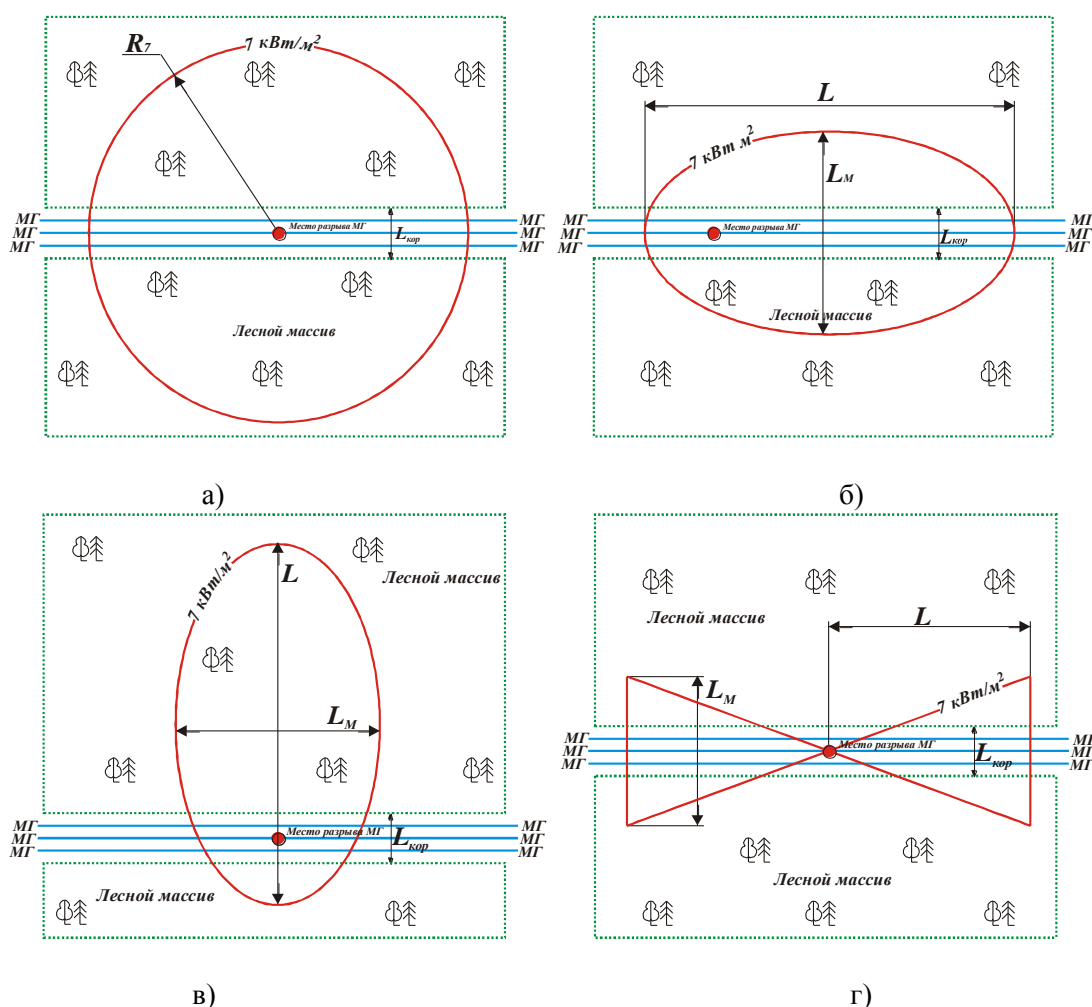


Рисунок 2.9 – Расчет площади уничтоженного тепловой радиацией лесного

массива при возникновении аварии с пожаром на трубопроводе [СТО Газпром]:

круговая зона воздействия (а), зона воздействия в форме эллипса, совпадающий с осью

трубопровода (б), зона воздействия в форме эллипса, перпендикулярной оси (в), зона

воздействия в форме двух «лепестков» (г)

2) для зоны теплового воздействия в форме эллипса с большой осью, совпадающей с осью трубопровода (рисунок 2.9,б) по формуле:

$$S_{лес-у} = 0,0001 \cdot (\pi \cdot L_m \cdot L_{\bar{o}} - 2 \cdot L_{\bar{o}} \cdot L_{кор}) \quad (21)$$

а с большой осью, перпендикулярной оси (рисунок 2.9,в):

$$S_{лес-у} = 0,0001 \cdot (\pi \cdot L_m \cdot L_{\bar{o}} - \frac{L_{\bar{o}}^2}{L_m} \cdot L_{кор}) \quad (22)$$

где  $L_{\bar{o}}$ ,  $L_m$  – длины, соответственно, большой и малой осей эллипса, образованного изолинией 7 кВт/м<sup>2</sup>, м;

3) для зоны теплового воздействия в форме двух одинаковых «лепестков», центрально симметричных относительно точки разрушения трубопровода, с продольными осями, совпадающими с осью (рисунок 2.9, г)

$$S_{лес-у} = 0,0001 \cdot (L_m \cdot L_{\bar{o}} - 2 \cdot L_{\bar{o}} \cdot L_{кор} + \frac{L_{\bar{o}} \cdot L_{кор}^2}{L_m}) \quad (23)$$

где  $L_{\bar{o}}$  – длина продольной оси «лепестка», образованного изолинией 7 кВт/м<sup>2</sup>, м;

$L_m$  – максимальная ширина этого же «лепестка», м.

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 [43].

### 3. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ЗАЖИГАНИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И ЕЕ ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

#### 3.1 Физико-математическая модель 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 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  $t=t_0$ , далее она затухает до нуля согласно данным о  $q_R(r,t)$ , которая может быть аппроксимирована следующим образом [44]:

$$q_R(r,t) = \frac{t_p P_m \sin L}{4\pi D^2} \begin{cases} t/t_m, & t < t_m \\ \exp(-k_0(t/t_m - 1)), & t \geq t_m' \end{cases} \quad (24)$$

Здесь  $t_m$  – время максимума тепловыделения источника излучения, с;

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

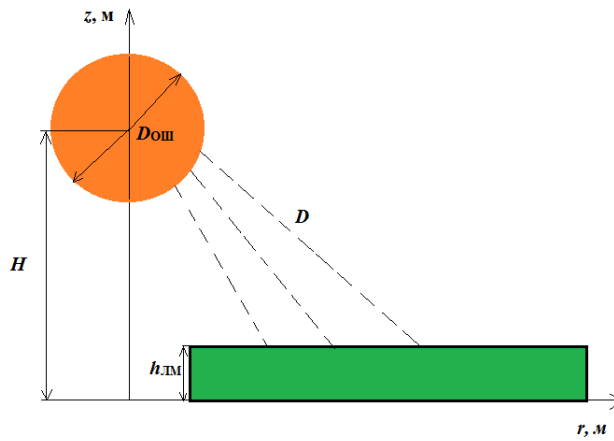
$t_p$  – коэффициент пропускания атмосферы;

$P_m$  – 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 [44].

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 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.

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  $l_R \ll l_o$ ,  $l_o \sim 10-15$  м,  $l_R \sim 1$  м ( $l_o$  – характерный масштаб высоты) [44].

С учетом сделанных предположений и законов сохранения для многофазной многокомпонентной реагирующей среды математически задача сводится к решению следующих уравнений [44]:

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_p T) = \frac{\partial}{\partial z}(-\rho c_p \overline{w'T'}) + k_g(cU_R - 4\sigma T^4) + q_5 R_5 + A_S(T_S - T) \quad (27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_\alpha) = \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{w'c'_\alpha}) - R_{5\alpha}, \alpha = 1, 2 \quad (28)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} \right) - kcU_R + 4k_g \sigma T^4 + 4k_s \sigma T_S^4 = 0 \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{\rho i} \varphi_i \frac{\partial T_S}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (cU_R - 4\sigma T_S^4) + A_S(T - T_S) \quad (30)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0 \quad (31)$$

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

$$\begin{aligned}
R_{51} &= -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, R_{52} = v(1 - \alpha_c)R_1 - R_5 \\
R_1 &= k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_S}\right), R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_S^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_S}\right), \\
R_3 &= k_3 \rho_3 \varphi_3 s_\alpha c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_S}\right), \\
R_5 &= M_2 k_5 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \left(\frac{c_2 M}{M_2}\right) T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) \quad (32)
\end{aligned}$$

Начальные и граничные условия для системы уравнений (25)-(32) имеют следующий вид:

$$t = 0, w = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, T_s = T_e, \varphi_i = \varphi_{ie}; \quad (33)$$

$$z = z_0: \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} = \frac{\varepsilon}{2(2-\varepsilon)} (4\sigma T_S^4 - cU_R); \quad (34)$$

$$z = h: \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2} U_R = 2q_R(r, t). \quad (35)$$

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  $\alpha$  - 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;  $c_\alpha$  - массовые концентрации ( $\alpha=1$  - кислород, 2 - CO, 3 - инертные компоненты газовой фазы);  $p$  - давление;  $U_R$  - плотность энергии излучения;  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана;  $k$  - коэффициент ослабления излучения;  $k_g, k_s$  - коэф-ты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз;  $\alpha_v$  - коэффициент обмена фаз,  $q_i, E_i, k_i$  - тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза;  $s_\sigma$  - удельная поверхность элемента ЛГМ;  $M_\alpha, M_c, M$  - 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  $z$ ;  $\alpha_c, v$  - 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 [44]. 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 так же минеральная часть ЛГМ. В газовой фазе выделим самые необходимые для описания реакции горения компоненты: массовые концентрации  $c_\alpha$  ( $\alpha=1$  - 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 [Перминов]:

$$\bar{F} = \rho s c_d |\bar{v}| \bar{v} \quad (36)$$

Считается, что среда находится в локально-термодинамическом равновесии. Для замыкания системы уравнений использовалось равновесное приближение к  $\epsilon$  модель турбулентности [44].

Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют ЛГМ полога соснового леса и выбирались согласно [43]:  $E_1/R = 9400$  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,  $S_{c_d} = 0.01$ ,  $h = 10$  м,  $\alpha_c = 0.06$ ,  $\rho_4 \varphi_4 = 0.08$ ,  $\rho_1 = 500$ ,  $\rho_2 = 10^3$ ,  $\rho_3 = 200$ ,  $\rho_{5H} = 1.16$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_H = 10^5$  Н/м<sup>2</sup>,  $\mu_1 = 1$  кг/(м·с),  $T_H = 300$  К,  $c_{1H} = 0.23$ ,  $c_{2H} = 0$ ,  $\varphi_{3H} = 0$ ,  $\varkappa = 0.0375$  1/м.

### 3.2 Метод решения задачи

Дифференциальное уравнение, которое описывает процесс тепломассообмена и гидродинамики подчиняются обобщенному закону сохранения. Если обозначить некую интересующую функцию  $\Phi$ , то обобщенное дифференциальное уравнение для одномерной задачи принимает вид [48]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + S \quad (37)$$

где  $t$ ,  $x$  – временная и пространственная координаты,  $\rho$  – плотность,  $v$  – компонент вектора скорости,  $\Gamma_\Phi$  – коэффициент переноса (например,  $\Gamma_\Phi$  – 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  $\Gamma_\Phi$  и  $S$  зависит от смысла переменной  $\Phi$ . В обобщенное дифференциальное уравнение входят четыре члена: нестационарный, конвективный, диффузионный и источниковый [48].

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 3.2).

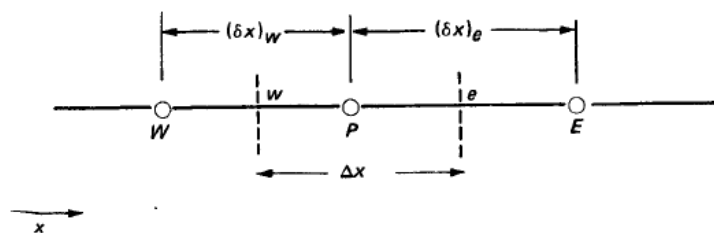


Рисунок 3.2 – Шаблон узловых точек для одномерной задачи [49]

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.

Уравнение теплопроводности записывается в виде:

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (38)$$

Используя кусочный профиль для определения  $\frac{dT}{dx}$  в уравнении, получим:

$$\frac{k_e(T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w(T_P - T_W)}{(\delta x)_w} + \bar{S}\Delta x = 0 \quad (39)$$

где  $\bar{S}$  – среднее по контрольному объему значение  $S$ . Далее записываем уравнение (39) в следующем виде:

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

где

$$a_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad (41)$$

$$a_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad (42)$$

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

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

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 3.3). Дискретный аналог можно записать в следующем виде:

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad (45)$$

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

$$c_1 = 0, b_N = 0 \quad (46)$$

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 3.3 – 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

$$T_i = P_i T_{i+1} + Q_i \quad (47)$$

после того, как получено

$$T_{i-1} = P_{i-1} T_i + Q_{i-1} \quad (48)$$

Подставляя (48) в (45), получаем следующее соотношение:

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

которое можно привести к виду (47). Коэффициенты  $P_i$  и  $Q_i$  запишем в виде:

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (50)$$

$$Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (51)$$

Эти соотношения определяют  $P_i$  и  $Q_i$  через  $P_{i-1}$  и  $Q_{i-1}$ . Заметим, что в начале процесса уравнение (47) для  $i=1$  по форме почти совпадает с (45). Таким образом,  $P_i$  и  $Q_i$  определяются следующим образом:

$$P_1 = \frac{b_1}{a_1} \quad (52)$$

$$Q_1 = \frac{d_1}{a_1} \quad (53)$$

На другом конце последовательности  $P_i$  и  $Q_i$  имеем  $b_N = 0$ . Это дает  $P_N = 0$ , и из (47) получаем  $T_N = Q_N$  [48].

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.

### 3.3 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  $\omega$ , которая включает в себя относительную площадь листьев  $\omega_1$  и поверхность нелистовой скелетной части дерева  $\omega_2$  [50].

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 \quad (54)$$

В зарубежной литературе  $\omega$  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]:

$$\omega = LAI = \int_0^{\bar{z}} (s_1 + s_2) d\bar{z} \quad (55)$$

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  $\omega_1$  и скелетной части  $\omega_2$  (таблица 3.1),  $\bar{z}$  – 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 [50].

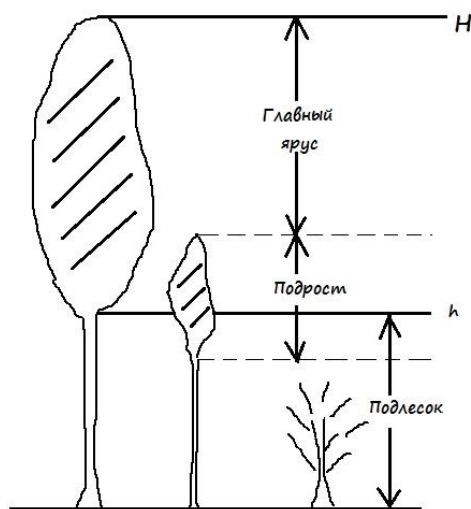
Для любого элементарного слоя растительности имеем [43]:

$$\frac{d\omega}{dz} = \Sigma = s_1 + s_2 \quad (56)$$

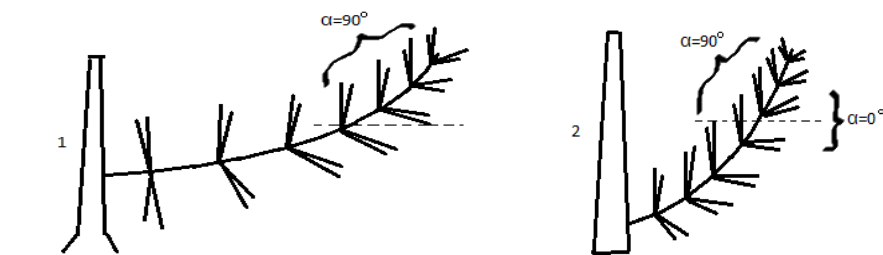
Таблица 3.1 – Распределение удельной поверхности зеленой массы ( $s_1$ ) и скелетной части ( $s_2$ ) для сосны в возрасте 15-20 лет [50]

$\bar{z}$	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
$\Sigma$	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 3.4), где  $H$  – высота полога леса взрослого древостоя,  $h$  – высота полога подроста.



**Рисунок 3.4 – Ярусы леса [50]**



**Рисунок 3.5 – Схема распределения углов наклона хвоинок для посадок сосны в нижней (1) и верхней (2) частях дерева [50]**

В рамках численного решения для нахождения коэффициента ослабления пологом леса соснового древостоя использовалась его зависимость от общей поглощающей поверхности в вертикальном столбе растительности  $\omega$  ( $s_1 + s_2$ ) с учетом угла наклона хвоинок (рисунок 3.6). 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 3.5) [50].

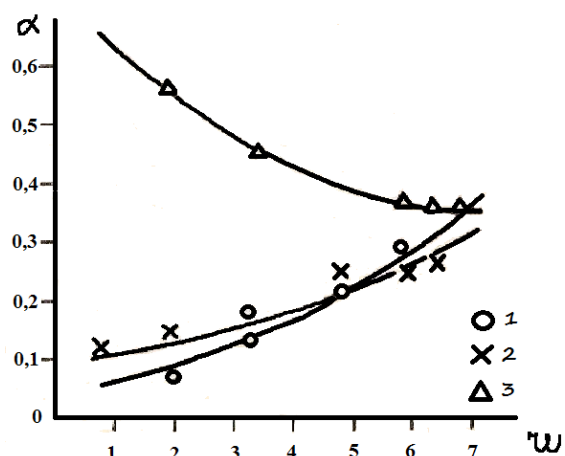
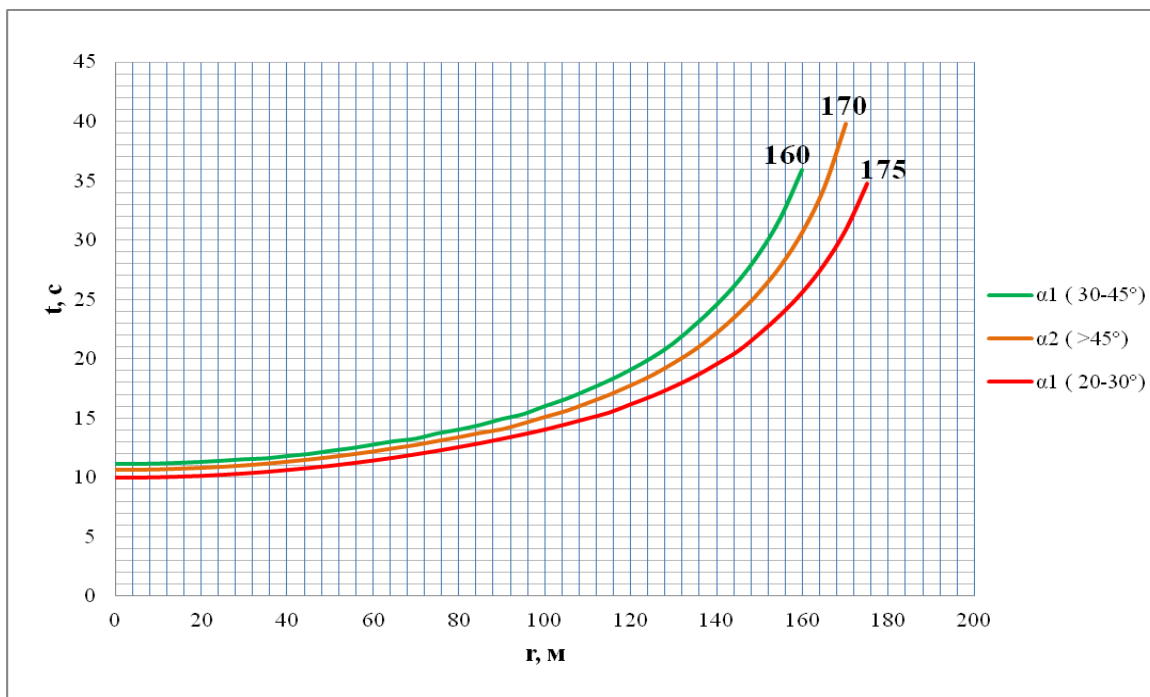


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента ослабления  $\alpha$  от  $\omega$  для сосновой посадки (градусы: >45 (1), 30–45 (2), 20–30 (3))[43]

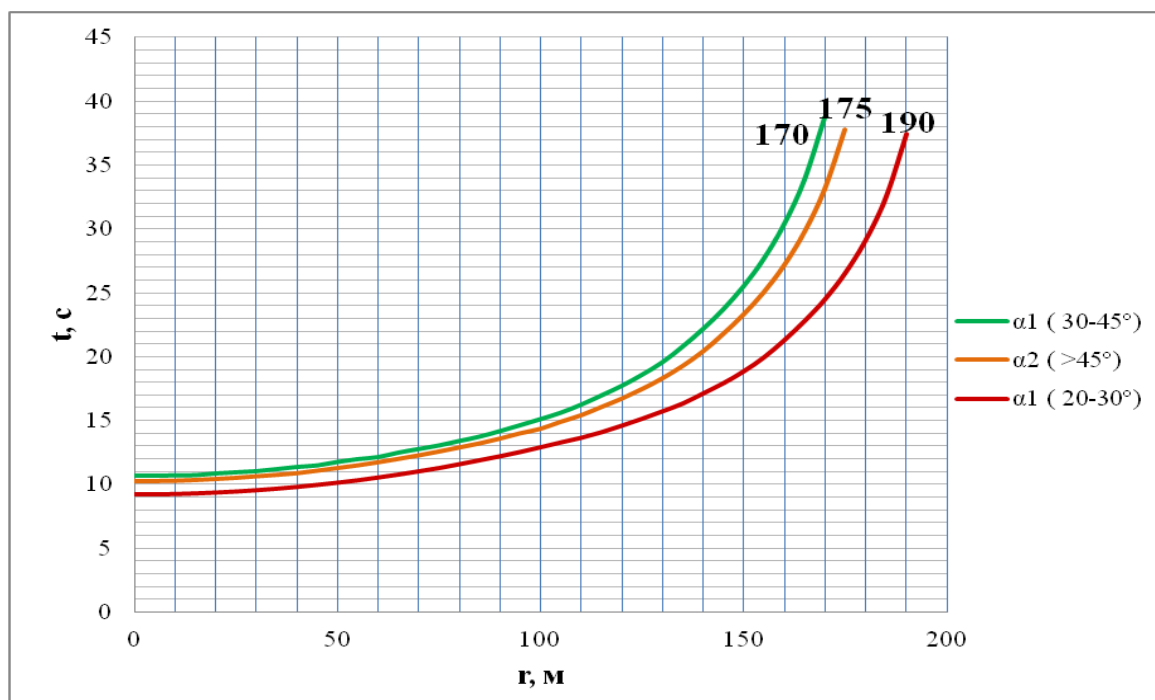
В результате численного решения задачи с учетом коэффициента ослабления пологом леса при различных углах наклона хвоинок, представленные в таблице 2, были найдены радиусы зажигания растительности для исходной массой углеводородного топлива 254 т и влагосодержания ЛГМ  $W = 0.3$  с разной общей поверхностью поглощения в вертикальном столбе растительности и разным запасом ЛГМ.

Таблица 3.2 – Зависимость коэффициента ослабления от угла наклона хвоинок при различных  $\bar{z}$

Коэффициент ослабления	Угол наклона хвоинок $\alpha$
$\bar{z} = 0.7$	
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°
.375	>45°
0.385	20–30°

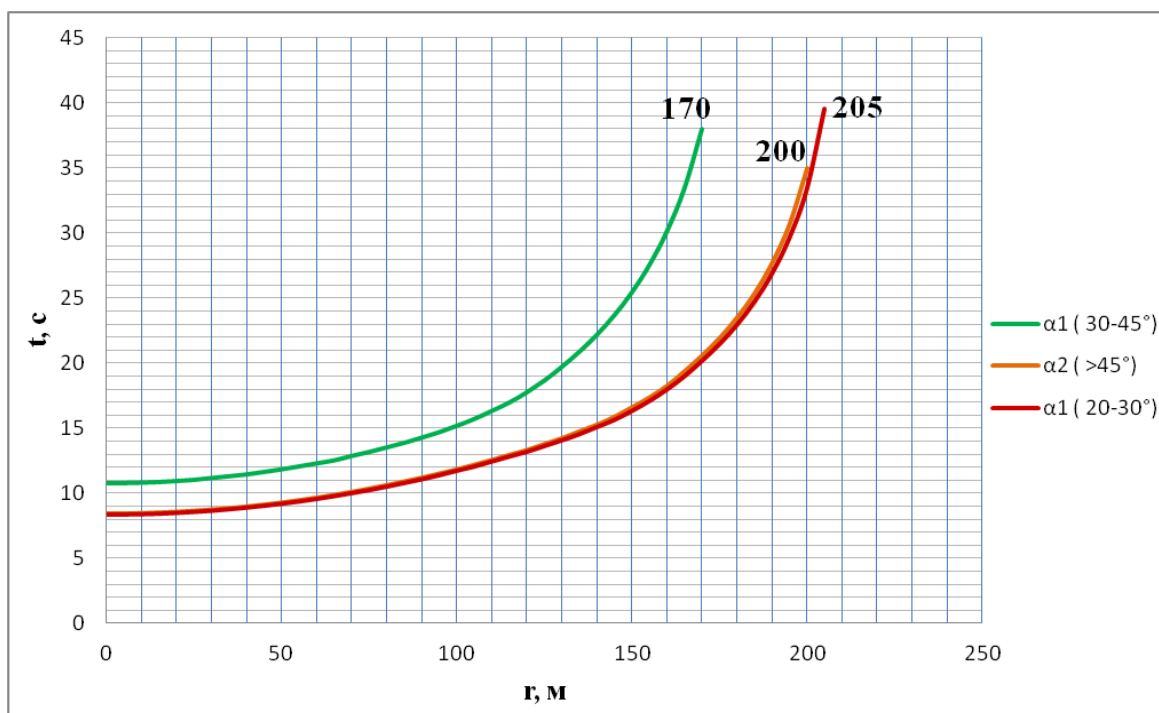


**Рисунок 3.7 – Зависимость радиуса зажигания растительности от коэффициента ослабления пологом леса при  $\bar{z}=0.7$**



**Рисунок 3.8 – Зависимость радиуса зажигания растительности от коэффициента ослабления пологом леса при  $\bar{z}=0.6$**





**Рисунок 3.9 – Зависимость радиуса зажигания полого леса от коэффициента ослабления пологом леса при  $\bar{z}=0.5$**

При значении запаса ЛГМ  $z=0.3$  кг/м<sup>3</sup> и средней высоты древостоя  $\bar{z}=0.7$  наибольшее значение радиуса зажигания  $r^*=175$  м получили при коэффициенте ослабления пологом леса 0.375 (рисунок 3.7), при  $z=0.3$  кг/м<sup>3</sup> и  $\bar{z}=0.6$  радиус зажигания составляет  $r^*=190$  м при коэффициенте ослабления пологом леса 0.380 (рисунок 3.8), а при  $z=0.2$  кг/м<sup>3</sup> и  $\bar{z}=0.5$  наибольшее значение радиуса зажигания составляет  $r^*=205$  м при коэффициенте ослабления пологом леса 0.385 (рисунок 3.9) при углах наклона игол 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 полого 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 3.10–3.12).



**Рисунок 3.10 – 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**

Незрывно 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 3.11 и 3.12.

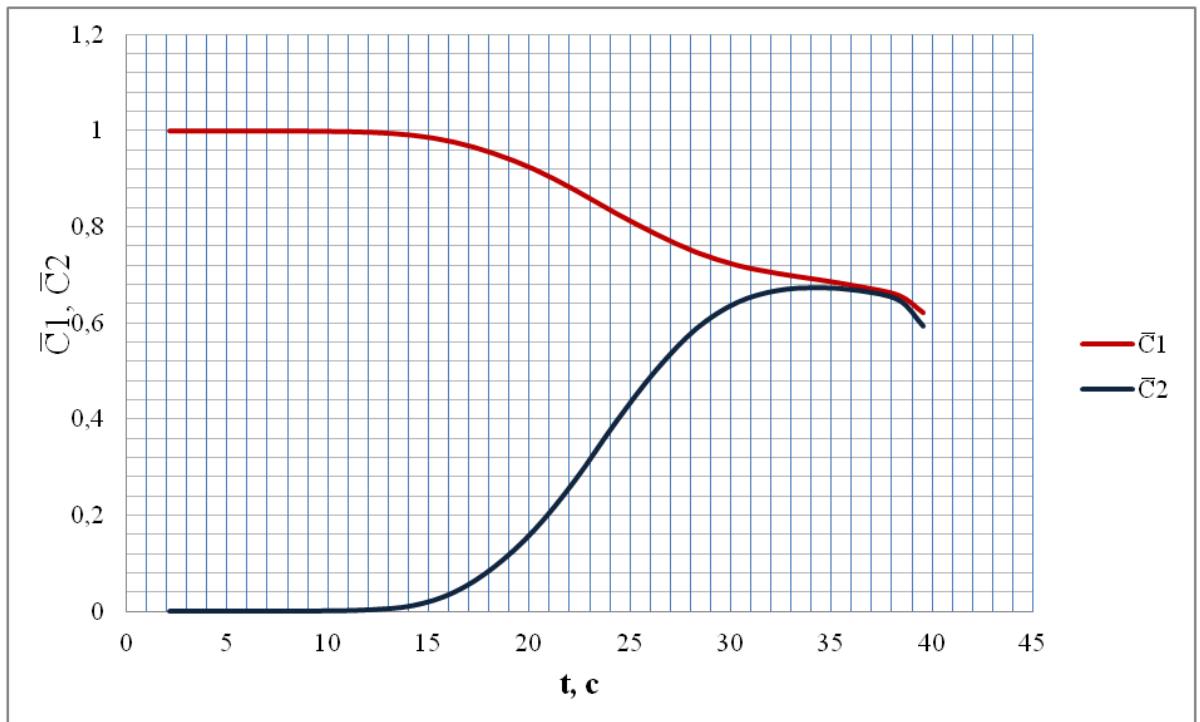


Рисунок 3.11 – Распределение концентраций кислорода ( $\bar{C}_1$ ) и продуктов пиролиза оксида углерода ( $\bar{C}_2$ ) в верхней границе полога леса до момента зажигания

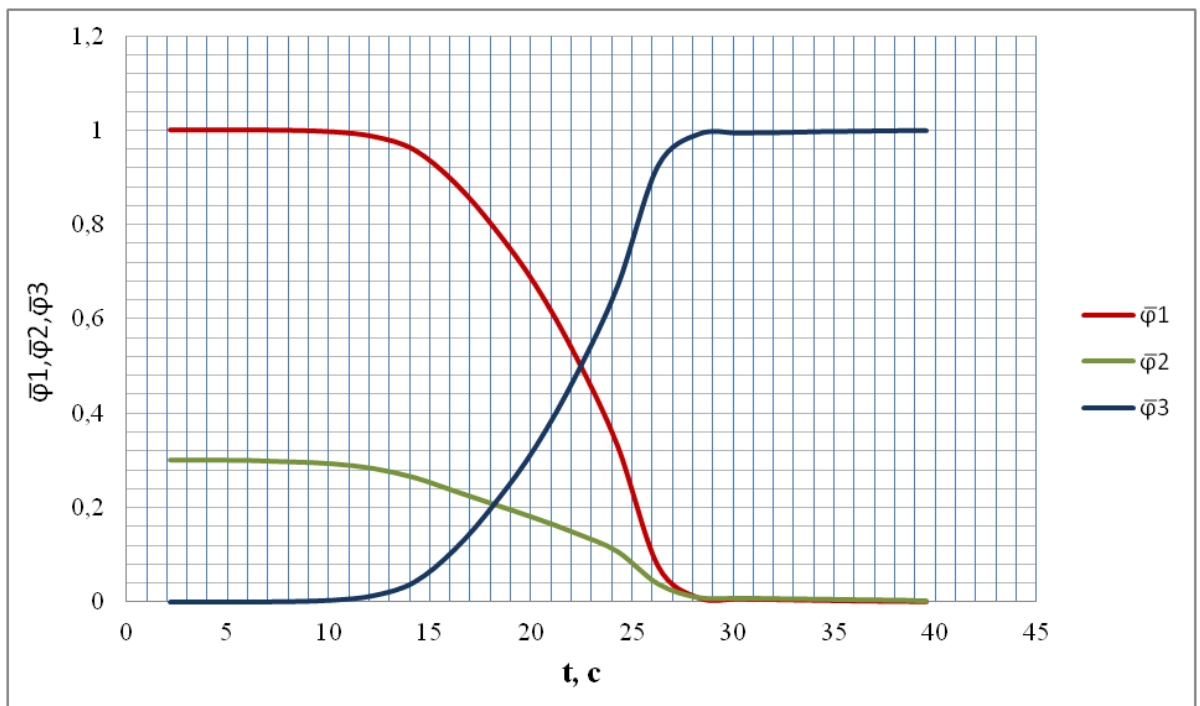


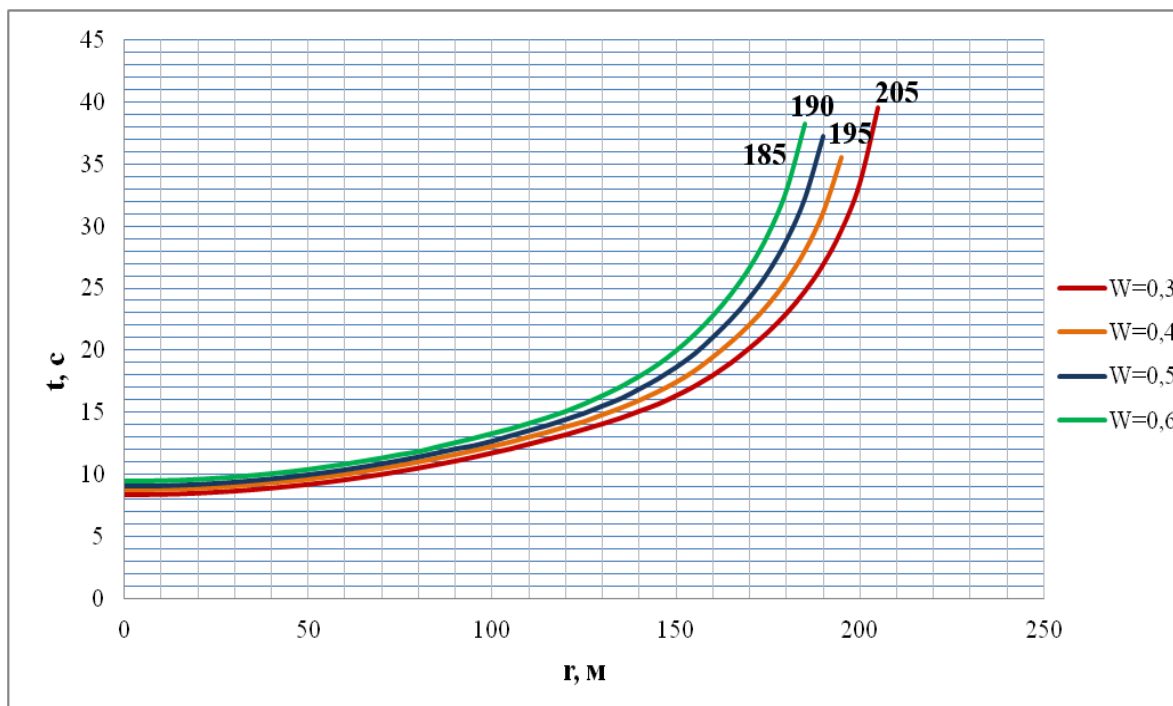
Рисунок 3.12 – Распределение объемных долей  $\bar{\varphi}_1$ ,  $\bar{\varphi}_2$ ,  $\bar{\varphi}_3$  на верхней границе полога

леса до момента:  $\bar{\varphi}_1 = \varphi_1 / \varphi_{1,e}$  – сухого органического вещества,

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

$\bar{\varphi}_3 = \rho_3 \varphi_3 / \alpha_c \rho_1 \varphi_{1,e}$  – коксика,  $\varphi_{1,e} = 0$ ,  $\rho_e = 1.2$  кг/м<sup>3</sup>

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 3.13 – 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 3.13).

### 3.4 Оценка и анализ полученных данных

Как показывают рисунки 3.7–3.9, 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 было 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 3.13 видно, что по мере уменьшения влагосодержания ЛГМ радиус зажигания полога леса увеличивается. Полученные расчеты также показывают влияние текущего состояния ЛГМ, выраженного через влагосодержание, на радиус зажигания полога леса.

#### 4. 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.

#### **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

##### **4.1.1 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 4.1):

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

Таблица 4.1 – 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	
<b>Сферы потребления приложения</b>	Образование (высшие учебные заведения, профессионально-ориентированные школы)				
	Наука (научно-исследовательские институты, проектные организации)				
	Федеральное агентство лесного хозяйства (специалисты лесной охраны)				

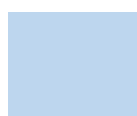


Продолжение таблицы 4.1.

		Возможности приложения «Fireball»		
		Наличие бесплатной Shareware версии	Возможность работы с исходными текстами программ (встроенные модули)	Тематическая библиотека активного режима пользования
Сферы потребления приложения	Крупные промышленные предприятия			
	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.

#### 4.1.2 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 4.2.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
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
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
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
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>33</b>	<b>28</b>	<b>26</b>	<b>3,3</b>	<b>2,8</b>	<b>2,6</b>

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 4.2, 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:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

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

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

### 4.1.3 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 использовано 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 4.3).

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны НИР				Слабые стороны		
		С1	С2	С3	С4	Сл1	Сл2	Сл3
Возможности НИР	В1	+	+	+	0	0	0	+
	В2	-	+	-	0	0	-	+
	В3	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 4.4).

Таблица 4.4 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>С1. Возможность доработки данного приложения с ориентацией на конкретного потребителя.</p> <p>С2. Возможность работы с исходными данными программы, в том числе с кодом программы.</p> <p>С3. Относительно низкая стоимость по сравнению с другими CFD-программами.</p> <p>С4. Короткое время расчета модели.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></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 4.4

<p><b>Возможности:</b>          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><b>Угрозы:</b>          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.

#### 4.2 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.

### 4.2.1 Оценка социальной эффективности исследования

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты. В таблице 4.5 приводится оценка социальной эффективности проекта приложения «Fireball» для построения модели зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода с образованием «огненного шара».

Таблица 4.5 – Критерии социальной и экономической эффективности

<b>ДО</b>	<b>ПОСЛЕ</b>
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. 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 ПК, с помощью которого обрабатывается вся информация.

### 5.1 Производственная безопасность

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 ПК [51], представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Опасные и вредные факторы при работе на ПК

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;	1. отклонение показателей микроклимата; 2. повышенный уровень шума; 3. недостаточная освещенность рабочей зоны;	1. электрический ток; 2. возникновение пожара.	Параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [52].

Продолжение таблицы 5.1

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
4. системный блок, монитор; 5. выполнение должностных обязанностей.	4. напряженность, монотонность трудового процесса.		Параметры шума устанавливаются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [52]. Параметры освещенности рабочей зоны устанавливаются СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [54].

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 параметры микроклимата. На работах, производимых сидя и не требующих физического напряжения, температура воздуха должна быть в теплый период года 22–25°C, в холодный период года 21-24°C, относительная влажность воздуха 40–60%, скорость движения воздуха 0,1–0,2 м/с [52].

Таблица 5.2 – Допустимые значения микроклимата в рабочей зоне [2]

Период года	Категория работ	Температура, °С				Относительная влажность, %	Скорость движения, м/с
		верхняя граница		нижняя граница			
		на рабочих местах					
постоянных	не-постоянных	постоянных	не-постоянных				
Холодный	Легкая Ia	25	26	21	18	75	не более 0,1
	Легкая Ib	24	25	20	17	75	не более 0,2
Теплый	Легкая Ia	28	30	22	20	55 (при 28°C)	0.1–0.2
Теплый	Легкая Ib	28	30	21	19	60 (при 27°C)	0.1–0.3

Интенсивность теплового излучения от нагретых поверхностей, осветительных приборов не должна превышать 35 Вт/м<sup>2</sup>. 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 [53].

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.

При выполнении основной работы на мониторах и ПЭВМ, где работают инженерно-технические работники, уровень шума не должен превышать 60 дБА, в помещениях операторов ЭВМ (без дисплеев) – 65 дБА, на рабочих местах в помещениях, где размещаются шумные агрегаты вычислительных машин – 75 дБА [54].

Длительное воздействие шума, уровень которого превышает допустимые значения, может привести к заболеванию человека шумовой болезнью – нейросенсорная тугоухость. На основании всего выше сказанного шум следует считать причиной потери слуха, некоторых нервных заболеваний, снижения продуктивности в работе и некоторых случаях потери жизни.

Меры защиты от шума:

а) подбор рабочего оборудования, обладающего меньшими шумовыми характеристиками;

б) информирование и обучение работающего таким режимам работы с оборудованием, которое обеспечивает минимальные уровни генерируемого шума;

г) ограничение продолжительности и интенсивности воздействия до уровней приемлемого риска;

д) проведение производственного контроля виброакустических факторов;

з) ежегодное проведение медицинских осмотров для лиц, подвергающихся шуму выше 80 дБ [55].

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. Нормированный уровень освещенности для работы с компьютерами составляет 400 Лк, а КЕО=4% [56].

Недостаточное освещение влияет на функционирование зрительного аппарата, то есть определяет зрительную работоспособность, на психику человека, его эмоциональное состояние, вызывает усталость центральной нервной системы, возникающей в результате прилагаемых усилий для опознания четких или сомнительных сигналов.

В рабочих помещениях должны предусматриваться меры для ограничения слепящего воздействия световых проемов, имеющих высокую яркость, а так же прямых солнечных лучей. В случае, когда экран компьютера обращен к оконному проему, предусматриваются специальные экранирующие устройства, окна рекомендуется снабжать светорассеивающими шторами, жалюзи или солнцезащитной пленкой с металлическим покрытием. В случаях, когда одного вида освещения недостаточно, устраивают совместное освещение.

Дополнительное искусственное освещение создает хорошую видимость информации на экране монитора, текста на бумаге и других материалов для работы. При этом в поле зрения работающих обеспечиваются оптимальные яркости окружающих поверхностей, исключена или предельно ограничена отраженная блеклость от экрана в результате отражения светового потока от источников света и светильников. При периметральном расположении компьютеров светильники располагаются локализовано над рабочим местом ближе к переднему краю, обращенному к пользователю. В качестве источников искусственного освещения используются люминесцентные лампы дневного света мощностью 65-80 Вт, коэффициент пульсации не должен превышать 5%. Существуют специальные люминесцентные лампы, имитирующие полный спектр естественного солнечного света. Нельзя применять светильники без рассеивателей и экранирующих решеток [56].

4. 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.

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 [57].

5. 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 [53].

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

## **5.2 Экологическая безопасность**

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 Порядком ведения государственного кадастра отходов, утвержденным приказом Министерства природных ресурсов РФ от 30 сентября 2011 г. № 792 [58]. 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.

### **5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

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 [59] 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 [60].

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

1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства

Право работников на труд в безопасных условиях, то есть отвечающим требованиям охраны труда, закреплено в статье 219 Трудового кодекса РФ [61]. Каждый работник имеет право:

- на рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- быть застрахованным в системе обязательного социального страхования от несчастных случаев;
- получать достоверную информацию от работодателя об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;

- отказаться от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- получить средства индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- направить запрос о проведении проверки условий и охраны труда на его рабочем месте;
- лично или через своих представителей участвовать в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- на внеочередной медицинский осмотр за счет работодателя в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра (обследования).

## 2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочее место – это зона, оснащенная необходимыми техническими средствами, в которой совершается деятельность.

Главная цель организации рабочего места – обеспечить высококачественное и эффективное выполнение работ с соблюдением установленных сроков и при полноценном использовании закрепленного за работником оборудования.

Для ее достижения к рабочему месту предъявляются требования организационного, технического, эргономического, санитарного, гигиенического и экономического характера.

Выполняя планировку рабочего места необходимо учитывать следующее:

- 1) Рекомендуемый проход слева, справа и спереди от стола 500 мм. Слева от стола допускается проход 300 мм;



2) Рабочие места с ПЭВМ при выполнении творческой работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5–2,0 м. Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600–700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов. Дизайн ПЭВМ должен предусматривать окраску корпуса в спокойные мягкие тона с диффузным рассеиванием света. Корпус ПЭВМ, клавиатура и другие блоки и устройства ПЭВМ должны иметь матовую поверхность с коэффициентом отражения 0,4–0,6 и не иметь блестящих деталей, способных создавать блики. Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики;

3) Конструкция рабочего стула должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ;

4) Рабочий стул должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию;

5) Стул не может располагаться непосредственно на границе площади рабочего места. Рекомендуемое расстояние от спинки стула до границы должно быть не менее 300 мм [53].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследовательской работы было проведено математическое моделирование зажигания растительного покрова в результате разрыва газопровода. 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 текущего состояния и характеристик полога леса на изменение радиуса зажигания.
4. Изучены термические и физико-химические параметры на верхней границе полога леса в начальный момент зажигания на расстоянии критического радиуса зажигания.
5. 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989. – 150–160 с.
3. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – М: Госстандарт, 2014. – 86с.
4. Куликов В. В. Огненный шар: метод. рекомендации/ В. В. Куликов, И. И. Гаврилин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2015. – 24 с.
5. Методика оценки пожаробезопасных расстояний при проектировании промышленных предприятий. – М: Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2016. – 225 с.
6. 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.
7. 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.
8. Елохин А. Анализ и управление риском: теория и практика. – М.: ПолиМЕдиа, 2002. – 189 с.
9. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
10. 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.

11. 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.

12. 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: 20.12.2017 г.

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

14. 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](http://studbooks.net/1555969/bzhd/statisticheskie_dannye_avariyam_rossii_obektah_gazoraspredeleniya_potrebleniya), свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 22.01.2018 г.

15. Железная катастрофа под Уфой [Электронный ресурс]. / URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Железнодорожная\\_катастрофа\\_под\\_Уфой](https://ru.wikipedia.org/wiki/Железнодорожная_катастрофа_под_Уфой), свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 05.02.2018 г.

16. Железнодорожная катастрофа под Уфой в ночь с 3 на 4 июня 1989 года [Электронный ресурс]. / URL: <https://fishki.net/2347187-zheleznodorozhnaja-katastrofa-pod-ufoj-v-nochy-s-3-na-4-ijunja-1989-goda.html>, свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 06.02.2018 г.

17. Железнодорожная катастрофа 4 июня 1989 года [Электронный ресурс]. / URL: <http://vaostory.ru/blogs/o-chyom-malo-pishut/4-iyunja-1989-goda.html>, свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 09.02.2018 г.

18. Ад на Транссибе: крупнейшая железнодорожная катастрофа в истории СССР [Электронный ресурс]. / URL: <https://realt.onliner.by/2015/07/22/ufa>, свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 12.02.2018 г.

19. Техногенные катастрофы [Электронный ресурс]. / URL: <http://industrial-disasters.ru/disasters/железная-дорога-под-уфой-ссср-1989/>, свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 16.02.2018 г.

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. Анализ возможности каскадного развития аварии на взрывопожароопасных объектах/ Н.И. Азаров, О.В. Давидюк, Н.В. Кошовец, М.В. Лисанов// Безопасность труда в промышленности. – 2007. – №5. – С. 42–47.

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. Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2016 году [Электронный ресурс]. / URL: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/Годовой%20отчет%20за%202016%20год%203.pdf](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Годовой%20отчет%20за%202016%20год%203.pdf) , свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 20.12.2017 г.

26. Выводы возможных последствий аварий с ЛВЖ [Электронный ресурс]. / URL: <http://vmest.ru/nuda/zakritoe-akcionernoe-obshestvo->

[proekt/stranica-3.html](http://proekt/stranica-3.html) , свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 22.03.2018 г.

27. ГОСТ Р 12.3.047-98. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – М: Госстандарт, 1998. – 77 с.

28. Hasegava K., Sato K., Study of the fireball following steam explosion of ngeptane / 2<sup>nd</sup> Int. Symp. – On Loss Prevention, European Federation of Chem. Eng., Heidelberg, 1977, Dechema, Frankfurt, 1978. – P. 297–304.

29. Hasegava K., Sato K., Experimental investigation of the unconfined vapourcloud explosions of hydrocarbons/Tokio, Tech.Mem. № 12, Fire Research Institute of Japan, 1978.

30. High R.V., Annals N.Y., Acad.Sci., 152, 1968. –P. 441–451.

31. Hardee H.D., Lee D.O., Thermal hazard from propane fireballs / Trans. – Plann. Technol, 1973. – P. 121–128.

32. Hardee H.D., Lee D.O., Benedick W.B., Thermal hazard from LNG fireballs / Comb.Sci.Tech., 17, 1978. – P.189–197.

33. MoorhouseDr.J., Scaling criteries for pool fires derived from large scale experiments. The Inst. Of Chem. Eng., Symp. Series № 71, 1982. – P. 165–181.

34. Roberts A.F., Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurized storage / Fire Safety J. – 4. – 1981/82. – P. 197–212.

35. Fay J.A., Desgroseilliers C.J., Lewis D.H., Radiation from burning hydrocarbon clouds / Comb.Sci. and Tech. – 20. – 1979. – P. 141–151.

36. Пиротехническая химия [Электронный ресурс]. / URL: <http://pirochem.net/index.php?id1=3&category=otherpirotech&author=veytser-yui&book=1947&page=67> , свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 08.02.2018 г.

37. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Р. Турбулентность в свободной атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 337 с.

38. Билалова В.Ф. Физические параметры приземного слоя атмосферы в зависимости от его термической устойчивости на основании

экспериментальных данных/ В.Ф. Билалова; Южный федеральный университет (ЮФУ), Факультет математики, информатики и физики (ФМИФ), Кафедра общей и экспериментальной физики; науч. рук. Г.Г. Петрова. – Ростов-на-Дону, 2010.

39. Тымкул Л.В., Тымкул В.М. Системы инфракрасной техники: методические указания. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 35 с.

40. Метеорологические факторы, влияющие на рассеивание примесей [Электронный ресурс]. / URL: [https://otherreferats.allbest.ru/ecology/00235000\\_0.html](https://otherreferats.allbest.ru/ecology/00235000_0.html) , свободный. Дата обращения: 08.02.2018 г.

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

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

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

44. 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.

45. Лес [Электронный ресурс]. / URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Лес>, свободный, Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. Дата обращения: 05.04.2018 г.

46. Ходаков В.Е., Жарикова М.В. Лесные пожары: методы исследования. – Херсон: Гринь Д.С., 2011. – 470 с.

47. Барановский Н.В., Гоман П.Н. Экспериментальное исследование зажигания лесного горючего материала лучистым тепловым потоком // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – 8 с.

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

49. Moukalled F. The Finite Volume Method in Computational Fluid

Dynamics/ F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish //Springer International Publishing Switzerland. – 2016. – P. 791.

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

51. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Росстандарт, 2017. – 18 с.

52. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Госстандарт СССР, 1989. – 78 с.

53. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Минздрав России, 2003. – 32 с.

54. Белокопытов В.Н. Безопасность работы с ПЭВМ и копировально-множительной техникой – Смоленск, 2007. – 155 с.

55. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – М.: Минздрав России, 2016. – 103 с.

56. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. – М.: Минздрав России, 2003. – 37 с.

57. ГОСТ 12.1.038–82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. – М.: Стандартиформ, 2001. – 5 с.

58. Приказ Министерства природных ресурсов РФ. Об утверждении Порядка введения государственного кадастра отходов от 30 сентября 2011 г. № 792. – М.: Минприрода России, 2011. – 10 с.

59. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Минздрав России, 1991. – 126 с.



60. ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в ЧС. Основные положения. – М.: Технический комитет по стандартизации, 2017. – 6 с.

61. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 1 (ч. 1). – ст. 219.