

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



Институт неразрушающего контроля  
 Направление/специальность – 20.04.01 «Техносферная безопасность»  
 Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Математическое моделирование термического воздействия на окружающую среду при аварийном разрыве газо- нефтепровода

УДК 621.643 658.345

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM41	Третьякова Мария Олеговна		

Руководитель

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

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Петухов Олег Николаевич	К.Э.Н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	К.Т.Н		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭБЖ ИНК ТПУ	Романенко Сергей Владимирович	д.х.н., профессор		

Томск – 2016 г.

## Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P1	Применять глубокие математические, естественно-научные, социально-экономические и профессиональные знания при осуществлении изысканий и инновационных проектов создания и оптимизации методов и средств обеспечения безопасности человека и окружающей среды от техногенных и антропогенных воздействий
P2	Создавать и использовать на основе глубоких и принципиальных знаний необходимое оборудование, инструменты и технологии по защите человека в техносфере, а также для повышения надежности и устойчивости технических объектов, поддержания их функционального назначения в условиях жестких экономических, экологических, социальных и других ограничений
P3	Проводить инновационные инженерные исследования опасных природных и техногенных процессов и систем защиты от них, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов, формулировку выводов в условиях неоднозначности с применением глубоких и принципиальных знаний и оригинальных методов в области современных информационных технологий, современной измерительной техники и методов измерения.
P4	Организовывать и руководить деятельностью подразделений по защите среды обитания и безопасному размещению и применению технических средств в регионах, осуществлять взаимодействие с государственными службами в области экологической, производственной, пожарной безопасности, защиты в чрезвычайных ситуациях, применять на практике теории принятия управленческих решений и методы экспертных оценок.
P5	Организовывать мониторинг в техносфере, составлять краткосрочные и долгосрочные прогнозы развития ситуации на основе его результатов с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности,

	анализировать и оценивать потенциальную опасность объектов экономики для человека и среды обитания и разрабатывать рекомендации по повышению уровня безопасности объекта
P6	Проводить экспертизу безопасности и экологичности технических проектов, производств, промышленных предприятий и территориально-производственных комплексов, аудит систем безопасности, осуществлять мероприятия по надзору и контролю на объекте экономики, территории в соответствии с действующей нормативно-правовой базой
<b>Общекультурные компетенции</b>	
P7	Использовать глубокие знания в области проектного менеджмента, в том числе международного менеджмента, находить и принимать управленческие решения с соблюдением профессиональной этики и норм ведения инновационной инженерной деятельности с учетом юридических аспектов в области техносферной безопасности.
P8	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной профессиональной среде, включая разработку документации, презентацию и защиту результатов инновационной инженерной деятельности.
P9	Эффективно работать индивидуально, а также в качестве руководителя группы с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области техносферной безопасности, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам
P10	Демонстрировать глубокое знание правовых, социальных, экологических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

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



Институт неразрушающего контроля  
 Направление/специальность – 20.04.01 «Техносферная безопасность»  
 Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой  
 \_\_\_\_\_ Романенко С.В.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1ЕМ41	Третьяковой Марии Олеговне

Тема работы:

Математическое моделирование термического воздействия на окружающую среду при аварийном разрыве газо- нефтепровода	
Утверждена приказом директора ИНК (дата, номер)	15.04.2016 г. №2841/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.05.2016 г
--	--------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- наименование объекта исследования (радиус зажигания растительного покрова при аварийных ситуациях на трубопроводах)</li> <li>- режим аварий (периодический);</li> <li>- вид горючей жидкости (нефть, сжиженный газ);</li> <li>- массы разлившегося горючего вещества (10т, 20т, 40т, 60т);</li> <li>- влагосодержание растительного покрова (0.2; 0.4; 0.6; 0.8);</li> <li>- запас (0,2; 0,4; 0,6)</li> <li>- объекты должны отвечать всем требованиям взрыво- и пожаробезопасности для использования в производстве.</li> </ul>	<p>Объектом исследования является процесс зажигания лесного массива и окружающих объектов при авариях на трубопроводах.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- аналитический обзор по литературным источникам с целью достижений мировой науки техники в рассмотрении области;</li> </ul>	<p>Разработать математическую модель разрыва трубопровода; определить максимальные размеры зон зажигания для различных влагосодержаний, запаса и масс выделившегося горючего вещества; провести анализ результатов.</p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- постановка задачи исследования;</li> <li>- содержание процедуры исследования;</li> <li>- обсуждение результатов выполненной работы;</li> <li>- наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке;</li> <li>- заключение по работе</li> </ul>	
---	--

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

1. Распределение контрольных объемов для скалярных функций и компонентов скорости  $v_i$ .
2. Пример разбиения расчетной области на контрольные объемы на плоскости.
3. Типичный контрольный объем для двумерного случая.
4. Схема процесса зажигания лесного массива.
5. График зависимости размеров зон зажигания от количества выделившегося горючего вещества для различных влагосодержаний.
6. График зависимости размеров зон зажигания от количества выделившегося горючего вещества для различных запасов.

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	к.э.н., доцент Петухов Олег Николаевич
«Социальная ответственность»	к.т.н., старший преподаватель Романцов Игорь Иванович

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

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ЕМ41	Третьякова Мария Олеговна		

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



Институт неразрушающего контроля  
 Направление/специальность – 20.04.01 «Техносферная безопасность»  
 Уровень образования: Магистратура  
 Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности  
 Период выполнения (осенний/весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

<b>Магистерская диссертация</b>
---------------------------------

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

Срок сдачи студентом выполняемой работы:	29.05.2016 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
14.03.2016	Введение	<b>2</b>
17.03.2016	1. Обзор литературы 1.1. Основные понятия и определения 1.2. Математическое моделирование аварийных ситуаций	<b>8</b>
25.03.2016	2. Математическое моделирование термического воздействия на окружающую среду при аварийном разрыве газо-нефтепровода 2.1. Физическая постановка задачи	<b>10</b>
30.03.2016	2.2. Математическая постановка задачи	<b>10</b>
10.04.2016	3. Метод решения 3.1. Метод контрольного объема 3.2. Алгоритм решения	<b>10</b>
25.04.2016	3.3. Результаты численных решений	<b>10</b>
05.05.2016	4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	<b>10</b>
14.05.2016	4.2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	<b>10</b>
16.05.2016	4.3. Планирование научно-исследовательских работ 4.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	<b>10</b>
20.05.2016	5. Социальная ответственность	<b>10</b>
26.05.2016	Заключение	<b>10</b>

Составил преподаватель:

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

**СОГЛАСОВАНО:**

<b>Зав. кафедрой</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ЭБЖ ИНК ТПУ	Романенко Сергей Владимирович	д.х.н., профессор		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНИНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1ЕМ41	Третьякова Мария Олеговна

<b>Институт</b>	ИНК	<b>Кафедра</b>	ЭБЖ
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Техносферная безопасность

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

<p>1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i></p> <p>2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i></p> <p><i>Использованная система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i></p>	<p><i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах и изданиях, нормативно-правовых документах; наблюдение.</i></p>
--	---

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

<p><i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведение НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i></p>	<p><i>Определение потенциального потребителя результатов исследования, SWOT-анализ, определение возможных альтернатив проведения научных исследований</i></p>
<p><i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i></p>	<p><i>Планирование этапов работы, определение календарного графика и трудоемкости работы, расчет бюджета</i></p>
<p><i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i></p>	<p><i>Оценка сравнительной эффективности проекта</i></p>

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

<p><i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i></p> <p><i>Матрица SWOT</i></p> <p><i>Альтернативы проведения НИ</i></p> <p><i>График проведения и бюджет НИ</i></p> <p><i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i></p>	
--	--

<b>Дата выдачи задания по линейному графику</b>	01.03.2016 г.
---	---------------

### Задание выдал консультант:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Петухов Олег Николаевич	к.э.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1ЕМ41	Третьякова Мария Олеговна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1ЕМ41	Третьякова Мария Олеговна

<b>Институт</b>	ИНК	<b>Кафедра</b>	ЭБЖ
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Техносферная безопасность

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. <i>Описание рабочего места (кабинет №403 лаборатории, оборудованная компьютерами) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вредных проявлений факторов производственной среды (освещение, шум, микроклимат);</li> <li>- опасных проявлений факторов производственной среды (электрической и пожарной природы).</li> </ul>	<p>В кабинете №403 лаборатории находится два рабочих места с ПЭВМ. Высота кабинета 3 м, длина –8,7 м, ширина – 3,2 м.</p> <p>На работающего на ПЭВМ в кабинете №403 лаборатории постоянно или периодически действуют следующие опасные и вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Микроклимат.</li> <li>2. Шум.</li> <li>3. Освещенность рабочей зоны.</li> <li>4. Электрический ток.</li> <li>5. Напряженность трудового процесса.</li> </ol> <p>Негативное воздействие на окружающую природную среду. Чрезвычайных ситуаций.</p>
<p>2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<p>СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 "Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий"</p> <p>СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы"</p> <p>"СН 2.2.4/2.1.8.562-96. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. 2.1.8. Физические факторы окружающей природной среды. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.</p> <p>НПБ 105-03. Об утверждении норм пожарной безопасности "Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности"</p>
<p><b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b></p>	
<p>1. <i>Анализ выявленных вредных и</i></p>	<p>Обоснование допустимых норм вредных и опасных</p>

<p><i>опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- микроклимат;</li> <li>- освещенность;</li> <li>- электробезопасность;</li> </ul> <p><i>(причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения);</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- шум;</li> <li>- напряженность трудового процесса.</li> </ul>	<p>факторов на работающего на ПЭВМ:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- микроклимат;</li> <li>- освещенность;</li> <li>- шум.</li> </ul> <p>Рекомендации по уменьшению воздействия вредных и опасных факторов на работающего на ПЭВМ.</p>
<p>2. <i>Охрана окружающей среды:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- экологическая безопасность.</li> <li>- разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НПД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>Экологическая безопасность. Изучение этапов утилизации ПЭВМ.</p>
<p>1. <i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- перечень возможных ЧС на объекте;</li> <li>- выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>- разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>- разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p>Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.</p>
<p><b>Перечень графического материала:</b></p>	
<p>1. <i>Схема кабинета № 403 лаборатории</i></p> <p>2. <i>Размещение светильников в помещении</i></p> <p>3. <i>План эвакуации из кабинета №403 лаборатории</i></p>	<p>Рисунок 14 – Схема кабинета № 403</p> <p>Рисунок 15 – Размещение светильников в помещении</p> <p>Рисунок 16 – План эвакуации из кабинета №403 лаборатории</p>

<b>Дата выдачи задания по линейному графику</b>	01.03.2016 г.
---	---------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ЕМ41	Третьякова Мария Олеговна		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 90 с., 16 рис., 23 табл., 21 источников, 2 прил.

Ключевые слова: магистральные трубопроводы; математическое моделирование; тепловое излучение; огненный шар; зоны зажигания.

Объектом исследования является: процесс зажигания лесного массива и окружающих объектов при авариях на трубопроводах.

Цель работы: математическое моделирование термического воздействия огненного шара, образовавшегося при разрыве трубопровода, на лесной массив и окружающие объекты и определение максимальных размеров зон зажигания.

В процессе исследования проводились: математическое моделирование; определение размеров зон зажигания для различных влагосодержаний, запаса и масс выделившегося горючего вещества.

В результате исследования с помощью программы «Fire» получены распределения температур и концентраций компонентов газовой фазы. Определены размеры зон зажигания в зависимости от влагосодержания, запаса и массы горючего вещества.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: данная программа позволяет, на основе данных о массе выделившегося горючего вещества и состоянии растительного покрова определить размеры зон зажигания и использовать их для профилактики аварийных ситуаций.

Степень внедрения: нефтяные и газовые предприятия.

Область применения: газо- нефтепроводы

Экономическая эффективность/значимость работы: данная работа может быть использована для профилактических мероприятий на объектах магистральных трубопроводов.

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

## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.004–91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

СТО Газпром 2-3.5-454-2010 Правила эксплуатации магистральных газопроводов. Стандарт организации.

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

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**Трубопровод:** инженерное сооружение, которое предназначено для транспортировки жидких веществ и газообразных, пылевидных и разжиженных масс, а также твёрдого топлива и иных твёрдых веществ в виде раствора под воздействием разницы давлений в поперечных сечениях трубы.

**Газопровод:** предназначен для транспортировки попутного искусственного, нефтяного и природного газа. Стратегические газопроводы предназначаются для передачи на дальние расстояния больших объёмов газа — на экспорт к предприятиям, осуществляющим газовый синтез.

**Тепловое излучение:** электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет энергии теплового движения атомов и молекул (т.е. внутренней энергии).

**Горючие жидкости (ГЖ):** жидкость, способная воспламеняться при воздействии источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления, т. е. характеризующаяся наличием температуры воспламенения.

**Огненный шар (ОШ):** специфическая структура паровоздушной смеси, образующуюся при залповом выбросе большого количества (от одной до нескольких сотен тонн) сжатого или сжиженного газа или нефти в открытое пространство при неблагоприятных атмосферных условиях (отсутствие ветра) с дальнейшим зажиганием огненного шара от постороннего источника.

## Оглавление

Введение.....	14
1. Обзор литературы .....	15
1.1. Основные понятия и определения .....	15
1.2. Математическое моделирование аварийных ситуаций.....	19
2. Математическое моделирование термического воздействия на окружающую среду при аварийном разрыве газо- нефтепровода.....	21
2.1. Физическая постановка задачи .....	21
2.2. Математическая постановка задачи.....	24
3.Метод решения.....	28
3.1. Метод контрольного объема.....	28
3.2 Алгоритм решения.....	36
3.3. Результаты численных расчетов и их анализ.....	38
4 Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережения».....	46
5. Социальная ответственность .....	62
Заключение .....	76
Список используемых источников.....	77
Приложение А .....	79
Приложение В.....	90

## Введение

Одной из наиболее актуальных проблем в наше время является тема использования газо- нефтепроводов и аварийные ситуации, связанные с ними. Разрыв газо- нефтепроводов может сопровождаться большим количеством человеческих жертв и потерей материальных ценностей. Во избежание человеческих жертв и неблагоприятных последствий необходимо знать наперед масштабы возможной аварии, чтобы как можно быстрее её предотвратить.

С помощью программы «Fire» стало возможным определение масштабов аварии, по известным данным, а именно количество выделившегося горючего, влагосодержания и др., а, следовательно, и локализация аварии в кратчайшие сроки.

Целью моего исследования: математическое моделирование термического воздействия огненного шара, образовавшегося при разрыве трубопровода, на лесной массив и окружающие объекты и определение максимальных размеров зон зажигания.

Задачи исследования:

1. Разработать постановку задачи о зажигании полого леса и окружающих объектов от светового излучения.
2. Выполнить численное моделирование процесса зажигания с помощью программы «Fire».
3. Определить максимальные размеры зон зажигания лесного покрова и окружающих объектов при разрыве трубопровода.
4. Представить полученные результаты в виде графиков и провести их анализ.

## 1. Обзор литературы

### 1.1. Основные понятия и определения

Трубопровод — инженерное сооружение, которое предназначено для транспортировки жидких веществ и газообразных, пылевидных и разжиженных масс, а также твёрдого топлива и иных твёрдых веществ, которые представляют собой раствор, в поперечных сечениях трубы под воздействием разницы давлений. [1]

Газопровод — предназначен для транспортировки попутного искусственного, нефтяного и природного газа. Газопроводы используются для транспортировки огромных объемов газа на большие расстояния – на экспорт к компаниям, которые осуществляют газовый синтез [2].

Газопроводы можно разделить на: [3]:

- Магистральные газопроводы — используются для транспортировки газа на значительные расстояния. На магистрали через некоторые расстояния установлены газокompрессорные станции, которые поддерживают давление в трубопроводе. На газораспределительных станциях, которые находятся в конце пути магистрального газопровода, понижается давление, до такого уровня, который необходим для обеспечения потребителей.

- Газопроводы распределительных сетей — предназначаются для транспортировки газа к конечному потребителю от газораспределительных станций.

По давлению в магистрали подразделяются на [2]:

- Магистральные:
  - первой категории — до 10 МПа
  - второй категории — до 2,5 МПа
- Распределительные:
  - низкого давления — до 0,005 МПа;
  - среднего — от 0,005 до 0,3 МПа;
  - высокого — второй категории от 0,3 до 0,6 МПа и первой

категории — от 0,6 до 1,2 МПа (для СУГ до 1,6МПа).

По типу прокладки:

- подводные;
- наземные;
- подземные;
- надземные.

Нефтепровод — используется для передачи сырой нефти. При этом нефть подогревается, что в результате препятствует затвердеванию парафинов, входящих в ее состав [2].

Различают три вида нефтепроводов:

- Промысловые, как понятно из названия, соединяют скважины с различными объектами на промыслах.
- Межпромысловые ведут от одного месторождения к другому, магистральному нефтепроводу или просто относительно удаленному промышленному объекту, находящемуся за пределами исходного нефтедобывающего комплекса.
- Магистральные нефтепроводы прокладывают для доставки нефти от месторождений до мест перевалки и потребления, к которым, в том числе, относятся нефтебазы, нефтеналивные терминалы, нефтеперерабатывающие заводы. [3]

Газо- нефтепроводы являются распространенными опасными производственными объектами, предназначенными для транспортирования природного газа (пропана, бутана и др.) и нефти на дальние расстояния. Имеются три взаимосвязанные группы причин, которые способствуют возникновению и развитию аварий на объектах трубопроводов:

- отказы оборудования (физический износ; коррозии; ошибки при проектировании; механические повреждения; усталостные эффекты металла, которые не были выявлены при освидетельствовании; дефекты в сварных соединениях; нарушение режима эксплуатации; превышение давления);

– ошибки персонала (проведение ремонтных и профилактических работ; ошибки при пуске и остановке оборудования; ошибки при локализации аварийных ситуаций);

– нерасчетные внешние воздействия природного и техногенного характера (штормовые ветры и ураганы, снежные заносы, грозовые разряды, ливневые дожди, диверсии, механические повреждения). [4]

Данные причины могут привести к различного вида аварийных ситуаций на объектах трубопроводов.

Известно, что, как правило, крупная техногенная катастрофа на объектах магистральных трубопроводов сопровождается возникновением пожаров на объектах, расположенных в непосредственной близости аварии, а также массовых лесных пожаров и возгоранием самого растительного покрова. В связи с этим, представляет интерес прогнозирование этого процесса на возникновение, развитие и масштабы пожаров. Ввиду того, что естественные исследования в решении данных проблем невозможны, актуальными являются методы математического моделирования этих проблем.

Опасными факторами, которые характерны для аварий с пожарами на объектах магистральных трубопроводов, является тепловое излучение при возникновении вспышек – пожаров, факельном горении истекающих из оборудования паров и газов, пожаров при проливах горючих жидкостей (ГЖ), огненных шарах. Возможность развития аварий при возникновении огненных шаров достаточно своеобразен и относительно мало изучен. Данный факт можно объяснить тем, что невозможно крупномасштабное изучение данного явления, сложна фиксация физических закономерностей непосредственно в процессе аварии в связи со случайной его природой и относительной кратковременностью самого события (10÷40 сек.) [6].

Эволюция огненного шара (ОШ) может происходить по двум сценариям. При первом сценарии, зажигание частично перемешанного с воздухом топлива происходит на начальной этапе аварийного выброса, при

этом горение смеси будет происходить в диффузионном режиме. При втором сценарии – зажигание происходит с задержкой, при этом происходит перемешивание воздуха со значительной частью топлива, продукты горения и вовлекаемого воздуха интенсивно расширяются и, впоследствии, объем горящего облака значительно превосходит начальный объем горючего газа. В связи с этим, второй сценарий является наиболее опасным по интенсивности теплового воздействия на окружающие объекты[6].

Под огненным шаром понимают специфическую структуру паровоздушной смеси, образующуюся при залповом выбросе большого количества (от одной до нескольких сотен тонн) сжатого или сжиженного газа или нефти в открытое пространство при неблагоприятных атмосферных условиях (отсутствие ветра) с дальнейшим зажиганием огненного шара от постороннего источника. Горение данного облака можно охарактеризовать возникновением на определенной высоте над земной поверхностью фронта пламени сферической формы, которое сопровождается тепловым излучением, оказывающим поражающее действие на людей и объекты, которые находятся в зоне поражения. Оценка интегральных характеристик ОШ в основном во всех теоретических моделях проводится по тепловому балансу между энтальпией высокотемпературных продуктов горения стехиометрической газовой смеси и химической энергией топлива.

На таких объектах создание мероприятий по обеспечению пожарной безопасности должно быть основано на детальной оценке их пожароопасности, в соответствии с действующим законодательством. Оценка риска поражения, должна быть основана на количественной оценке, а именно степени их воздействия на поражаемые объекты, в том числе и биологические, в динамике эволюции огненного шара и самих поражающих факторов. В рассмотренном плане большой практический и научный интерес представляет количественное моделирование (имитационное) воздействия излучения огненного шара на окружающую среду. Оценка рисков, которая сопутствует возможным предполагаемым авариям, включает в себя

достаточно большого проведения анализа сценариев развития аварий. Число сценариев может измеряться как десятками, так и сотнями. Поэтому к математической модели, которая описывает процесс развития аварии (в том числе и при возникновении ОШ), помимо требований точности и адекватности необходимо предъявлять и требования по быстрдействию [6].

Решение данной задачи дает возможность обосновывать управленческие решения по ликвидации последствий аварии и прогнозировать опасные зоны поражения.

## **1.2. Математическое моделирование аварийных ситуаций**

В статье [7] изучается зависимость размеров противопожарных разрывов от скорости ветра. Численные расчеты проводятся с помощью математической модели лесных пожаров, полученной на основе законов механики реагирующих сред и экспериментальных данных. Применение данной математической модели позволяет оценить скорость распространения верховых лесных пожаров в зависимости от характеристик лесного массива и метеорологических условий. На основе полученных данных описывается картина течения в зоне распространения верхового лесного пожара, которая изменяется в зависимости от исходных данных. Например, с увеличением скорости ветра изменяется наклон изотерм по направлению скорости ветра. Векторное поле скорости образует вихрь, который с увеличением скорости ветра разрушается. С помощью представленной модели определены размеры противопожарных разрывов для профилактических мероприятий по предотвращению распространения верховых лесных пожаров. На основе данных результатов получена зависимость размеров противопожарных разрывов от скорости ветра. [7]

Процесс распространения и возникновения верховых лесных пожаров был теоретически исследован в статье [8]. Лес рассматривался как многофазная многокомпонентная пористая реагирующая среда. Проведено численное решение уравнения Рейнольдса с учетом химических реакций для турбулентного течения. Дискретный аналог был получен с помощью метода

контрольного объема. В результате численных расчетов получены распределения полей летучих продуктов пиролиза, температуры, концентрации кислорода, скорости и объемных долей конденсированной фазы в различные моменты времени и горения. С помощью модели можно получать контуры распространения верховых лесных пожаров, зависящие от состояния полога леса и свойств: влагосодержания, направления и скорости ветра, вида и запаса лесных горючих материалов, неоднородностей в лесном массиве и т.д. [8].

В данной магистерской диссертации разработана математическая модель воздействия светового излучения от огненного шара, появившегося в результате аварийного разрыва трубопровода (или емкости с горючим) на растительность или другие окружающие объекты (здания, сооружения и т.д.). 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 трубопровода до лесного массива и до окружающих объектов.

## 2. Математическое моделирование термического воздействия на окружающую среду при аварийном разрыве газо- нефтепровода

### 2.1. Физическая постановка задачи

В результате разрыва трубопровода образовался огненный шар. В результате воздействия теплового излучения происходит возгорание лесного массива и окружающих объектов. Необходимо определить размеры зон зажигания до лесного массива (Рисунок 1) и до окружающих строений (Рисунок 2).

Пусть огненный шар находится на высоте  $H$  от поверхности Земли (Рисунок 1, Рисунок 2),  $d$  - расстояние от огненного шара до текущей точки поверхности лесного массива и окружающих объектов,  $h$  - высота рассматриваемого леса,  $O$  - эпицентр,  $r^*$  - радиус зоны зажигания. На верхнюю границу  $z = h$  лесного массива действует интенсивный лучистый поток  $q_R(r, t)$ , который ослабляется по мере удаления от эпицентра  $O$ . Максимум интенсивности источника достигается при  $t = t_m$ , далее она затухает до нуля согласно данным о  $q_R(r, t)$ , которая может быть аппроксимирована следующим образом [9]

$$q_R(r, t) = \frac{t_p P_m \sin L}{4\pi D^2} \begin{cases} t/t_m, & t < t_m \\ \exp(-k_0(t/t_m - 1)), & t \geq t_m \end{cases}, \quad (1)$$
$$t_m = 0.92 \times M^{0.303}, P_m = 450 \times 10^3,$$

где  $t_m$  – 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 ( $k_0=0.75$ );

$M$  – масса топлива, кг.

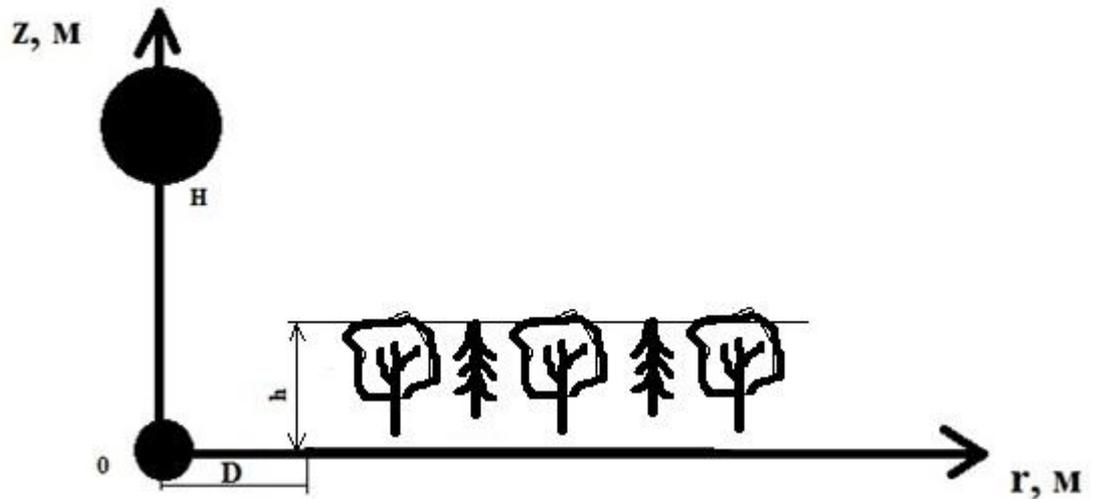


Рисунок 1 – Процесс зажигания лесного массива

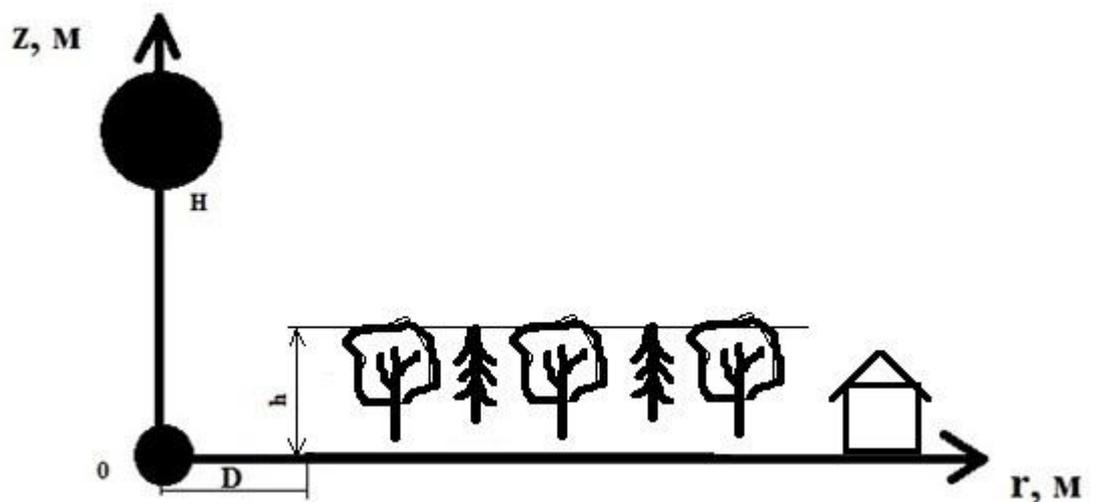


Рисунок 2 - Процесс зажигания лесного массива и окружающих объектов

При поступлении лучистой энергии в растительный покров ( $z_0 \leq z \leq h$ ) происходит испарение влаги, затем термическое разложение твердого материала, которое сопровождается выделением летучих продуктов пиролиза и нагрев горючих лесных материалов. Затем последние взаимодействуя с кислородом воздуха сгорают в атмосфере. Нагретые объемы воздуха всплывают вверх из-за наличия силы тяжести, поэтому процессы объемного зажигания лесного массива оказываются, в общем случае, связаны с

гидродинамикой течения. Так как интенсивность лучистого потока на периферии от эпицентра взрыва в полог леса мала, то там зажигания не происходит. Следовательно, за время действия источника излучения образуется зона первоначального зажигания леса радиусом  $r^*$ . Данная зона имеет форму круга в идеальном случае. Ее развитие в последующем определяется взаимодействием поля ветра с восходящими потоками, так как они осуществляют разброс по окружающей территории и выносят в приземный слой атмосферы твердых горящих элементов, а также географическими и метеорологическими условиями в рассматриваемом районе [9].

В данном исследовании будем полагать, что в атмосфере скорость ветра мала и энергия в основном переносится благодаря излучению. С помощью данных допущений возможно рассмотрение задачи осесимметричной постановке. Так как в совокупности различные физические факторы сопровождают процесс зажигания лесного массива, то его описание следует проводить на разных уровнях сложности. Совокупность моделей дает возможность оценить роль отдельных факторов, которые опускаются с целью упрощения явления [9].

В данной работе будут сделаны основные физические представления и допущения об объекте исследования, которые необходимы для понимания математической модели. Будем считать, что:

- течение симметрично относительно вертикальной оси  $z$ , которая имеет начало в центре рассматриваемой области и направлена вверх вертикально;
- течение является турбулентным, молекулярный перенос не учитывается;
- из-за малой скорости течения в сравнении со скоростью звука, плотность газовой фазы не зависит от давления;
- полог леса считается недеформируемой средой. Считаем, что полог леса можно моделировать однородной двухтемпературной многофазной пористой реагирующей средой.

Выделяются температуры газовой  $T$  и конденсированной (твердой)  $T_s$  фаз. К первой относится влага, минеральная часть лесных горючих материалов, конденсированные продукты пиролиза и сухое органическое вещество.

Будем выделять в газовой фазе только нужные компоненты для описания реакции горения, то есть массовые концентрации  $c_\alpha$  ( $\alpha=1$  – кислород, 2 - горючие продукты пиролиза лесных горючих материалов, 3 – остальные инертные компоненты, включая пары воды). Твердая фаза, которая представляет горючий материал (тонкие веточки до 6 мм и хвоя), воду в жидко-капельном состоянии и конденсированные продукты пиролиза, не имеет ее объемной долей и скорости, в сравнении с газовой фазой, пренебрегаем в соответствующих уравнениях, так как в единице объема леса находится  $<0.5$  кг. Данная пористая среда оказывает сопротивление любому перемещению воздушных масс с силой  $\vec{F} = \rho s c_d |\vec{v}| \vec{v}$ , с точки зрения гидродинамики. Считается, что среда находится локально-термодинамическом равновесии. Описание турбулентного конвективного переноса, которое обусловлено действием силы тяжести происходит с использованием уравнений Рейнольдса [9].

Также будем учитывать физико-химические процессы, которые протекают в пологе леса, скорости химических реакций которых  $R_i$  ( $i=1, 2, 3, 5$ ) в функции других параметров и температуры будем считать известными. В данном случае перенос энергии происходит в результате излучения. В основном твердая фаза переизлучает, отражает и поглощает в пологе леса. Для описания переноса в такой специфической сплошной среде использовалось диффузионное приближение. Так как длина свободного пробега излучения в пологе  $lR \ll l_0$ ,  $l_0 \sim 10-15$  м,  $lR \sim 1$  м ( $l_0$  - характерный масштаб высоты) то это является оправданным [9].

## 2.2. Математическая постановка задачи

Ось  $z$  направлена вверх, ось  $r$ - вдоль поверхности земли (Рисунок 1).

Для многофазной среды используются общие законы сохранения, чтобы описать процесс тепломассопереноса в объеме с лесной растительностью. Для описания перемещения в атмосфере воздушных потоков используются уравнения Рейнольдса так как перемещение носит турбулентный характер. В цилиндрической системе координат сформулированная задача будет решена с помощью следующих уравнений [9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = \dot{m}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v w) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r \rho \overline{v'^2}) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{v'w'}) - \rho s c_d v \sqrt{v^2 + w^2}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v w) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w^2) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r \rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'^2}) - \rho s c_d w \sqrt{v^2 + w^2} - \rho g; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w c_p T) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r \rho c_p \overline{v'T'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho c_p \overline{w'T'}) + k_g (c U_R - 4\sigma T^4) + \\ + q_s R_s + \alpha_v (T_s - T); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_a) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v c_a) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w c_a) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r \rho \overline{v'c'_a}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'c'_a}) - R_{s\alpha}, \alpha = 1, 2; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} \right) - k c U_R + 4\sigma (k_g T^4 + k_s T_s^4) = 0, k = k_g + k_s; \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \varphi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (c U_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s); \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \\ \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_{\alpha} = 1, p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_{\alpha}}{M_{\alpha}},$$

$$\dot{m} = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3, R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, R_{52} = \nu_0 (1 - \alpha_c) R_1 - R_5. \quad (10)$$

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

$$R_3 = k_3 \rho \varphi_3 s_{\sigma} c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right), R_5 = k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right).$$

Граничные и начальные условия для системы уравнений (2)-(10) имеют следующий вид:

$$t = 0: v = 0, w = 0, T = T_e, c_{\alpha} = c_{\alpha e}, T_s = T_e, \varphi_i = \varphi_{ie}; \quad (11)$$

$$r = 0: v = 0, \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial r} = 0, \frac{\partial U_R}{\partial r} = 0; \quad (12)$$

$$r = r_e: \frac{\partial v}{\partial r} = 0, \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial r} + \frac{c}{2} U_R = 0; \quad (13)$$

$$z = z_0: \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial z} = 0, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2} U_R = 0; \quad (14)$$

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

Здесь:

$p$  - давление;

$z_0$  - уровень шероховатости;

$g$  - ускорение свободного падения. 4

$R_1 - R_5, R_{5\alpha}$  - массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования сажи и пепла и образования  $\alpha$  - компонентов газодисперсной фазы;

$T, T_s$  - температура газовой и конденсированной фаз;

$c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$  - удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные

доли  $i$  - ой фазы (1 - сухое органическое вещество, 2 - вода в жидко - капельном состоянии, 3 - конденсированные продукты пиролиза, 4 - минеральная часть, 5 - газовая фаза);

$c_{\alpha}$  - массовые концентрации ( $\alpha=1$  - кислород, 2 - CO, 3 - инертные компоненты воздуха);

$U_R$  - плотность энергии излучения;

$k$  - коэффициент ослабления излучения;

$k_g, k_s$  - коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз;

$q_i, E_i, k_i$  - тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза;

$s\sigma$  - удельная поверхность элемента лесных горючих материалов;

$M_{\alpha}, M_c, M$  - молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси;

$\alpha_v$  - коэффициент обмена фаз,

$s, c_d$  - удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полога леса;

$v, w$  - проекции скорости на оси  $r$  и  $z$ ;

$\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана;

$c$  - скорость света;

$\alpha_c, \nu_0$  - коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза;

$\dot{m}$  - массовая скорость образования газодисперсной фазы.

Индексы «0» и «e» относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно. Верхний индекс штрих " ' " относится к пульсационной составляющей данной величины. Использовалась локально - равновесная модель турбулентности [9].

### 3.Метод решения

#### 3.1. Метод контрольного объема

В программе «Fire» все уравнения решаются методом контрольного объема [9]. Дифференциальные уравнения, которые описывают процессы массо- и теплообмена и гидродинамики подчиняются обобщенному закону сохранения. Искомая функция имеет обозначение  $\Phi$ , тогда обобщенное дифференциальное уравнение принимает в тензорной форме вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_\Phi; \quad (16)$$

Где

$v_i$  – компоненты вектора скорости,

$x_i, t$  - пространственные и временная координаты,

$\rho$  – плотность,

$\Gamma_\Phi$  - коэффициент переноса (например,  $\Gamma_\Phi$  — коэффициент турбулентной диффузии, теплопроводности, вязкости и т.д.),

$S_\Phi$  — источниковый член. За счет химических реакций в  $S_\Phi$  может входить сток (приток) тепла в уравнении энергии или в результате химических реакций уменьшение (увеличение) концентраций компонентов в уравнении диффузии. От смысла переменной  $\Phi$  зависит конкретный вид  $S_\Phi$  и  $\Gamma_\Phi$  (так как если использовать действительно  $S_\Phi$  и  $\Gamma_\Phi$  будет очень много обозначений нижних индексов в дальнейшем, то индексы будут опускаться). В (16) также подразумевается суммирование по индексу  $i$ . При решении одномерных задач  $i=1$ , двумерных  $i=1,2$  [10].

Чтобы записать граничные и начальные условия (на границах расчетной области) уравнение (16) в общем виде примет вид:

$$\Phi|_{t=0} = \Phi_e, \alpha_1 \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \Big|_{x_i=x_{ie}} + \alpha_2 \Phi \Big|_{x_i=x_{ie}} = \alpha_3 \quad (17)$$

Здесь  $x_{ie}$  – на соответствующей границе расчетной области значение аргумента  $x_i$ ,

$\alpha_i$  – функция аргументов  $t$  и  $x_i$ .

В рассматриваемых математических моделях учитываются химические реакции, и поэтому дополнительно используются обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка или уравнения химической кинетики, записывающиеся в общем виде следующим образом

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -K(t)\Phi + F(t), K(t) \geq 0, F(t) \geq 0, \Phi|_{t=0} = \Phi_e. \quad (18)$$

На основе метода контрольного объема, который детально описан в [10], был построен дискретный аналог для уравнений вида (16) с соответствующими краевыми условиями типа (17).

Главная идея метода заключается в том, что расчетная область разделяется на несколько непересекающихся контрольных объемов так, что в одном контрольном объеме содержится каждая узловая точка. В двумерном случае прямоугольник. По каждому контрольному объему интегрируются дифференциальные уравнения. Кусочные профили, которые описывают изменение функции  $\Phi$  между узловыми точками, используются для вычисления интегралов. Кусочные профили могут представлять собой различные функции (экспоненты, параболы, прямые, полиномы различных степеней и т.д.). Как показывает практика, наиболее оптимальным с точки зрения экономичности и точности при численной реализации являются полиномиальные профили. Закон сохранения выражается с помощью полученного дискретного аналога для конечного каждого контрольного объема для параметра состояния  $\Phi$ . Так же, как для бесконечно малого контрольного объема выражается закон сохранения с помощью дифференциального уравнения. При использовании метода контрольного объема точно происходят интегральные законы сохранения энергии, количества движения, масс и т.д. для каждой группы контрольных объемов и в любом контрольном объеме, а отсюда следует что и во всей расчетной области. Можно сделать вывод о том, что если применять малое количество контрольных объемов решение будет удовлетворять точным интегральным балансам во всей области, то есть дискретный аналог (разностная схема)

Патанкара - Сполдинга является консервативным. На Рисунке 3 представлен способ разбиения расчетной области для двумерного случая на контрольные объемы и типичный контрольный объем [10].

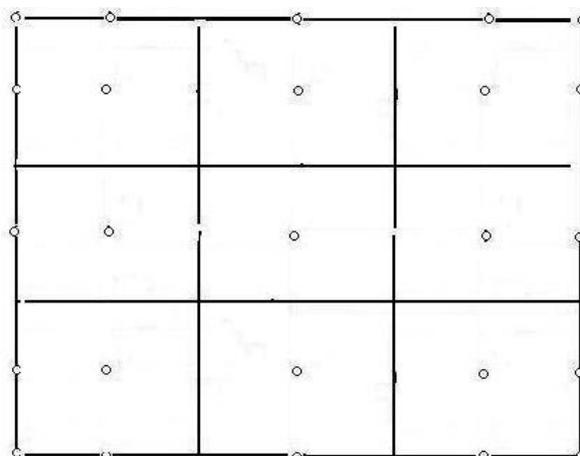


Рисунок 3 – Разбиение расчетной области на контрольные объемы на плоскости для двумерного случая.

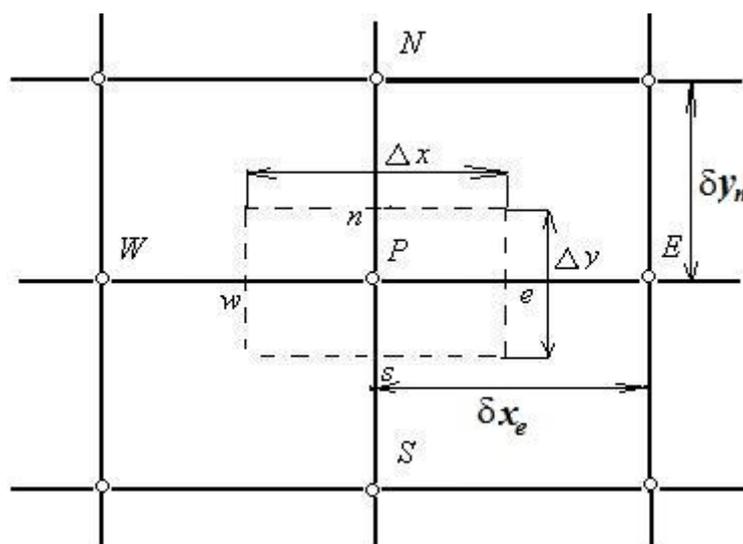


Рисунок 4– Характерный контрольный объем для двумерного случая

На Рисунке 4 изображена часть характерной двумерной сетки. Пунктирной линией для двумерной области с центром в точке  $P$  обозначен контрольный объем. буквами  $N, S, W, E$  обозначены центры соседних контрольных объемов (узлов). Расстояния до центров соседних контрольных объемов обозначены, например,  $\delta x_e, \delta y_n$  и т.д. Прописными буквами  $n, s, e$  обозначены соответствующие точки на границах контрольного объема.  $\Delta x$  и  $\Delta y$  – размеры контрольного объема [10].

Руководствуясь [13], где детально описан способ получения дискретного аналога с помощью метода контрольного объема, для трехмерного случая окончательный вид для уравнения (16) дискретный аналог имеет вид:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b \quad (19)$$

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [-F_e, 0], \quad a_W = D_w A(|P_w|) + [F_w, 0],$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + [-F_n, 0], \quad a_S = D_s A(|P_s|) + [F_s, 0],$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta x_1 \Delta x_2,$$

$$b = S_C \Delta x_1 \Delta x_2 + a_P^0 \Phi_P^0, \quad S = S_P \Phi + S_C, \quad a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta x_1 \Delta x_2}{\Delta t}.$$

В данных уравнениях  $\Phi_P^0$  и  $\rho_P^0$  обозначаем значения известные для времени  $t$ , а все другие величины ( $\Phi_P, \Phi_E, \Phi_W, \Phi_N, \Phi_S$  и т. д.) являются неизвестными величинами для времени  $t + \Delta t$ . Массовые расходы  $F_e, F_w, F_n, F_s$ , определены уравнениями:

$$F_e = (\rho v_1)_e \Delta x_2, \quad F_w = (\rho v_1)_w \Delta x_2, \quad F_n = (\rho v_2)_n \Delta x_1, \quad F_s = (\rho v_2)_s \Delta x_1,$$

соответствующие проводимости:

$$D_e = \frac{F_e \Delta x_2}{(\delta x)_e}, \quad D_w = \frac{F_w \Delta x_2}{(\delta x)_w}, \quad D_n = \frac{F_n \Delta x_1}{(\delta x)_n}, \quad D_s = \frac{F_s \Delta x_1}{(\delta x)_s}, \quad (20)$$

а числа Пекле:

$$P_e = F_e / D_e, \quad P_w = F_w / D_w, \quad P_n = F_n / D_n, \quad P_s = F_s / D_s.$$

Выражение типа  $[A, B]$  обозначает, что выбирается максимальный элемент из двух. Для функции  $A(|P|)$  рекомендуется схема со степенным законом [9]

$$A(|P|) = \left[ 0, (1 - 0, |P|)^5 \right] \quad (21)$$

Стоит сделать акцент, что физический смысл различных коэффициентов в (19) даже на этой стадии понятен. Коэффициенты в соседних точках  $a_E, a_W, a_N, a_S$  учитывают влияние диффузии и конвекции для шести граней контрольного объема, зависящие от проводимости [9]  $D$  и

массового расхода  $F$ . Известную величину  $\Phi$  характеризует член  $a_p^0 \Phi_p^0$  отнесенную к шагу по времени (для времени  $t$ ). Оставшиеся части интерпретируются аналогичным образом. Аналогичным образом интерпретируются оставшиеся члены.

Полагаем дифференцируемость и непрерывность функций в дискретном аналоге (19) необходимое число раз. Разностные уравнения (19) аппроксимируют исходную краевую задачу с помощью разложения в ряд Тейлора с погрешностью  $O(h+t)$ . В рамках дискретного аналога (19) граничные условия (17) имеют такой же порядок аппроксимации и аппроксимируются согласованным с внутренними узлами образом. Получение нефизических решений исключается так как дискретный аналог является неявным в основной системе уравнений. Изменяя шаг по времени  $\Delta t$  и размеры контрольных объемов с помощью метода пробных функций (решение известно заранее) проводилась практическая проверка сходимости и устойчивости. Разностные уравнения (19), как уже отмечалось выше, полностью консервативны в силу способа их построения [10].

Для получения дискретного аналога на границах расчетной области необходимо проинтегрировать уравнения типа (16), также нужно учитывать условия типа (17) на заданной границе. В случае когда контрольные объемы сдвинуты по определенному направлению то возникают половинные контрольные объемы на границах. Для скалярных функций и по остальным направлениям применяются нулевые контрольные объемы [10]. В дифференциальной форме граничное условие примет вид (22) если они используются для вертикальной правой границы трехмерной расчетной области.

$$\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} + \beta_2 \Phi = \beta_3 \quad (22)$$

Если на границах использованы половинные контрольные объемы [9], то дискретный аналог имеет вид:

$$a_p \Phi_p = a_w \Phi_w + b, \quad (23)$$

где  $a_p = a_w + a_p^0 - S_p \Delta x_1 \Delta x_2 + \beta_2 \Delta x_2$ ,  $b = S_c \Delta x_1 \Delta x_2 + a_p^0 \Phi_p^0 + \beta_3 \Delta x_2$ .

Выше приведены все остальные обозначения [10].

Дискретные аналоги получим аналогично если на соответствующей границе имеем граничные условия типа (17). Для случая нулевого контрольного объема, то есть соответствующий размер  $\Delta x_l$  на границе равен нулю. Так, используя (23), получим, например, для нулевого контрольного объема  $\Delta x_l=0$

$$a_p \Phi_p = a_w \Phi_w + b, \quad (24)$$

где  $a_p = a_w + \beta_2 \Delta x_2$ ,  $b = \beta_3 \Delta x_2$

Разностная неявная схема использовалась для вида (18) уравнений химической кинетики

$$\Phi^{n+1} = \frac{\Phi^n + F^{n+1}(t)\Delta t}{1 + K^{n+1}(t)\Delta t}. \quad (25)$$

Физическую природу переменной  $\Phi$  выражает то, что уравнение (25) для любых шагов по времени  $\Delta t$  обеспечивает положительность  $\Phi$  и имеет первый порядок аппроксимации по  $t$  устойчива.

Для уравнения количества движения  $\Phi$  обозначает одну из составляющих скорости  $v_i$  и свободному члену  $S$  и коэффициенту  $\Gamma$  следует придать соответствующий смысл. В связи с тем, что при расчете поля давления возникают трудности [10], обусловленные наличием первых производных, входящих в конвективные члены, и градиента давления (уравнение количества движения), предлагается использовать шахматные сетки для компонент скорости  $v_i$  [10]. На Рисунке 5 приведены примеры размещения контрольных объемов для компонент скорости относительно основных контрольных объемов для остальных функций ( $p$  – давление,  $T$  – температура  $\rho$  – плотность и др.). При таком расположении сетки составляющая скорости  $v_i$  размещается на гранях контрольных объемов, перпендикулярных направлению  $x_i$  [10].

Дискретные аналоги уравнений для других  $\Phi$ , рассчитываемых в узлах основной сетки отличаются от дискретных аналогов для компонент скорости

уравнения количества движения при применении шахматной сетки (Рисунок 5). Данное отличие имеет несущественный характер. Оно связано с использованием для аппроксимации уравнений количества движения контрольных объемов на шахматной сетке. Свою сетку можно использовать для любой зависимой переменной. Рассчитывая компоненты скорости необходимо определять их на сетке, отличающейся от сетки, которая используется для всех других переменных [10]. В других моделях для расчета составляющих компонентов скорости применялась смещенная сетка и использовалась в [11].

При использовании сдвинутых для уравнений движения сеток, компоненты вектора скорости рассчитываются в точках, которые лежат на гранях контрольных объемов определенных для функций скалярных величин (давление, концентрации, температура, и т.д.). Отсюда следует, что составляющие скорости  $v_i$  вдоль соответствующих осей  $x_i$  рассчитывается на поверхностях контрольных объемов, которые перпендикулярны направлениям осей  $x_i$ . Для двумерного случая на Рисунке 5 указаны стрелками точки, в которых определяется компоненты скорости  $v_i$ . Кругами изображены узловые точки для скалярных величин. Точки, в которых определяются компоненты скорости  $v_i$  по отношению к узловым точкам основной сетки смещены только по направлению оси  $x_i$  и это видно из анализа Рисунка 5. Простыми словами, на отрезках, которые соединяют две узловые соседние точки, лежат данные точки. На гранях контрольных объемов находятся точки для определения  $v_i$  между основными узловыми точками, в которых задаются скалярные функции (давление, концентрация, температура и т.д.) [10].

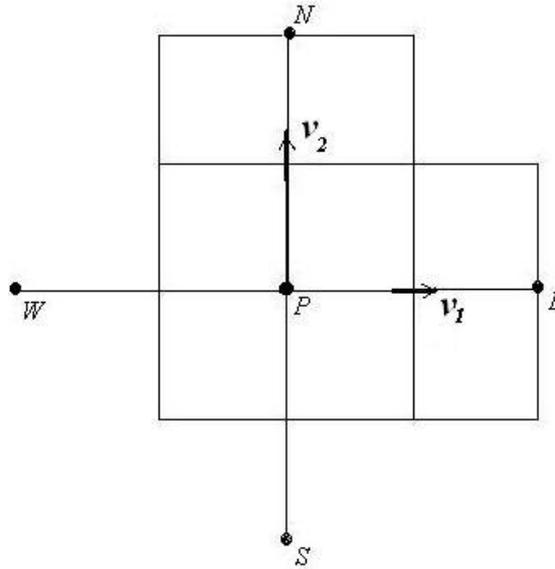


Рисунок 5 – Распределение контрольных объемов для скалярных функций и компонентов скорости  $v_i$

В связи с таким способом введения смещенной сетки, массовый расход через грани контрольных объемов можно теперь вычислять без интерполяции соответствующих компонентов скорости. Применение данного подхода определения сеток обеспечивает более удобный вид при записи дискретного аналога обобщенного дифференциального уравнения  $\Phi$ .

Так результирующий дискретный аналог для компонентов скорости  $v_i$  можно соответственно записать в виде [10]

$$\begin{aligned} a_e v_{1e} &= \sum a_{nb} v_{1nb} + b + (p_P - p_E) A_e, \\ a_n v_{2n} &= \sum a_{nb} v_{2nb} + b + (p_P - p_N) A_n. \end{aligned} \quad (26)$$

Здесь число соседних членов зависит от размерности задачи под знаком суммирования. Формулы (26) записаны в соответствии с (19). Отличие состоит в том, что соответствующие члены  $b$  определяется как и в (19), но проекции градиента давления на оси координат не включены в  $b$ , а выписаны отдельно. Коэффициенты  $A_e$ ,  $A_n$  определяют в двумерном случае  $A_e = \Delta x_2$ ,  $A_n = \Delta x_1$ .

Необходимо задать поле давления каким-либо способом или рассчитать, чтобы провести решение уравнения движения (26). Определим согласно [10] таким образом, поле давление, чтобы поле скорости удовлетворяло уравнению неразрывности. В [10] подробно изложена данная

методика. Для поправки давления вводилась вспомогательная функция. В [12] приведено получение дискретного аналога для поправки давления  $p'$ . Здесь  $p'$  определяется по формуле  $p' = p - p^*$ . Где  $p^*$  - приближенное поле давления,  $a_p$  - давление. Уравнение для сеточных значений поправки давления  $p'$  имеет вид

$$a_p p'_p = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + b, \quad (27)$$

где

$$a_E = \rho_e d_e \Delta x_2, a_W = \rho_w d_w \Delta x_2, a_N = \rho_n d_n \Delta x_1, a_S = \rho_s d_s \Delta x_1,$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S,$$

$$b = \frac{(\rho_P^0 - \rho_P) \Delta x_1 \Delta x_2}{\Delta t} + [(\rho v_1^*)_w - (\rho v_1^*)_e] \Delta x_2 + \\ + [(\rho v_2^*)_s - (\rho v_2^*)_n] \Delta x_1$$

Символом \* помечены значения скорости, которые получены при заданном поле давления  $p^*$ .

### 3.2 Алгоритм решения

Для представленной выше системы уравнений рассмотрим алгоритм решения для заданной области. Система уравнений является нелинейной и в связи с этим необходимо задавать приближения искомых функций. В данных условиях употребляются их значения с предыдущего слоя по времени. Начальные условия используются в качестве приближения на первом итерационном шаге расчета. В ходе численного решения использовалось расщепление по физическим процессам, то есть вначале рассчитываем гидродинамическую картину течения и распределения искомых скалярных функций (например  $c_a$ ,  $T$  и т.д.), а затем решаем уравнения химической кинетики для объемных долей фаз и учитываем химические источники для скалярных функций ( $T$ ,  $c_a$ ).

Рассчитаем поставленную задачу при помощи алгоритма SIMPLE [10]. SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) – процедура, разработанная для расчетов поля течения, означает полунявный метод для связывающих давление уравнений.

Алгоритм расчета поля течения SIMPLE описан в [10] и в других более поздних работах. Перечислим порядок выполнения основных операций.

1. Задаются поля давления  $p^*$ .

2. Решаются уравнения движения, таких, как уравнения

$$a_e u_e^* = \sum a_{nd} u_{nd}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e$$

$$a_n u_n^* = \sum a_{nd} v_{nd}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n$$

для получения  $u^*, v^*$ .

3. Решаются уравнения для  $p'$ .

4. Рассчитывается  $p$  из уравнения  $p = p^* + p'$  путем добавления  $p'$  к  $p^*$ .

5. Рассчитываются  $u, v, w$  с учетом соответствующих значений со звездочкой и с помощью формул для поправки скорости

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P + p'_E)$$

$$v_n = v_n^* + d_n (p'_P + p'_N).$$

6. Решаются дискретные аналоги для других  $\Phi$  (таких, как турбулентные характеристики, концентрация и температура), если они влияют на поле течения через физические свойства жидкости источниковые члены и т. д. (если какое-то определенное  $\Phi$  не влияет на поле течения, лучше рассчитать его после получения сходимости решения для поля течения).

7. Представляются скорректированные давления  $p$  как нового  $p^*$ , возвращение к пункту 2 и повторение всей процедуры до тех пор, пока не будет получено сходящееся решение.

Решая уравнения химической кинетики автоматически выбирался шаг по времени. Это позволило осуществлять процесс решения на втором этапе с уменьшенным шагом по времени, если это было необходимо. Когда существенную роль играют химические источники, а именно когда происходит пиролиз ЛГМ и испарение влаги и зажигание летучих продуктов пиролиза, возникала данная ситуация. Затем проводилось решение уравнения переноса излучения. В качестве начального приближения подставляются значения функций и процесс повторяется.

### 3.3. Результаты численных расчетов и их анализ

На основе изложенной математической модели [12] проводились численные расчеты по определению картины процесса возникновения загорания лесного покрова в результате образования огненного шара и воздействия теплового излучения на подстилающую поверхность (вариант 1) и окружающие объекты (вариант 2).

Вариант 1: получены значения радиуса зажигания лесного покрова под действием теплового излучения огненного шара, которое зависит от влагосодержания лесных горючих материалов полога леса и массы выделившегося горючего вещества. Полученные результаты представлены в Таблице 1 в виде зависимости радиуса зон зажигания от влагосодержания для различных масс выделившегося горючего вещества.

Изменение основных функций с течением времени на верхней границе полога леса в точке зажигания представлено на Рисунках 6-8. Под воздействием излучения от огненного шара происходит нагрев твердой фазы (Рисунок 6). Далее объемная доля воды уменьшается (Рисунок 7). Затем при увеличении температуры начинается процесс пиролиза (Рисунок 8), т.е. при разложении сухого органического веществ выделяются летучие горючие продукты пиролиза. Уменьшается объемная доля сухих горючих материалов (Рисунок 8) и происходит выделение летучих продуктов пиролиза (Рисунок 7). Далее происходит их воспламенение (Рисунок 7). При этом также происходит уменьшение кислорода (Рисунок 7), который тратиться на окисление.

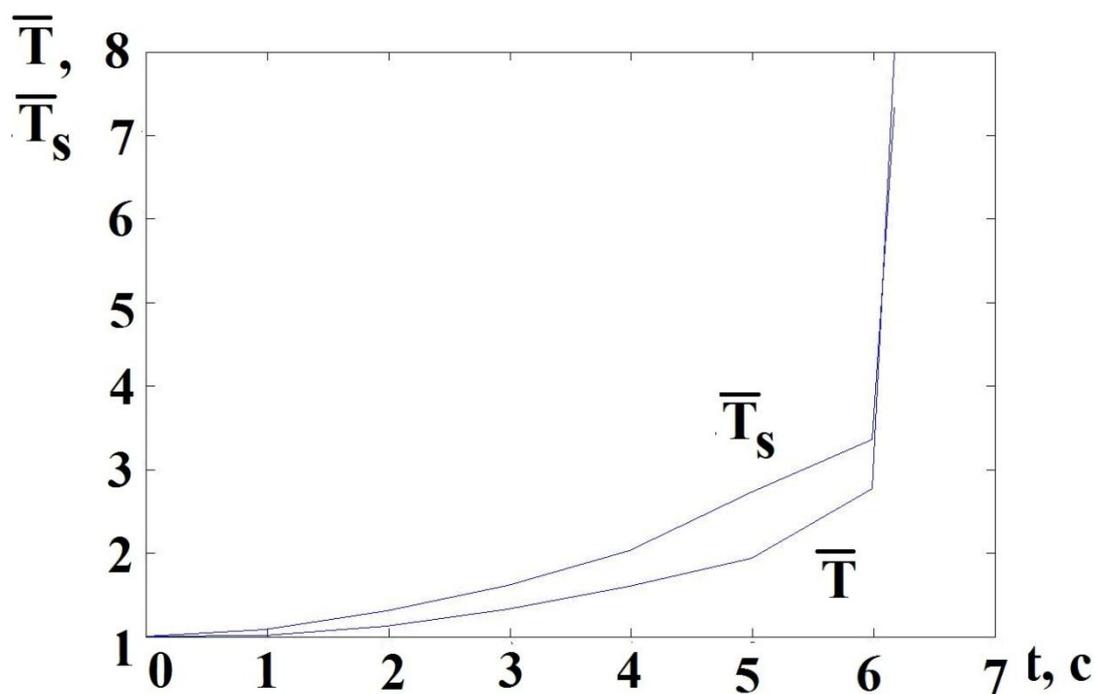


Рисунок 6 – Зависимость температуры от времени;

$$\bar{T} = T / T_e, \bar{T}_s = T_s / T_e, T_e = 300K.$$

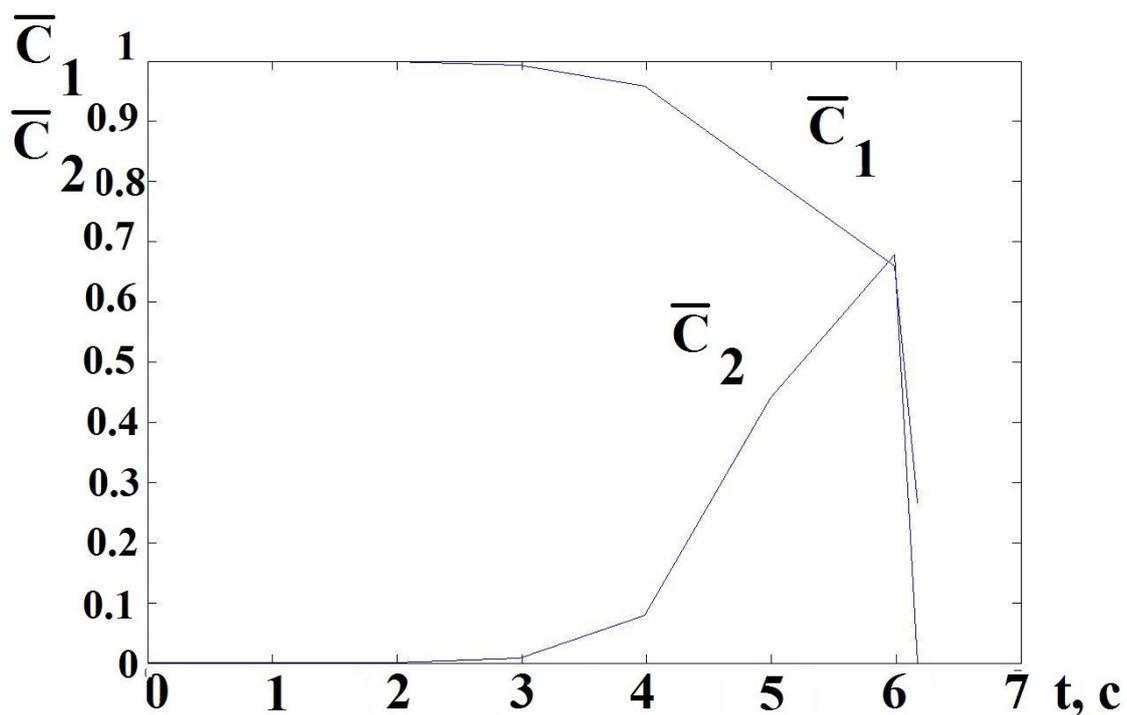


Рисунок 7 – Зависимость концентрации от времени;

$$\bar{C}_\alpha = C_\alpha / C_{1e}, C_{1e} = 0.23.$$

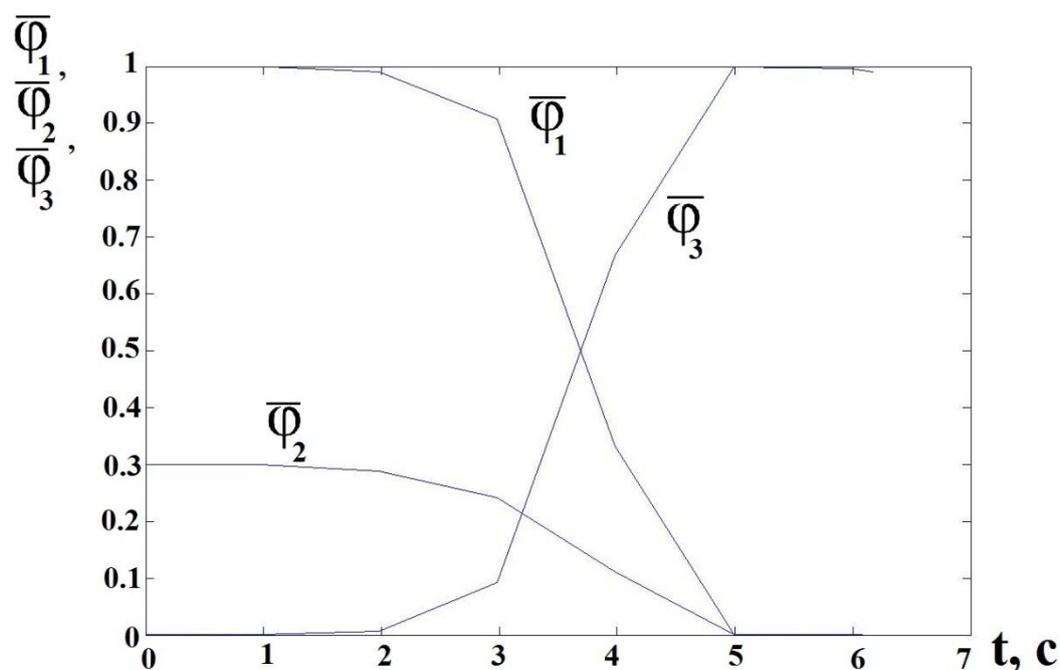


Рисунок 8 – Зависимость объемной доли от времени

$$\bar{\Phi}_1 = V_{\text{ЛГМ}}/V; \quad \bar{\Phi}_2 = V_{\text{ВЛ}}/V.$$

Таблица 1 – Размеры зон зажигания в зависимости от влагосодержания

Влагосодержание W	0.2	0.4	0.6	0.8
Масса выделившегося горючего вещества, т	Радиус зажигания лесного покрова, м			
10	16.3	10	0	0
20	24.4	21	19	14.3
40	35.4	32	28.4	26
60	45	40.4	37	34

На Рисунке 9 представлены зависимости радиусов зон зажигания от влагосодержаний для различных масс выделившегося горючего вещества.

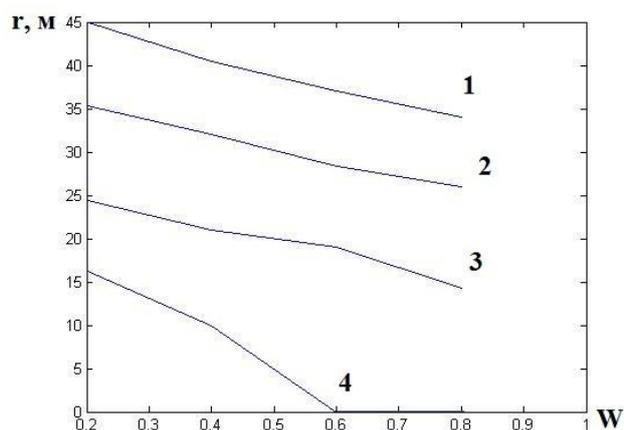


Рисунок 9 – зависимости радиусов зон зажигания от влагосодержания для различных масс выделившегося горючего вещества: 1 –  $m=60$  т, 2 –  $m=40$  т, 3 –  $m=20$  т, 4 –  $m=10$  т.

Радиус зажигания растительного покрова максимален при влагосодержании  $W=0.2$  и массе выделившегося горючего  $m=60$  т. С увеличением влагосодержания растительного покрова радиус зажигания уменьшается.

В Таблице 2 представлены результаты зависимости радиуса зон зажигания от запаса для различных масс выделившегося горючего вещества.

Таблица 2 – Размеры зон зажигания в зависимость от запаса

Запас ZAP	0.2	0.4	0.6
Масса выделившегося горючего вещества, т	Радиус зажигания лесного покрова, м		
20	18.9	17.3	16.3
40	28.4	27.9	25.8
60	37	34.4	31.4

На Рисунке 10 представлены зависимости радиусов зон зажигания от запаса для различных масс выделившегося горючего вещества.

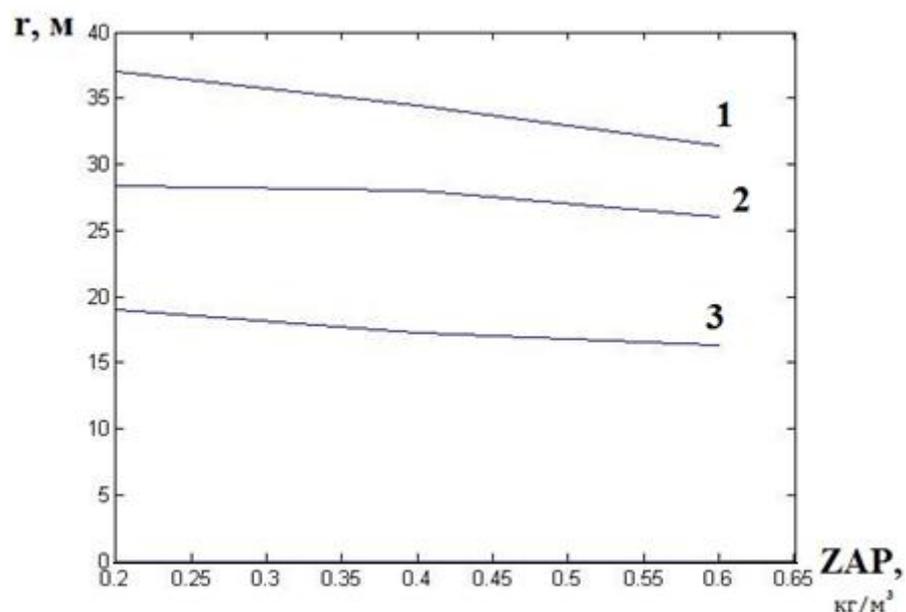


Рисунок 10 – зависимости радиусов зон зажигания от запаса для различных масс выделившегося горючего вещества: 1 –  $m=60$  т, 2 –  $m=40$  т, 3 –  $m=20$  т.

Радиус зажигания растительного покрова максимален при запасе  $ZAP=0.2$  и массе выделившегося горючего  $m=60$  т. С увеличением запаса лесного покрова радиус зон зажигания уменьшается.

На Рисунке 11 представлено распределение изотерм температуры газовой фазы при массе выделившегося горючего 30 т. Из Рисунка 11 видно, что зажигание произошло порядка 40 м. Уменьшилась объемная доля сухих горючих материалов и произошло выделение летучих продуктов пиролиза. Затем произошло их воспламенение.

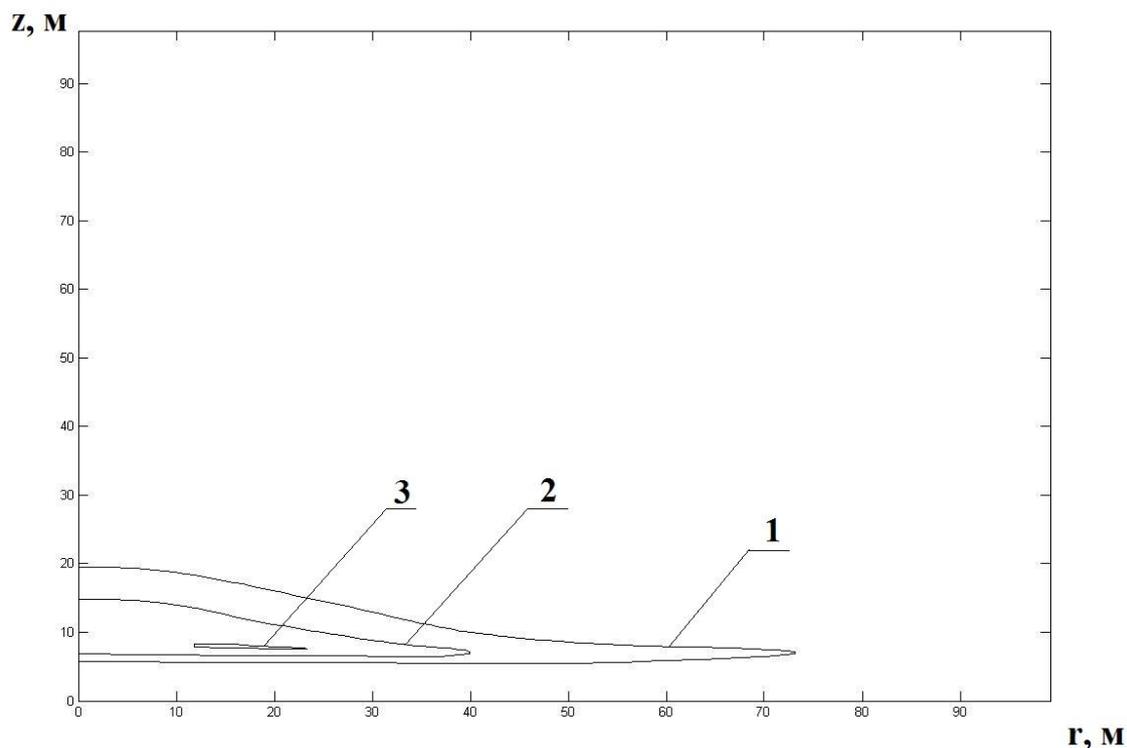


Рисунок 11 – Распределение изотерм температуры газовой фазы при массе выделившегося горючего 30 т, где

1 –  $\bar{T} = 1.5$ ; 2 –  $\bar{T} = 2.0$ ; 3 –  $\bar{T} = 2.6$ ,  $\bar{T} = T/T_e$ , где  $T_e = 300$  К

На Рисунке 12 представлено распределение изолиний летучих продуктов пиролиза  $C_2$  при массе выделившегося горючего 30 т. Из рисунка 12 видно, что в пределах радиуса 10 м произошло выгорание лесного массива. Максимальная концентрация продуктов пиролиза образовалась при радиусе порядка 40 м и в дальнейшем произошло зажигание лесного массива.

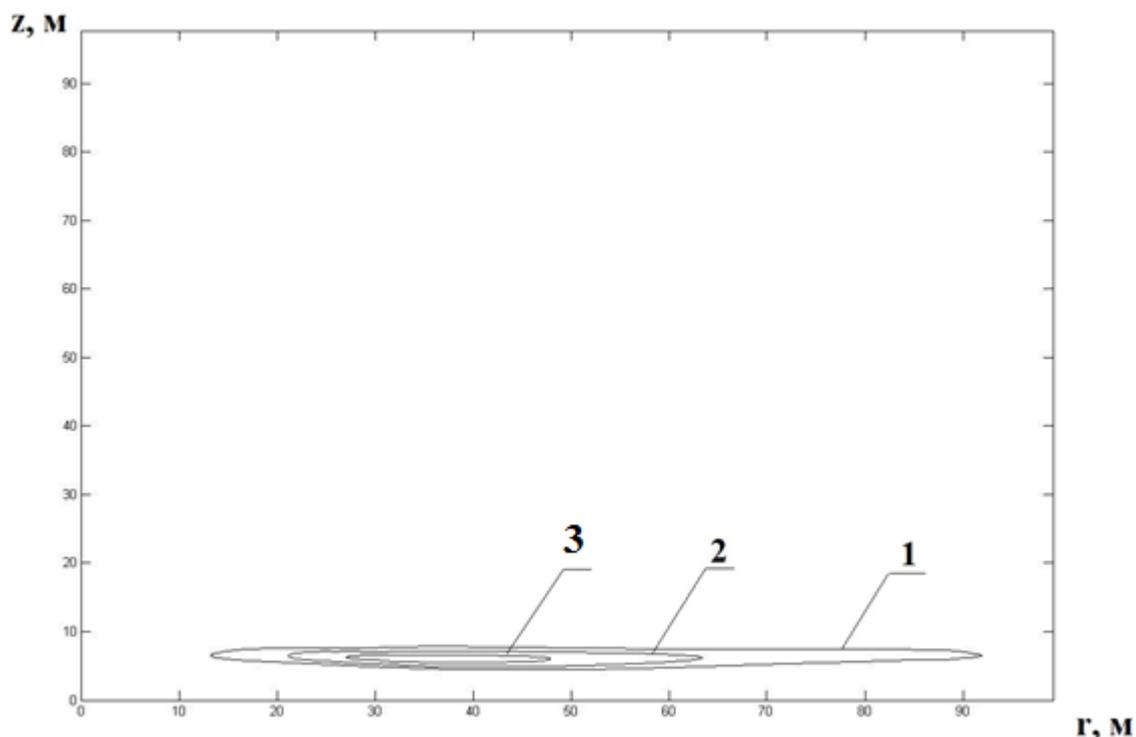


Рисунок 12 – Распределение изолиний летучих продуктов пиролиза  $c_2$  при массе выделившегося горючего 30 т, где

$$1 - \bar{c} = 0.05; 2 - \bar{c} = 0.07; 3 - \bar{c} = 0.1, \text{ где } \bar{c} = C_1/C_{1e},$$

где  $C_{1e} = 0.23$

Вариант 2: Получены значения радиуса зажигания окружающих объектов под действием теплового излучения огненного шара, которое зависит от массы выделившегося горючего вещества. Полученные результаты представлены в Таблице 3 в зависимости радиуса зон зажигания от различных масс выделившегося горючего вещества.

Таблица 3 – Радиусы зон зажигания в зависимости от массы выделившегося горючего

Масса выделившегося горючего вещества, т	Радиус зоны зажигания, м
10	20
20	30
30	35
40	40

Продолжение Таблицы 3 – Радиусы зон зажигания в зависимости от массы выделившегося горючего

50	45
60	45
70	50
80	50

На Рисунке 13 представлены результаты зависимости радиусов зон зажигания от различных масс выделившегося горючего вещества.

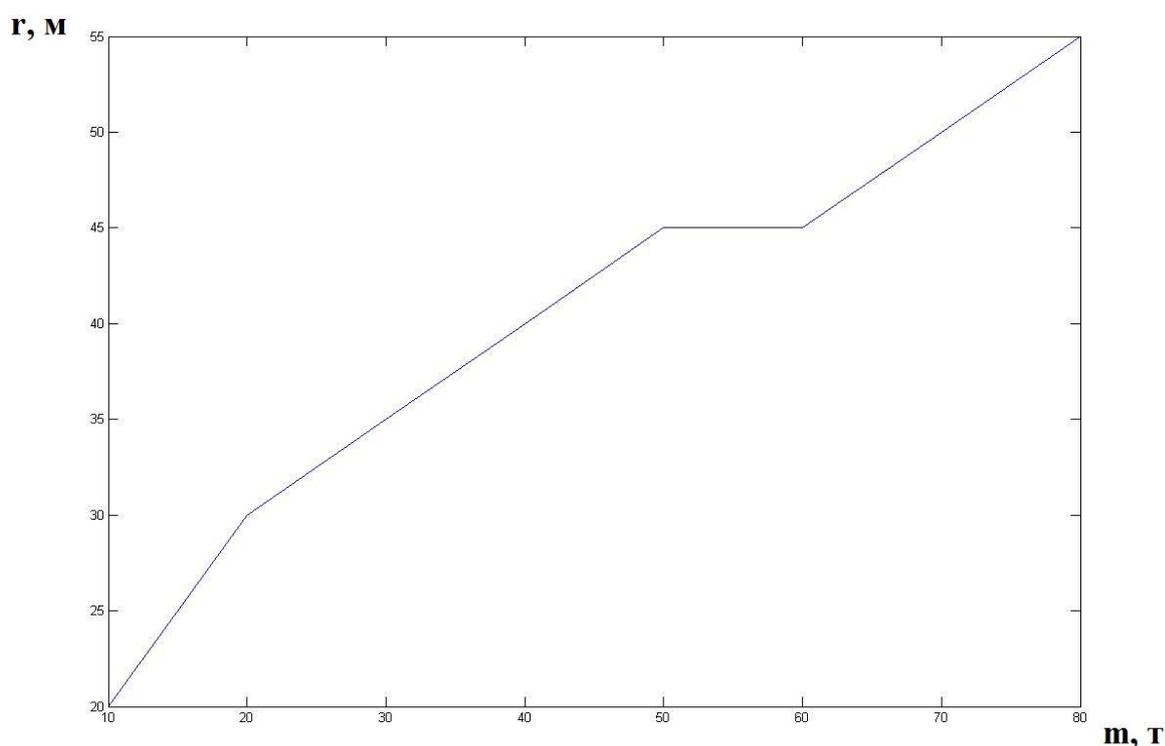


Рисунок 13 – зависимость радиусов зон зажигания от различных масс выделившегося горючего вещества

Радиус зажигания окружающих объектов максимален при массе выделившегося горючего  $m=80$  т. С увеличением массы выделившегося горючего радиус зажигания увеличивается.

## 4 Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережения»

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

#### 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Выпускная квалификационная работа по теме «Математическое моделирование термического воздействия на окружающую среду при аварийном разрыве газо- нефтепровода» выполняется в рамках научно-исследовательской работы для организаций, связанных с транспортировкой нефти и газа, непосредственно, на объектах магистральных трубопроводов. Заинтересованными лицами в полученных данных будут являться сотрудники организаций, обслуживающих данные объекты.

Суть работы заключается в определении времени и максимальные размеры зон зажигания в зависимости от количества выделившегося горючего и характеристик объектов и изучение механизма протекающих при этом физико-химических процессов. Определив максимальные размеры зон зажигания можно определить безопасное расстояние трубопровода до лесного массива и до окружающих объектов.

Сегментировать рынок услуг по работе с программой «Fire» и «MatLab» можно по следующим критериям: вид горючего вещества, которое транспортируется по магистральным трубопроводам и визуальное представление результатов математического моделирования (Таблица 1.1. ).  
Таблица 1.1 - Карта сегментирования рынка услуг по разработке программы математического моделирования

		Вид горючего вещества		
		Нефть	Газ	Нефть-газ
	Графики	1, 2	1, 2	1, 2

БТ 1 С у л ь т а 1	представле ния математиче ского моделирова	Формулы	1, 2	1, 2	1, 2
	Таблицы	1	1	1	

1 – SIMPLE

2 – SIVA

#### 4.1.2. Анализ конкурентных технических решений

Таблица 1.2 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки</b>							
1. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
2. Автоматический расчет уравнений программой	0,15	5	3	2	0,75	0,45	0,3
3. Простота эксплуатации	0,15	4	2	3	0,6	0,3	0,45
4. Качество интеллектуального ин-терфейса	0,1	4	5	2	0,4	0,5	0,2
5. Визуальное представление результатов	0,2	5	3	4	1	0,6	0,8
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность	0,1	4	3	2	0,4	0,3	0,2
3. Цена	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Итого	1	36	25	25	4,55	3,15	3,15

Итогом анализа является то, что метод, рассмотренный в дипломной работе, эффективней, чем методы конкурентов. Конкурентное преимущество в том, что в программе «Fire»:

- моделируются графики и результат представлен наглядно;
- программ все необходимые уравнения считает автоматически;
- проста в использовании;

- приемлемая цена.

## 4.2. SWOT-анализ

Таблица 1.3 - Матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского:</b></p> <p><b>С<sub>1</sub>.</b> Более низкая стоимость, по сравнению с другими технологиями.</p> <p><b>С<sub>2</sub>.</b> Использование современного оборудования и ИТ-технологий.</p> <p><b>С<sub>3</sub>.</b> Наличие опытного руководителя.</p> <p><b>С<sub>4</sub>.</b> Представление полученной информации наглядно (графики, формулы, таблицы).</p> <p><b>С<sub>5</sub>.</b> Актуальность программы</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p><b>Сл<sub>1</sub>.</b> Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров для работы с программой.</p> <p><b>Сл<sub>2</sub>.</b> Время, затрачиваемое на расчет в программе и построение графиков (30-40 минут).</p> <p><b>Сл<sub>3</sub>.</b> Отсутствие необходимого оборудования и программного обеспечения для работы с программой.</p> <p><b>Сл<sub>4</sub>.</b> Ограниченная область применения.</p> <p><b>Сл<sub>5</sub>.</b> Медленный процесс вывода на рынок новой технологии.</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p><b>В<sub>1</sub>.</b> Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p><b>В<sub>2</sub>.</b> Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p><b>В<sub>3</sub>.</b> Повышение уровня предотвращения экологического загрязнения</p> <p><b>В<sub>4</sub>.</b> Повышение уровня</p>	<p>- В результате низкой стоимости продукт могут позволить себе многие организации</p> <p>- В результате использования современных технологий повысится скорость локализации экологической очистки</p> <p>- При грамотном подходе руководителей улучшится</p>	

<p>оперативного реагирования спец. служб</p> <p><b>В5.</b> Повышение уровня локализации аварий</p>	<p>реагирование служб, а следовательно и сам исход аварии</p> <p>- При вышеперечисленных возможностях мы добьемся наглядного исхода аварии и более быстрой её локализации</p> <p>- При повышении актуальности программы, конкуренты будут вынуждены повысить стоимость своих разработок во избежание разорения</p>	
<p><b>Угрозы:</b></p> <p><b>У1.</b> Неумение персонала пользоваться программой.</p> <p><b>У2.</b> Появление новых конкурентов.</p> <p><b>У3.</b> Появление новых технологий.</p> <p><b>У4.</b> Отсутствие спроса на программу.</p> <p><b>У5.</b> Введение дополнительных государственных требований и сертификации программы.</p>		<p>- Проведение обучения сотрудников организаций по работе с продуктом</p> <p>- Сократить время подсчета программой</p> <p>- Сделать программу воспроизводимой на всех доступных устройствах</p> <p>- Расширить область применения программы</p> <p>- Засертифицировать программу</p>

Описание сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта, его возможностей и угроз происходит на основе результатов анализа, проведенного в предыдущих и последующих разделах бакалаврской работы.

## **Второй этап**

Выявление соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта.

Таблица 1.4 - Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта				
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
Возможности проекта	B <sub>1</sub>	+	-	0	-	+
	B <sub>2</sub>	+	-	-	+	0
	B <sub>3</sub>	-	+	+	+	+
	B <sub>4</sub>	-	+	+	+	+
	B <sub>5</sub>	-	+	+	+	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и возможности: B1C1C5, B2C2C3C4, B3B4B5C2C3C4C5.

Таблица 1.5 - Интерактивная матрица проекта

		Слабые стороны проекта				
		Сл <sub>1</sub>	Сл <sub>2</sub>	Сл <sub>3</sub>	Сл <sub>4</sub>	Сл <sub>5</sub>
Возможности проекта	B <sub>1</sub>	+	+	+	+	0
	B <sub>2</sub>	-	-	-	-	0
	B <sub>3</sub>	0	-	-	0	-
	B <sub>4</sub>	0	-	-	0	-
	B <sub>5</sub>	0	-	-	0	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и возможности: B1C1C2C4.

Таблица 1.6 - Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта				
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
Угрозы проекта	У <sub>1</sub>	+	+	+	0	-
	У <sub>2</sub>	-	+	+	-	0
	У <sub>3</sub>	0	+	+	0	-
	У <sub>4</sub>	-	+	+	-	0
	У <sub>5</sub>	0	+	-	0	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и угроз: У1C1C3, У2C2C3, У3У4C2C3, У5C2C5.

Таблица 1.7 - Интерактивная матрица проекта

		Слабые стороны проекта					
		Сл <sub>1</sub>	Сл <sub>2</sub>	Сл <sub>3</sub>	Сл <sub>4</sub>	Сл <sub>5</sub>	
		У <sub>1</sub>	+	-	+	-	0

Угрозы проекта	У <sub>2</sub>	+	+	0	+	+
	У <sub>3</sub>	+	+	+	+	0
	У <sub>4</sub>	+	+	+	+	0
	У <sub>5</sub>	-	-	-	-	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабые стороны и угрозы: У1С1С3, У2С1С2С4С5, У3У4С1С2С3С4, У5С5.

#### 4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований.

В рамках данного раздела проведены альтернативные научные исследования в разделе 3. «Математическое моделирование возникновения пожаров под действием излучения» ВКР.

Таблица 1.8 - Морфологическая матрица

	1	2	3
А. Визуализация результатов	График	Формулы	Таблицы
Б. Описание процесса	Формулы	Таблицы	Графики
В. Описание поражающих факторов, количество	2	3	4
Г. Длительность расчета программой, мин	20	30	40
Д. Интерфейс	Русский	Английский	Немецкий
Е. Алгоритмы расчета	SIMPLE	SIVA	
Ж. Возможность применение в отраслях	Нефть	Газ	Нефть-газ

Возможные варианты решения технической задачи:

1) А1Б2В2Г3Д1Е1Ж2 – в данном решении происходит визуализация результатов посредством графиков, значения которых приведены в таблицах в виде трех поражающих факторов, длительность расчетов 40 минут, язык русский, алгоритм расчета используется SIMPLE в данном случае применение в газовой сфере.

2) АЗБЗВ1Г1Д1Е1Ж1 – в данном решении происходит визуализация результатов посредством таблиц, процесс описывается графиками, задается два поражающих фактора, длительность расчетов в данном случае 20 минут, язык интерфейса русский, алгоритм расчета SIMPLE, в данном случае применения в нефтяной сфере.

### 4.3 Планирование научно-исследовательских работ

#### 4.3.1 Структура работы в рамках научного исследования

Таблица 1.9 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Выдача задания для проекта	
Выбор направления исследования	3	Поиск и изучение материала по теме	Студент
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель, студент
Теоретические исследования	5	Изучение литературы по теме	Студент
	6	Подбор нормативных документов	
	7	Изучение программы «Fire» и «MatLab»	
Практические исследования	8	Моделирование зон зажигания растительного покрова под действием теплового излучения огненного шара	Студент
	9	Изучение результатов	
	10	Проведение расчетов по теме	
Оценка полученных результатов	11	Анализ результатов	Студент
	12	Вывод по цели	Студент

#### 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работы

$$t_{ожi} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

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

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

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}$$

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

$t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

### 3.3. Разработка графика проведения научного исследования.

**Диаграмма Ганта** – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \times k_{кал} ,$$

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

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

$k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

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

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

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

$T_{пр}$  – количество праздничных дней в году.

Таблица 1.10 - Временные показатели проведения научного исследования.

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{\min}$ , чел-дни	$t_{\max}$ , чел-дни	$t_{ожi}$ , чел-дни			

	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
Составление и утверждение темы проекта	3	3	7	7	4,6	4,6	Руководитель		4,6	4,6	6,9	6,9
Анализ актуальности темы	2	2	5	5	3,2	3,2	Студент		3,2	3,2	4,8	4,8
Поиск и изучение материала по теме	15	15	30	30	21	21	Студент		21	21	31,5	31,5
Выбор направления исследований	2	2	5	5	3,2	3,2	Руководитель Студент		1,6	1,6	2,4	2,4
Изучение литературы по теме	20	20	30	30	36	36	Студент		36	36	54	54
Подбор нормативных документов	15	15	25	25	19	19	Студент		19	19	28,5	28,5
Изучение программ «Fire» и «MatLab»	10	10	20	20	14	14	Студент		14	14	21	21
Моделирование зон зажигания растительного покрова под действием теплового излучения огненного шара	23	30	30	35	28,8	32	Студент		28,8	32	43,2	48
Изучение результатов	10	12	15	18	12	14,4	Студент		12	14,4	18	21,6
Проведение расчетов по теме	17	24	25	30	20,2	26,4	Студент		20,2	26,4	30,3	39,6
Анализ результатов	2	5	5	7	3,2	5,8	Студент		3,2	5,8	4,8	8,7
Вывод по цели	1	2	3	4	1,8	2,8	Студент		1,8	2,8	2,7	4,2

Исп. 1 – SIMPLE

Исп. 2 – SIVA

На основании таблицы 1.10 строим календарный план-график 1.11.

Календарный план-график приведен в Приложении 2.

#### 4.4. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

##### 4.4.1. Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$Ц_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 1.12 - Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество		Цена за ед., руб.		Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.	
		Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
Бумага	лист	110	135	2,5	2,5	316,25	388,13
Краска для принтерных картриджей	шт.	1	1	1250	1250	1437,5	1437,5
Интернет	М/бит	100	110	1	1	115	126,5
Книги с дополнительной литературой	шт.	1	1	450	480	517,5	552
Ручки	шт.	1	1	10	10	11,5	11,5
Тетради	шт.	2	3	10	10	23	34,5
<b>Итого</b>		215	251	1723,5	1753,5	2420,75	2882,7

#### 4.4.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Таблица 1.13 - Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования		Цена единицы оборудования, тыс. руб.		Общая стоимость оборудования, тыс.руб.	
		Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2

1.	Программа «Fire»	1	1	5000	5000	5750	5750
2.	Программа «MatLab»	1	1	2500	2500	2875	2875
<b>Итого</b>						8625	8625

#### 4.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в Таблице 1.14.

Таблица 1.14 - Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнитель и по категориям	Трудо-емкость, чел.-дн.		Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.		Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.	
			Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
1.	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	4,6		3,6		16,56	
2.	Анализ актуальности темы	Студент	3,2		0,8		2,56	
3.	Поиск и изучение материала по теме	Студент	21		0,8		16,8	
4.	Выбор направления исследований	Руководитель Студент	1,6		4,4		5,76	1,28
5.	Изучение литературы	Студент	36		0,8		28,8	
6.	Подбор нормативных документов	Студент	19		0,8		15,2	
7.	Изучение программ «Fire» и «MatLab»	Студент	14		0,8		11,2	

8.	<b>Моделирование зон зажигания растительного покрова под действием теплового излучения огненного шара</b>	Студент	28,8	26,4	0,8	23,04	21,12
9.	<b>Изучение результатов</b>	Студент	12	14,4	0,8	9,6	11,52
10.	<b>Проведение расчетов по теме</b>	Студент	20,2	26,4	0,8	16,16	21,12
11.	<b>Анализ результатов</b>	Студент	3,2	5,8	0,8	2,56	4,64
12.	<b>Вывод по цели</b>	Студент	1,8	2,8	0,8	1,44	2,24
<b>Итого:</b>						<b>148,68</b>	<b>153,04</b>

Проведем расчет заработной платы относительно того времени, в течение которого работал руководитель и студент. Принимая во внимание, что за час работы руководитель получает 450 рублей, а студент 100 рублей (рабочий день 8 часов).

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

Максимальная основная заработная плата руководителя равна примерно 26784 рублей, а студента 126360 рублей.

#### 4.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таким образом, заработная плата руководителя равна 30802 рублей, студента – 145314 рублей.

#### 4.4.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Таблица 1.15 - Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб		Дополнительная заработная плата, руб	
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
Руководитель проекта	26784	30802	4464	4018
Студент-дипломник	126360	145314	15163	48954
Коэффициент отчислений	0,271			
<b>Итого</b>				
Исполнение 1	46821 руб.			
Исполнение 2	62083 руб.			

#### 4.4.6. Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{накл} = (\sum статеи) \cdot k_{нр},$$

где  $k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Таким образом, наибольшие накладные расходы при первом исполнении равны:  $Z_{накл} = 2420,75 \cdot 0,16 = 387,32$  руб.

при втором исполнении:  $Z_{накл} = 2882,7 \cdot 0,16 = 461,23$  руб.

#### 4.4.7. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Таблица 1.16 - Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.		Примечание
	Исп.1	Исп.2	
1. Материальные затраты НТИ	2420,75	2882,7	Пункт 3.4.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	8625	8625	Пункт 3.4.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	148680	153040	Пункт 3.4.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	10847	12586	Пункт 3.4.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	46821	62083	Пункт 3.4.5
6. Накладные расходы	34783	38274,8	16 % от суммы ст. 1-5
7. Бюджет затрат НТИ	252176,75	277491,5	Сумма ст. 1- 6

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}},$$

где  $I_{финр}^{исп.i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

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

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

$$I_{финр}^{исп1} = \frac{252176,75}{277491,5} = 0,9; \quad I_{финр}^{исп2} = \frac{277491,5}{277491,5} = 1$$

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

$$I_{pi} = \sum a^i \cdot b^i,$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a^i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a$ ,  $b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности я проводим в форме таблицы (табл. 21).

Таблица 1.17 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	3
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	3
3. Ремонтпригодность	0,15	4	3
4. Энергосбережение	0,20	4	4
5. Надежность	0,15	4	4
6. Пусковой период	0,1	5	3
7. Материалоемкость	0,15	4	4
ИТОГО	1	4,2	3,5

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 = 4,2$$

$$I_{p-исп2} = 3 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 = 3,5$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{испi}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{испi} = \frac{I_{p-испi}}{I_{финр}}$$

$$I_{ucn1} = \frac{4,2}{0,9} = 4,7$$

$$I_{ucn2} = \frac{3,5}{1} = 3,5$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.22) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{ucn.i}}{I_{ucn.max}}$$

Таблица 1.18 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,9	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,2	3,5
3	Интегральный показатель эффективности	4,7	3,5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,7

Сравнив значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что реализация технологии в первом исполнении является более эффективным вариантом решения задачи, поставленной в данной работе с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## 5. Социальная ответственность

Разработана математическая модель воздействия светового излучения от огненного шара, появившегося в результате аварийного разрыва трубопровода (или емкости с горючим) на растительность или другие окружающие объекты (здания, сооружения и т.д.). 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 трубопровода до лесного массива и до окружающих объектов.

### 5.1. Описание рабочего места

Математическое моделирование термического воздействия на окружающую среду при аварийном разрыве газо- нефтепроводов – это работа связана, в основном, с работой за персональным компьютером (ПК). Математическое моделирование с помощью программного обеспечения PHOENICS осуществлялась в лаборатории в кабинете №403.

Схема кабинета №403 представлена на Рисунке 14.

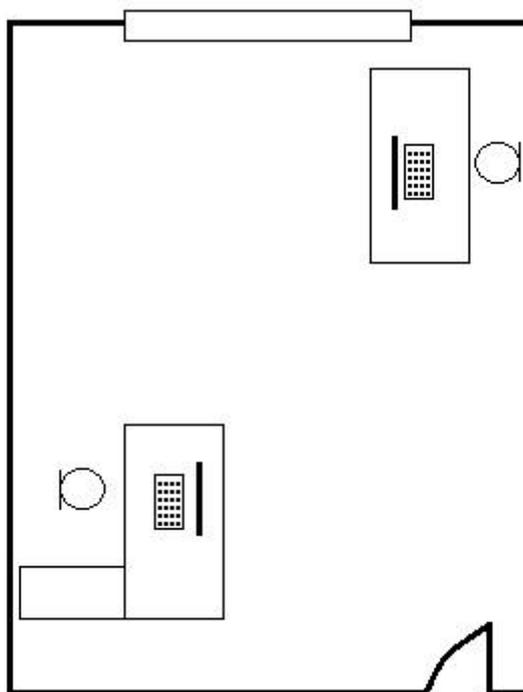


Рисунок 14 – Схема кабинета № 403

## 5.2. Профессиональная социальная безопасность

### 5.2.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Опасные и вредные факторы, которые постоянно или периодически действуют на работающего на ПЭВМ представлены в Таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Опасные и вредные факторы при работе на ПЭВМ

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа за ПЭВМ: 1. рабочее место; 2. кондиционеры и различные печатающие устройства; 3. искусственное освещение; 4. выполнение должностных обязанностей.	1. показатели микроклимата; 2. уровней шума; 3. освещенность рабочей зоны; 4. напряженность трудового процесса.	2. электрический ток.	Параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4-548-96 [14]. Параметры шума устанавливаются СанПиН 2.2.4/2.1.8.562-96 [15]. Параметры освещенности рабочей зоны устанавливаются СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [16].

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 холодный период года от 22 до 24 °С, теплый период года — от 23 до 25 °С. Относительная влажность воздуха на постоянных рабочих местах должна составлять 40-60%, скорость движения воздуха должна быть 0,1 м/с. Для

повышения влажности воздуха в помещениях следует применять увлажнители воздуха. [14]

2. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Следует ограничивать неравномерность распределения яркости в поле зрения пользователя ПЭВМ при этом соотношение яркости между рабочими поверхностями не должно превышать 3:1-5:1, а между рабочими поверхностями и поверхностями стен и оборудования — 10:1.

Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.

Для исключения бликов отражений в экране светильников общего освещения рабочий стол с ПК следует размещать между рядами светильников. При этом светильники должны быть расположены параллельно горизонтальной линии взгляда работающего. Для уменьшения бликов рекомендуется использовать приэкранный защитный фильтр для видеомониторов.

При рядном размещении рабочих столов не допускается расположение экранов дисплеев навстречу друг другу из-за их взаимного отражения, в противном случае между столами следует устанавливать перегородки.

3. В соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 кабинет №403 относится к помещению без повышенной опасности поражения людей электрическим током.

На рабочем месте пользователя размещены 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, в отсутствии видимых повреждений рабочей мебели и аппаратуры.

Токи статического электричества, наведенные в процессе работы ПК на корпусах клавиатур, монитора и системного, могут приводить к разрядам при прикосновении к этим элементам. Эти разряды неопасны для человека, но могут привести к нарушению работы компьютера. Для снижения величин токов статического электричества используются нейтрализаторы, общее и местное увлажнение воздуха, использование покрытия полов с антистатической пропиткой.

4. На человека в зале с ПК воздействует шум. Источниками шума являются кондиционеры и различные печатающие устройства. 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. Помещения для выполнения основной работы с ПК не должны быть расположены рядом (смежно) с производственными помещениями с повышенным уровнем шума (мастерские, производственные цеха и т. п.).

При выполнении основной работы на мониторах и ПЭВМ (диспетчерские, операторские, залы вычислительной техники и т. д.), 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. [15]

5. Для обеспечения оптимальной работоспособности и сохранения здоровья профессиональных пользователей на протяжении рабочей смены должны устанавливаться регламентированные перерывы.

Для предупреждения преждевременной утомляемости у работающих с ВДТ и ПЭВМ, зрительного дискомфорта и других неблагоприятных

субъективных ощущений, несмотря на соблюдение санитарно-гигиенических, эргономических требований, режимов труда и отдыха следует применять индивидуальный подход в ограничении времени работ с ВДТ и ПЭВМ, коррекцию длительности перерывов для отдыха или проводить смену деятельности на другую, не связанную с использованием ВДТ и ПЭВМ.

В случаях, когда характер работы требует постоянного взаимодействия с ВДТ (набор текстов или ввод данных и т. п.) и связан с напряжением внимания и сосредоточенности, при исключении возможности периодического переключения на другие виды трудовой деятельности, не связанные с ПЭВМ, рекомендуется организация перерывов на 10-15 минут через каждые 45-60 минут работы. Во время регламентированных перерывов с целью снижения нервно-эмоционального напряжения, утомления зрительного анализатора, устранения влияния гиподинамии и гипокинезии, предотвращения развития позотонического утомления целесообразно выполнять комплексы упражнений. Работающим на ВДТ и ПЭВМ с высоким уровнем напряженности во время регламентированных перерывов и в конце рабочего дня показана психологическая разгрузка в специально оборудованных помещениях (комната психологической разгрузки).

В соответствии с Перечнем вредных и (или) опасных производственных факторов, при выполнении которых проводятся предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования), утвержденным приказом Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 16 августа 2004 г. и СанПиН 2.2.2/2.4. 1340-03 “Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы”, обязательные предварительные при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры должны проходить лица, работающие с ПЭВМ более 50% рабочего времени (профессионально связанные с эксплуатацией ПЭВМ), которые должны проводиться за счет работодателя. К работе с ПЭВМ (ПК) допускаются лица,

не имеющие медицинских противопоказаний.

В соответствии с требованиями приказа Минздравмедпрома РФ “О порядке проведения предварительных и периодических медицинских осмотров работников и медицинских регламентах допуска к профессии” от 14 марта 1996 г. № 90 периодические медицинские осмотры пользователей ПЭВМ должны проводиться ежегодно.

Женщины со времени установления беременности должны переводиться на работы, не связанные с использованием ПЭВМ, или для них должно ограничиваться время работы с ПЭВМ (не более 3 часов за рабочую смену) при условии соблюдения гигиенических требований, установленных СанПиН 2.2.2/2.4-1340-03 “Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы”.

### **5.2.2. Расчет искусственного освещения**

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность.

В кабинете №403 лаборатории общее равномерное освещение. Используются люминесцентные лампы. Освещенность рабочего места должна быть 300-500 лк в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03.

Для искусственного освещения кабинета №403 лаборатории с персональными компьютерами используются ЛПОЗ4.

Размещение светильников в помещении определяется следующими размерами:

$H = 3$  м.– высота помещения;

$h_c = 0,2$  м.– расстояние светильников от перекрытия (свес);

$h_n = H - h_c = 3 - 0,2 = 2,8$  м.– высота светильника над полом, высота подвеса;

$h_p = 0,75$  м.– высота рабочей поверхности над полом;

$h = h_n - h_p = 2,8 - 0,75 = 2,05$  м. – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью.

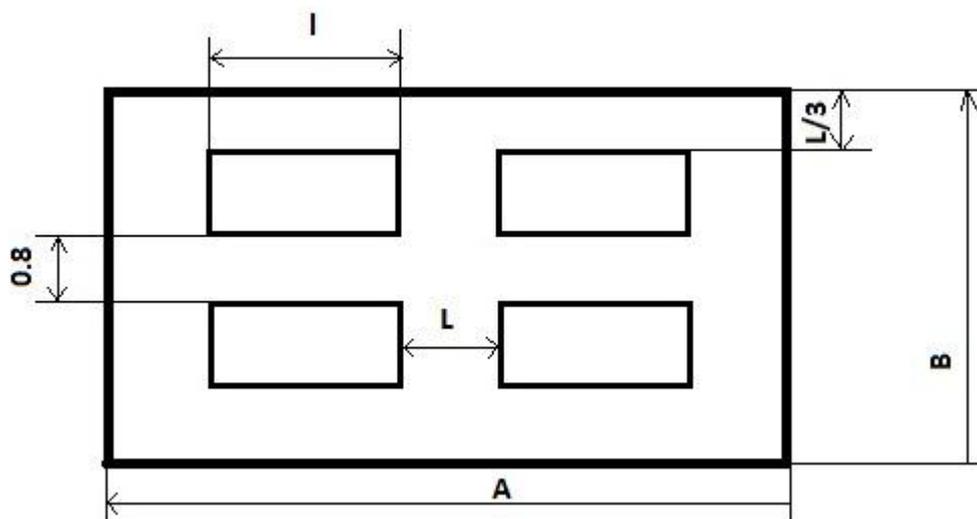


Рисунок 15 - Размещение светильников в помещении

$L = 2,5$  м – расстояние между соседними;  $l = 0,6$  м – длина светильника;  $A = 8,7$  м – длина помещения;  $B = 3,2$  м – ширина помещения.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda = L/h$ , уменьшение которой удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. В Таблице 4 приведены значения  $\lambda$  для разных светильников. [14]

$$\lambda = L/h = 2,5/2,05 = 1,2 \text{ значение которой соответствует нормам [14].}$$

Расчет общего равномерного освещения.

$$\Phi = E_n \times S \times K_z \times Z \times 100 / (n \cdot \eta),$$

где  $E_n = 300$  лк – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95, лк;

$S = 27,84$  м<sup>2</sup> – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;

$K_z = 1,5$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т.е. отражающих поверхностей), (наличие в атмосфере цеха дыма), пыли [15];

$K_z = 1,5$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника

(источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т.е. отражающих поверхностей), (наличие в атмосфере цеха дыма), пыли [15];

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения, отношение  $E_{ср.}/E_{min}$ .

Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;

$n = 4$  – число светильников;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока, %.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения  $i$ , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью  $h$  и коэффициентов отражения стен  $\rho_c$  и потолка  $\rho_p$  Таблица 8.

[1]

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = S / 3,05(A+B)$$

$$i = 27,84 / 3,05(8,7+3,2) = 0,8$$

Коэффициенты отражения оцениваются субъективно [2]:

$$\rho_c = 50\%; \rho_p = 70\%.$$

Значения коэффициента использования светового потока  $\eta$  светильников с люминесцентными лампами для наиболее часто встречающихся сочетаний коэффициентов отражения и индексов помещения приведены в [2].

$$\eta = 52\%.$$

$$\Phi = 300 \times 27,84 \times 1,5 \times 1,1 \times 100 / (4 \cdot 52) = 6625,4 \text{ лм.}$$

Рассчитав световой поток  $\Phi$ , зная тип лампы, по [15] ближайшая стандартная лампа мощностью 125 Вт и световым потоком 6500 лм.

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{л.станд.} - \Phi_{л.расч.}}{\Phi_{л.станд.}} \cdot 100\% \leq +20\%$$

Получаем

$$-10\% \leq \frac{6500 - 6625,4}{6500} \cdot 100\% \leq +20\%$$

$$-10\% \leq -1,9 \leq +20\%.$$

Проведя анализ вредных и опасных производственных факторов на рабочем месте в лаборатории в кабинете №403, можно сделать вывод о том, что в данном помещении соблюдаются все требования нормативно-правовых документов, что является подтверждением безопасности данного места работы. Нарушений пожарной безопасности и электробезопасности на рабочем месте не выявлено, угрозы для жизни и здоровья людей не наблюдается.

### **5.3. Экологическая безопасность**

В компьютерах, как и в другом электронном оборудовании, содержатся компоненты, которые в природных условия превращаются в токсичные вещества, опасные не только для человека. Это органические составляющие – такие, как пластик различных видов, материалы на основе поливинилхлорида, фенолформальдегида, как и почти полный набор металлов, среди которых свинец, сурьма, ртуть, кадмий, мышьяк.

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

Утилизация ПЭВМ проходит в несколько этапов:

Первый этап всегда производится вручную. Это – удаление всех опасных компонентов. В современных настольных ПК и принтерах таких компонентов практически нет. Но переработке подвергаются, как правило, компьютеры и техника, выпущенные в конце 90-х - самом начале 2000-х годов, когда плоских жидкокристаллических мониторов просто не существовало. А в кинескопных мониторах содержится немало соединений

свинца. Другая категория продукции, содержащая опасные элементы, – ноутбуки. В аккумуляторах и экранах устаревших моделей имеется определенное количество ртути, которая также очень опасна для организма. Важно отметить, что в новых моделях ноутбуков от этих вредоносных компонентов избавились.

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. Во многом технологии переработки позаимствованы из горного дела – примерно таким же способом извлекают ценные металлы из породы.

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. Сама эта жидкость не ядовита, однако, рабочие на заводе используют защиту органов дыхания – чтобы не вдыхать пыль.

Одним словом, только специализированные компании могут на качественном уровне соблюсти все выше обозначенные условия.

## **5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **5.4.1. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Наиболее распространенными источниками возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера являются пожары.

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. [16]

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. [16]

Пожарная безопасность обеспечивается системой пожарной защиты и системой предотвращения пожара. Во всех служебных зданиях обязательно должен быть «План эвакуации людей при пожаре», регламентирующий действия персонала в случае возникновения пожара и указывающий места расположения пожарной техники.



Рисунок 16 – План эвакуации из кабинета №403 лаборатории

Пожары в офисных помещениях с ПК представляют особую опасность, так как сопряжены с большими материальными потерями. Характерная особенность кабинета с ПК — небольшие площади помещений. Как известно, пожар может возникнуть при взаимодействии источника зажигания, окислителя и горючих веществ. В зданиях с компьютерами присутствуют все три основных фактора, необходимых для возникновения пожара.

Горючими компонентами в компьютерном классе являются: строительные материалы для эстетической и акустической отделки зданий, изоляция кабелей, двери, перегородки, полы, перфоленты и перфокарты и др.

Источниками зажигания в компьютерном классе могут быть приборы, применяемые для технического обслуживания, электрические схемы от ЭВМ, устройства кондиционирования воздуха и электропитания, где в результате разных нарушений создаются перегретые элементы, дуги и электрические искры, которые могут вызвать загорания горючих материалов.

В современных ПК достаточно высокая плотность размещения элементов электронных схем. Близко друг к другу располагаются соединительные кабели и провода. При протекании по ним электрического тока выделяется достаточное количество теплоты. При этом возможно оплавление изоляции. Для отвода избыточной теплоты от ПК служат системы кондиционирования воздуха и вентиляции. Эти системы представляют собой дополнительную пожарную опасность при постоянном действии.

Для большинства зданий с компьютерным классом установлена категория пожарной опасности В (трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна)), в соответствии с НПБ 105-2003.

В помещении должны находиться углекислотный огнетушитель для тушения пожара и аптечка первой медицинской помощи.

Одна из наиболее важных задач пожарной защиты — защита строительных зданий от разрушений и обеспечение их достаточной прочности в условиях воздействия высоких температур при пожаре. Учитывая категорию его пожарной опасности, а также высокую стоимость электронного оборудования компьютерного класса, здания для компьютерных классов и части здания другого назначения, в которых предусмотрено размещение ПК, должны быть первой и второй степени огнестойкости. Для изготовления строительных конструкций используются, чаще всего, металл, кирпич, стекло, железобетон и другие негорючие

материалы. Применение дерева должно быть ограничено, а в случае использования необходимо пропитывать его огнезащитными составами [16].

### **5.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.**

Выдержка из СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03:

#### **III. Требования к помещениям для работы с ПЭВМ**

3.1. Помещения для эксплуатации ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Эксплуатация ПЭВМ в помещениях без естественного освещения допускается только при соответствующем обосновании и наличии положительного санитарно-эпидемиологического заключения, выданного в установленном порядке.

3.2. Естественное и искусственное освещение должно соответствовать требованиям действующей нормативной документации. Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, преимущественно должны быть ориентированы на север и северо-восток. Оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков и др.

3.3. Не допускается размещение мест пользователей ПЭВМ во всех образовательных и культурно-развлекательных учреждениях для детей и подростков в цокольных и подвальных помещениях.

3.4. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ с ВДТ на базе электроннолучевой трубки (ЭЛТ) должна составлять не менее 6 м<sup>2</sup>, в помещениях культурно-развлекательных учреждений и с ВДТ на базе плоских дискретных экранов (жидкокристаллические, плазменные) - 4,5 м<sup>2</sup>. При использовании ПЭВМ с ВДТ на базе ЭЛТ (без вспомогательных устройств - принтер, сканер и др.), отвечающих требованиям международных стандартов безопасности компьютеров, с продолжительностью работы менее 4-х часов в день допускается минимальная площадь 4,5 м<sup>2</sup> на одно рабочее место пользователя (взрослого и учащегося высшего профессионального образования).

3.5. Для внутренней отделки интерьера помещений, где расположены

ПЭВМ, должны использоваться диффузно-отражающие материалы с коэффициентом отражения для потолка - 0,7 - 0,8; для стен - 0,5 - 0,6; для пола - 0,3 - 0,5.

3.6. Полимерные материалы используются для внутренней отделки интерьера помещений с ПЭВМ при наличии санитарно-эпидемиологического заключения.

3.7. Помещения, где размещаются рабочие места с ПЭВМ, должны быть оборудованы защитным заземлением (занулением) в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации.

3.8. Не следует размещать рабочие места с ПЭВМ вблизи силовых кабелей и вводов, высоковольтных трансформаторов, технологического оборудования, создающего помехи в работе ПЭВМ.

## **Заключение**

В данной работе:

1. Разработана постановка задачи о зажигании полога леса и окружающих объектов от светового излучения.
2. Выполнено численное моделирование процесса зажигания с помощью программы «Fire». В результате численных расчетов получены распределения температур и концентраций компонентов газовой фазы.
3. Определены максимальные размеры зон зажигания лесного покрова и окружающих объектов при разрыве трубопровода. Можно сделать вывод, что с увеличением влагосодержания и запаса лесного покрова радиус зажигания уменьшается.
4. Представлены полученные результаты в виде графиков и проведен их анализ.

## Список используемых источников

1. «Металлические конструкции». В 3-х томах. Том 3. «Специальные конструкции и сооружения»: Учеб. для строит. вузов. Под редакцией д. т. н. профессора В. В. Горева. Издание второе, исправленное. М.: Высшая школа, 2002. — 544 с.: ил. ISBN 5-06-003787-8 (т. 3); ISBN 5-06-003697-9. Глава 5 Трубопроводы. § 5.1 Общие сведения и классификация трубопроводов. Стр. 72-73.
2. «Монтаж трубопроводов. Справочник рабочего». Глава 1 Общие сведения о трубопроводах. § 1 Назначение и классификация. — с. 5-10. А. А. Персион, К. А. Гарус. — К.: Будівельник, 1987. — 208 с. Тираж 10 000 экз.
3. Кудинов В. И. "Основы нефтегазопромыслового дела", изд. «ИКИ», 2005, 720 стр
4. Гидродинамика и горение газовых и двухфазных выбросов в открытой атмосфере: Диссертация / Якуш С.Е. - Москва, 2000. – 337с.
5. И.Г. Гусарова «Математическое моделирование и анализ аварийных ситуаций при разрыве участка трубопровода»
6. Прогнозирование опасности поражения человека тепловым излучением огненного шара при пожарах на химических и нефтехимических предприятиях: Автореферат / Хайруллин И.Р.– 2008. – 20с.
7. Статья А.Е. Зубарева, В.А. Перминов «Влияние скорости ветра на размер противопожарных разрывов». Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». Том 2.
8. Перминов, Валерий Афанасьевич. Математическое моделирование зажигания лесных массивов в результате аварийных ситуаций на трубопроводах; под ред. В. М. Гришагин [и др.]. — Томск: Изд-во ТПУ, 2014. — [С. 292-295].
9. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии: Вычислительные технологии Том № 2. / Гришин А.М.,

Перминов В.А. — ТГУ, 1997. – 11с.

10. Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости: Патанкар С.В. - М.: Энергоатомиздат, 1984.-152с.

11. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface//Physics fluids: Harlow F.H., Welch J.B. - 1965.-№8.- P.2182-2189.

12. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии: Вычислительные технологии Том № 2. / Гришин А.М., Перминов В.А. — ТГУ, 1997. – 11с.

13. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources: Proc. Roy. Soc., / B. R. Morton, G. I. Taylor, J. S. Turner. - 1956, v. 234, No. 1196, pp. 1–23.

14. Г.М. Кнорринга. Справочная книга для проектирования электрического освещения. /– СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 448 с

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

16. Фетисов, П.А. Справочник по пожарной безопасности. / – М.: Энергоиздат, 1984. – 262 с.

17. Кузьмина Е.А. Методы поиска новых идей и решений. Методы менеджмента качества. №1 2003 г.

18. Кузьмина Е.А. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. Методы менеджмента качества. №7 2002 г.

19. Карпунина М.Г. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / - М.: Энергия, 1980. - 175 с.

20. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. / – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.

21. Сущность методики FAST в области ФСА [Электронный ресурс] <http://humeur.ru/page/sushhnost-metodiki-fast-v-oblasti-fsa>.

**Раздел 3**  
**Solution Method**

Студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1EM41	Третьякова Мария Олеговна		

Консультант кафедры ЭБЖ:

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

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Крицкая Надежда Вадимовна	к.ф.н		

### 3. Solution Method

#### 3.1. Control Volume Method

The differential equations describing the processes of mass and heat transfer and fluid dynamics obey the generalized conservation law. Let  $\Phi$  denote any required function, then the generalized differential equation in tensor representation takes the form

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_\Phi; \quad (16)$$

where  $x_i$ ,  $t$  are the spatial and temporal coordinates, respectively,  $\rho$  is density,  $v_i$  are the velocity vector components,  $\Gamma_\Phi$  is transfer coefficient (for example,  $\Gamma_\Phi$  is turbulent viscosity, thermal conductivity, diffusion coefficient, etc.),  $S_\Phi$  is a source term. In particular,  $S_\Phi$  may include heat inflow (outflow) due to chemical reactions in the energy equation or an increase (decrease) in component concentrations as a result of chemical reactions in the diffusion equation. The specific form of the terms  $\Gamma_\Phi$  and  $S_\Phi$  depends on the meaning of the variable  $\Phi$  (actually, the  $\Gamma_\Phi$  and  $S_\Phi$  representation should be used, but it would lead to an excessive number of subscripts in further calculations, so these subscripts will be omitted). In (16), there is also implied summation over the subscript  $i$ . When solving one-dimensional problems,  $i=1$ ,  $i=1,2$  for two-dimensional, and  $i=1,2,3$  for three-dimensional ones. [10]

The boundary and initial conditions (at the computational domain boundaries) for Eq. (16) in general terms are the following:

$$\Phi|_{t=0} = \Phi_e, \alpha_1 \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \Big|_{x_i=x_{ie}} + \alpha_2 \Phi \Big|_{x_i=x_{ie}} = \alpha_3 \quad (17)$$

where  $\alpha_i$  – is a function of the arguments  $t$  and  $x_i$ ,  $x_{ie}$  is a value of the argument  $x_i$  at the corresponding boundary of the computational domain.

In the analyzed mathematical models chemical reactions are taken into account, therefore, first order ordinary differential equations or chemical kinetics equations are additionally used, which in general terms can be written as follows:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -K(t)\Phi + F(t), \quad K(t) \geq 0, F(t) \geq 0, \Phi|_{t=0} = \Phi_e. \quad (18)$$

Let us define a discrete analogue of Eq. (16) with corresponding boundary conditions (17) on the basis of the control volume method described in details in [10].

The basic idea of the method is amenable to direct physical interpretation. The computational domain is divided into a certain number of non-overlapping control volumes in such a manner that each grid point is contained in one control volume. In a two-dimensional case, it is a rectangle. The differential equations are integrated over each control volume. Piecewise profiles expressing the variation of the function  $\Phi$  between the grid points are used to calculate the integrals. Various functions (straight lines, parabolas, different-degree polynomials, exponential functions, etc.) can be used as piecewise profiles. However, practice shows that polynomial profiles are the best for numerical implementation in terms of accuracy and efficiency. The so-obtained discrete analogue expresses the conservation law for the state parameter  $\Phi$  for each finite control volume, in the same way as the differential equation expresses a conservation law for an infinitesimal control volume. The most important property of the control volume method is that when it is used, the integral conservation laws for such quantities as mass, kinetic momentum, energy, etc., are exactly fulfilled in each control volume, any group of control volumes and, consequently, within the entire computational domain. Therefore, even a solution using a small number of control volumes satisfies the exact integral balances within the entire domain, which means that the Patankar-Spalding discrete analogue (differencing scheme) is conservative. The method of partitioning of the computational domain into control volumes for the two-dimensional case and a typical control volume is shown in Fig. 2 [10].

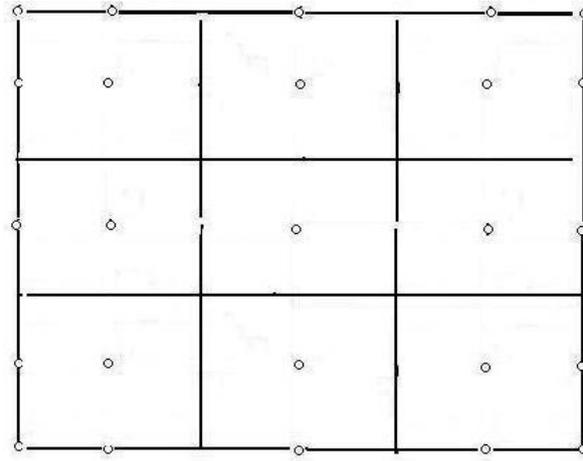


Figure 3. Example of partitioning of the computational domain into control volumes in a plane

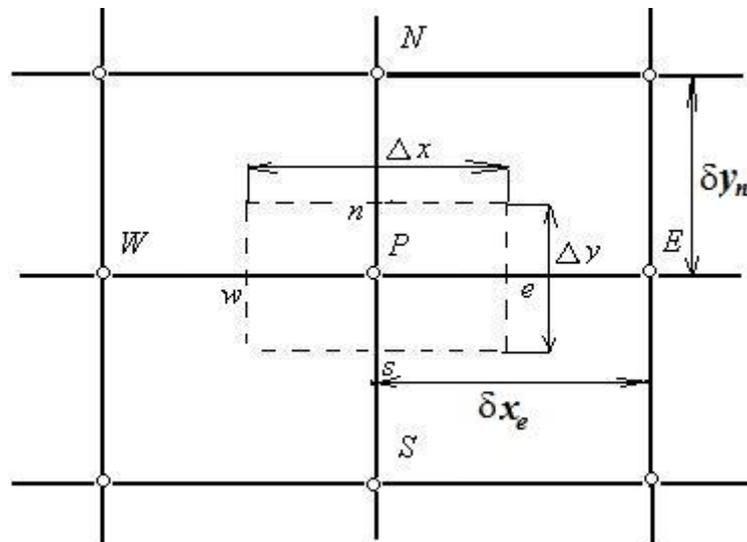


Figure 4. Typical control volume for the two-dimensional case

Fig. 4 shows a portion of a typical two-dimensional grid. The dashed line indicates a control volume for a two-dimensional domain having its centre at point  $P$ . The centres of adjacent control volumes (grid points) are designated by the letters  $N, S, W, E$  ("North", "South", "West" and "East"). The corresponding points at the control volume boundaries are indicated by the lower case letters  $n, s, w, e$ . The control volume dimensions are denoted by  $\Delta x$  and  $\Delta y$ . The distances to the centres of the adjacent control volumes are denoted, for example, by  $\delta x_e, \delta y_n$  etc. The designations for the three-dimensional (spatial) case are defined similarly, i.e. for the control volume shown in Fig. 4 [10].

Following [6], where the method for obtaining a discrete analogue by means

of the control volume method is described in details, for Eq. (16) in the three-dimensional case, the discrete analogue can be written in the final form:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b \quad (19)$$

$$a_E = D_e A(|P_e|) + \llbracket -F_e, 0 \rrbracket, \quad a_W = D_w A(|P_w|) + \llbracket F_w, 0 \rrbracket,$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + \llbracket -F_n, 0 \rrbracket, \quad a_S = D_s A(|P_s|) + \llbracket F_s, 0 \rrbracket,$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta x_1 \Delta x_2,$$

$$b = S_C \Delta x_1 \Delta x_2 + a_P^0 \Phi_P^0, \quad S = S_P \Phi + S_C, \quad a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta x_1 \Delta x_2}{\Delta t}.$$

Here,  $\Phi_P^0$  and  $\rho_P^0$  stand for the known values of time,  $t$ , and all other values ( $\Phi_P, \Phi_E, \Phi_W, \Phi_N, \Phi_S$  etc.) represent unknown values of time,  $t + \Delta t$ . The mass flow rates  $F_e, F_w, F_n, F_s$ , are defined by the equations

$$F_e = (\rho v_1)_e \Delta x_2, \quad F_w = (\rho v_1)_w \Delta x_2, \quad F_n = (\rho v_2)_n \Delta x_1, \quad F_s = (\rho v_2)_s \Delta x_1,$$

the corresponding conductivities:

$$D_e = \frac{F_e \Delta x_2}{(\delta x)_e}, \quad D_w = \frac{F_w \Delta x_2}{(\delta x)_w}, \quad D_n = \frac{F_n \Delta x_1}{(\delta x)_n}, \quad D_s = \frac{F_s \Delta x_1}{(\delta x)_s}, \quad (20)$$

and the Peclet numbers are:

$$P_e = F_e / D_e, \quad P_w = F_w / D_w, \quad P_n = F_n / D_n, \quad P_s = F_s / D_s.$$

The expression type  $[A, B]$  means that the maximum element of the two is selected. For the function  $A(|P|)$ , the power law scheme is recommended [9]

$$A(|P|) = \left\| 0, (1 - 0, |P|)^5 \right\| \quad (21)$$

It should be noted that even at this stage, the physical meaning of the various coefficients in (19) is clear. The coefficients at the adjacent points  $a_E, a_W, a_N, a_S$  take into account the influence of convection and diffusion for six faces of the control volume, which depend on the mass flow rate  $F$  and conductance [9]  $D$ . The term  $a_P^0 \Phi_P^0$  characterizes the known  $\Phi$  value for the control volume (for the time  $t$ ) referred to a time step. The remaining terms can be interpreted similarly.

We assume the continuity and derivability of the functions in the discrete

analogue (19) for a desired number of times. By making a Taylor series expansion, it is easy to show that difference equations (19) approximate the initial boundary value problem in the general case with an accuracy of  $O(h+t)$ . Boundary conditions (17) within discrete analogue (19) are approximated in the manner agreed with the internal grid points and have the same order of approximation. The discrete analogue of the main system of equations is entirely implicit, which excludes obtaining non-physical solutions. The practical verification of stability and convergence was carried out by varying the control volumes dimensions and the time step  $\Delta t$ , using the test-functions method, i.e. when the solution is known beforehand. Difference equations (19), as mentioned above, are fully conservative due to the method of their composition [10].

In order to obtain discrete analogues at the computational domain boundaries, it is necessary to integrate equations (16) and take into account conditions (17) at the specified boundary. In case of using control volumes shifted in a certain direction, so-called half-control volumes arise on the boundary. In other directions and in case of scalar functions, zero-control volumes are used [10]. For example, they are used for the right vertical boundaries of a three-dimensional computational domain, if the boundary condition in the differential form can be written as

$$\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} + \beta_2 \Phi = \beta_3 \quad (22)$$

In case of the use of half control volumes [9] we obtain a discrete analogue in the form

$$a_p \Phi_p = a_w \Phi_w + b, \quad (23)$$

where  $a_p = a_w + a_p^0 - S_p \Delta x_1 \Delta x_2 + \beta_2 \Delta x_2$ ,  $b = S_c \Delta x_1 \Delta x_2 + a_p^0 \Phi_p^0 + \beta_3 \Delta x_2$ .

and the remaining designations are shown above [10].

Similarly, having a boundary condition (17) at the corresponding boundary, we obtain discrete analogues. In case of a zero control volume the corresponding dimension  $\Delta x_l$  at the boundary is equal to zero. Thus, using (23), we obtain, for example, for a zero control volume  $\Delta x_l=0$

$$a_p \Phi_p = a_w \Phi_w + b, \quad (24)$$

where  $a_p = a_w + \beta_2 \Delta x_2$ ,  $b = \beta_3 \Delta x_2$

For chemical kinetics equations (18) there was used an implicit difference scheme

$$\Phi^{n+1} = \frac{\Phi^n + F^{n+1}(t)\Delta t}{1 + K^{n+1}(t)\Delta t}. \quad (25)$$

Eq. (25) has the first order approximation over  $t$ , it is stable and guarantees the positivity of  $\Phi$  for any time steps  $\Delta t$ , that expresses the physical nature of the variable  $\Phi$ .

In case of the momentum equation,  $\Phi$  stands for one of the velocity components  $v_i$ , the coefficient  $\Gamma$  and the free term  $S$  should be given an appropriate meaning. Considering the difficulties [10] arising when calculating the pressure field and caused by the presence of the first derivatives in the convection terms, and the pressure gradient of the momentum equation), it is proposed to use staggered grids for the velocity components  $v_i$  [10]. Figure 4 shows examples of the control volumes locations for the velocity components towards the main control volumes for the remaining functions ( $\rho$  - density,  $T$  - temperature,  $p$  - pressure, etc.). With this arrangement of the grid, the velocity component  $v_i$  is located at the edges of the control volumes perpendicular to the  $x_i$  direction [10].

When using the staggered grid (see Fig.5), the discrete analogues for the velocity components in the momentum equation differ slightly from the discrete analogues of equations for other  $\Phi$  calculated in grid points of the main grid. However, this difference is rather minor. It is associated with the use of the control volumes on the staggered grid to approximate the momentum equations. A separate grid can be used for each dependent variable. When calculating the velocity components, in accordance with [10], they should be defined on the grid, which is different from the grid used for all other variables. A shifted grid was used for the velocity components calculations in [11] and other methods. For example, this approach to the grid generation was used in the *SIVA* and *SIMPLE* procedures development.

When using a shifted grids for the momentum equations, the velocity vector components are calculated at the points located on the faces of the control volumes defined for functions of scalar variables (temperature, concentration, pressure, etc.). Therefore, the velocity components  $v_i$  along the respective axes  $x_i$  can be calculated on the control volumes surfaces perpendicular to the directions of the  $x_i$  axes. The rows in Fig. 5 show the points, in which the velocity components  $v_i$  is defined for the two-dimensional case. The points for scalar functions (grid points) are indicated by circles. Let us call them the main ones. As it follows from the analysis of Fig. 5, the points at which the velocity components  $v_i$  are being determined, are shifted only in the  $x_i$  axis direction with respect to the grid points of the main grid. That means that these points are located on the segments between two adjacent grid points. The points necessary to find  $v_i$  are located on the control volumes faces between the main grid points at which there are defined scalar functions (temperature, concentration, pressure, etc.) [10].

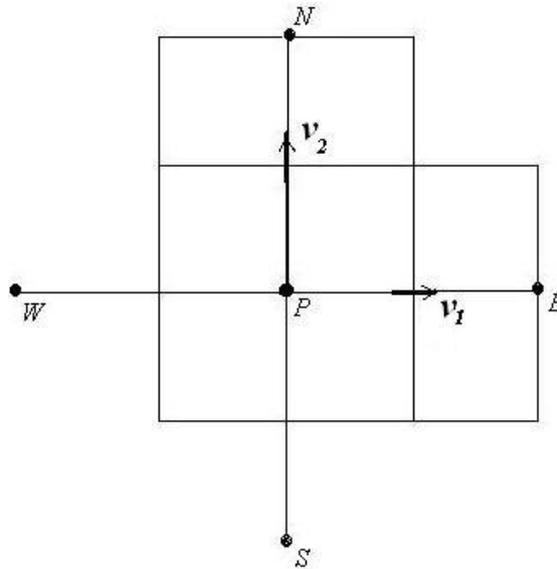


Figure 5. Control volumes distribution for scalar functions and velocity components  $v_i$

Due to this method of the shifted grid introduction, the mass flow through the control volumes faces can now be calculated without interpolation of the respective velocity components. The use of this approach to define the grids provides a more convenient form of the discrete analogue of the generalized differential equation  $\Phi$ .

Thus, the resulting discrete analogue for the velocity components,  $v_i$ , can be written as [10]

$$\begin{aligned} a_e v_{1e} &= \sum a_{nb} v_{1nb} + b + (p_P - p_E) A_e, \\ a_n v_{2n} &= \sum a_{nb} v_{2nb} + b + (p_P - p_N) A_n. \end{aligned} \quad (26)$$

Here, the number of the adjacent terms depends on the problem's dimensionality under the sign of summation. Equations (26) are written in accordance with (19). The difference is that the corresponding terms  $b$  are defined in the same way as in (19), but the pressure gradient projections to the coordinate axes are not included in  $b$ , but are written separately. The coefficients  $A_e$ ,  $A_n$  in the two-dimensional case are defined as  $A_e = \Delta x_2$ ,  $A_n = \Delta x_1$ .

In order to solve the motion equation (26) it is necessary to calculate the pressure field or define it in some way. Let us define the pressure field according to [10] in such a way that the velocity field satisfies the continuity equation. For that purpose, the algorithm SIMPLE was used in [10]. This method is described in details in [10]. In this case, an auxiliary function was used for the pressure correction. The discrete analogue calculation for the pressure correction  $p'$  is also given in [12]. Here  $p'$  is defined as  $p' = p - p^*$ , where  $p$  is pressure and  $p^*$  is the approximated pressure field. The equation for grid values of the pressure correction  $p'$  can be written in the form

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + b, \quad (27)$$

where

$$\begin{aligned} a_E &= \rho_e d_e \Delta x_2, a_W = \rho_w d_w \Delta x_2, a_N = \rho_n d_n \Delta x_1, a_S = \rho_s d_s \Delta x_1, \\ a_P &= a_E + a_W + a_N + a_S, \\ b &= \frac{(\rho_P^0 - \rho_P) \Delta x_1 \Delta x_2}{\Delta t} + [(\rho v_1)_w - (\rho v_1)_e] \Delta x_2 + \\ &\quad + [(\rho v_2)_s - (\rho v_2)_n] \Delta x_1 \end{aligned}$$

The symbol \* stands for the velocity values obtained with the defined pressure field  $p^*$ .

### 3.2. Solution Algorithm

Let us consider the algorithm for solving the above described system of

equations for given domains. Considering that the system of equations is non-linear, it is necessary to define the approximations for the desired functions. Under these conditions, their values from the previous time layer are used. At the first iteration step, the initial conditions are used as the approximation. In the numerical calculation, the splitting by physical processes was used, i.e. at the beginning, the hydrodynamic flow and distribution pattern of the required scalar functions is calculated (for example  $T$ ,  $c\alpha$  etc.), and then we solve the chemical kinetics equations for the volume fractions of phases and take into account the chemical sources for scalar functions ( $s\alpha$ ,  $T$ ).

Let us calculate the assigned task using the Simple algorithm. Simple (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) is a procedure designed for the flow field calculations.

The flow field calculations algorithm, SIMPLE is described in [10] and in other more recent works. Let us specify the basic operations sequence.

1. Pressure field assignment,  $p^*$ .
2. Solution of the motion equations, such as

$$a_e u_e^* = \sum a_{nd} u_{nd}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e$$

$$a_n u_n^* = \sum a_{nd} v_{nd}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n$$

$$a_t u_t^* = \sum a_{nd} w_{nd}^* + b + (p_P^* - p_T^*) A_t$$

to obtaine  $u^*, v^*, w^*$ .

3. Solution of the equation for  $p'$ .
4. Calculation of  $p$  from the equation  $p = p^* + p'$  by adding  $p'$  to  $p^*$ .
5. Calculation of  $u, v, w$  taking into account the corresponding values with an asterisk and using the equations for the velocity correction

$$u_e = u_e^* + d_e (p_P' + p_E')$$

$$v_n = v_n^* + d_n (p_P' + p_N')$$

$$w_t = w_t^* + d_t (p_P' + p_T').$$

6. Calculation of discrete analogues for different  $\Phi$  (such as temperature, concentration and turbulent characteristics), if they affect the flow field through the physical properties of the liquid, source term, etc. (if a certain  $\Phi$  does not affect the

flow field, it is better to calculate it after obtaining the solution convergence for the flow field).

7. Representation of the adjusted pressure  $p$  as a new  $p^*$ , return to Step 2 and repeating the whole procedure until a convergent solution is obtained.

When solving equations of chemical kinetics the time step is selected automatically. It allows to carry out the solution process at the second stage with a reduced time step, if necessary. This situation occurred when chemical sources played an important role, i.e. in case of moisture evaporation and LGM pyrolysis, and then, the ignition of volatile pyrolysis products. And then, the radiative transfer equation was solved. The obtained function values are substituted as an initial approximation, and the process repeats.

Таблица 1.11- Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работ	Исполнители	Т <sub>кп</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ										
				Март			Апрель			Май				
				1	2	1	2	1	2	1	2	3		
1	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	6,9											
2	Анализ актуальности темы	Студент	4,8											
3	Поиск и изучение материала по теме	Студент	31,5											
4	Выбор направления исследований	Руководитель Студент	2,4			 								
5	Изучение литературы по теме	Студент	54											
6	Подбор нормативных документов	Студент	28,5											
7	Изучение программ «Fire» и «MatLab»	Студент	21											
8	Моделирование зон зажигания растительного покрова под действием теплового излучения огненного шара	Студент	43,2											
9	Изучение результатов	Студент	18											
10	Проведение расчетов по теме	Студент	30,3											
11	Анализ результатов	Студент	4,8											
12	Вывод по цели	Студент	2,7											

 – студент;  – руководитель

