

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

---

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

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Математическое моделирование возникновения и распространения низовых лесных пожаров</b>

УДК 614.841.42.02:630\*43:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1E51	Старцева Дарья Андреевна		

Руководитель

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

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП 20.03.01 Техносферная безопасность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Вторушина А.Н.	к.х.н.		

## Результаты освоения образовательной программы по направлению 20.03.01 Техносферная безопасность

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

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

---

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

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
20.03.01 Техносферная  
безопасность  
\_\_\_\_\_ А.Н. Вторушина  
04.02.2019 г.

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
1E51	Старцевой Дарье Андреевне

Тема работы:

Математическое моделирование возникновения и распространения низовых лесных пожаров	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2019 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Литературные данные по проблематике лесных пожаров, их математическому моделированию, нормативно-техническая документация. Для решения поставленной задачи использовалась общая математическая модель лесных пожаров Гришина А.М.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования;</i>	1) Обзор существующих теоретических и экспериментальных методов изучения лесных пожаров. 2) Разработка математической модели распространения низового лесного пожара. 3) Выбор методики решения численных расчетов.

<i>содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	4)Проведение численных расчетов и получение результатов. 5)Оценка и анализ полученных данных.
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Таблицы, рисунки исследуемых скоростей ветра, графики зависимости размера противопожарного разрыва от скорости ветра и влагосодержания лесных горючих материалов.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Подопригора Игнат Валерьевич
Социальная ответственность	Романцов Игорь Иванович

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	04.02.2019 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	д.ф.-м.н		04.02.2019 г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1E51	Старцева Дарья Андреевна		04.02.2019 г.

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

---

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
Направление подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность  
Уровень образования бакалавриат  
Отделение контроля и диагностики  
Период выполнения весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

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

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2019 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.02.2019	Сбор информации, анализ собранной информации, работа с разделом «Литературный обзор»	15
27.02.2019	Работа с разделом «Литературный обзор», поиск метода проведения исследования	10
08.03.2019	Физическая и математическая постановки задачи	10
18.03.2019	Разработка математической модели возникновения и распространения лесных низовых пожаров	20
20.04.2019	Результаты решения задачи, анализ полученных данных и верификация модели	15
21.05.2019 г.	Разработка разделов «Социальная ответственность» и «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	10
04.06.2019 г.	Оформление и представление ВКР	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов В.А.	д.ф.-м.н.		04.02.2019

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП 20.03.01 Техносферная безопасность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Вторушина А.Н.	к.х.н.		04.02.2019

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1E51	Старцевой Дарье Андреевне

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОКД</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	20.03.01 Техносферная безопасность

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

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

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Определение потенциального потребителя результатов исследования, анализ конкурентных технических решений, SWOT-анализ.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Формирование плана и графика разработки: -определение структуры работ; -определение трудоемкости работ; -разработка графика Гантта.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка сравнительной эффективности проекта

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

1. Карта сегментирования рынка
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Матрица SWOT
4. График проведения НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Подопригора Игнат Валерьевич	К.Э.Н		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1E51	Старцева Дарья Андреевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1E51	Старцевой Дарье Андреевне

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОКД</b>
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	20.03.01 Техносферная безопасность

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Инженер по моделированию воздействия и распространения лесных пожаров постоянно находится в кабинете за компьютером. Рабочая поза, постоянно сидя в офисном кресле. Область применения: научно-исследовательские институты, высшие учебные заведения, Департаменты лесного хозяйства.
--	--

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

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018);</li> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования;</li> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<p>2.1. Рассмотреть воздействие на оператора вредных факторов, таких как, неблагоприятный микроклимат, недостаточная освещенность рабочей зоны, повышенный уровень шума на рабочем месте, напряженность и монотонность трудового процесса. Воздействие на оператора опасных факторов: электробезопасность (статистическое электричество, отсутствие заземления), пожаробезопасность.</p> <p>2.2. Изучить оптимальные параметры микроклимата и регламентационные переделы.</p>

<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Исследовать воздействие на окружающую среду от выбросов в атмосферу углекислого газа при утилизации старого ПК.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Изучить возможные возгорания вследствие короткого замыкания из-за ошибки оператора и нарушения целостности электрических проводов.

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

**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
1Е51	Старцева Дарья Андреевна		



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 75 с., 19 рис., 17 табл., 38 источников.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, лесной пожар, низовой пожар, противопожарные разрывы, метод контрольного объема.

**Объектом исследования** являются лесные пожары, распространяющиеся по лесному покрову с учетом противопожарных разрывов.

**Цель работы** – с помощью метода математического моделирования определить размеры противопожарных разрывов при низовых лесных пожарах и исследовать зависимость их размеров от скорости ветра и влагосодержания ЛГМ.

**В процессе исследования проводились** разработка двумерной математической модели распространения низового лесного пожара, определялись размеры безопасных противопожарных разрывов.

**В результате исследования получены:** зависимость размеров противопожарных разрывов от скорости ветра и влагосодержания ЛГМ; распределение температур, концентраций и объемных долей фаз.

**Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики:** данная работа позволит более точно рассчитать размеры противопожарного разрыва.

**Область применения:** профилактические мероприятия для предотвращения лесных пожаров.

**Экономическая эффективность/значимость работы:** позволит более точно рассчитать противопожарный разрыв.

## **Сокращения и обозначения**

ЛГМ – лесные горючие материалы

НЛП – низовой лесной пожар

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина

ПО – программное обеспечение

МФУ – многофункциональное устройство

МКО – метод контрольного объёма

ФКУ ЦУКС – Федеральное казенное учреждение «Центр управление в кризисных ситуациях»

ЧС – чрезвычайная ситуация

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	13
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	15
1.1. Общие сведения и понятия о лесе .....	15
1.2. Лесные пожары и способы борьбы с ними.....	15
1.3. Общая обстановка и статистика лесных пожаров Томской области.....	18
1.4. Экспериментальные исследования возникновения и распространения лесных пожаров .....	20
1.5. Прогнозирование ЧС с помощью математического моделирования .....	23
1.6. Возможности программного обеспечения RHOENICS.....	25
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ.....	27
2.1 Физическая постановка задачи .....	27
2.2 Математическая постановка задачи .....	28
2.3 Метод решения .....	31
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ.....	33
3.1 Достоверность исследования .....	33
3.2 Анализ результатов исследования.....	37
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	44
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	44
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	44
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений .....	45
4.1.3 SWOT-анализ.....	47
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	49
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	49
4.2.2 Разработка графика проведения научного исследования .....	50
4.2.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	54
4.2.4 Расчет материальных затрат НТИ .....	54
4.2.5. Основная заработная плата исполнительной темы .....	54
4.2.6 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	56
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды .....	56
4.2.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта ...	56
4.3 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	57

4.3.1 Оценка социальной эффективности исследования .....	57
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	59
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	59
5.2 Производственная безопасность.....	62
5.2.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровней их воздействия .....	63
5.3 Экологическая безопасность.....	68
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	71
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	72

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых актуальных проблем сегодня является негативное воздействие лесных пожаров. Каждый год в России происходят десятки тысяч лесных пожаров, в результате чего в атмосферу выбрасываются тонны продуктов сгорания. Лесные пожары оказывают негативное влияние, повреждая ценную древесину, лишают почву растительного покрова, приводят к разрушению вод, уменьшают научную ценность ландшафтов, наносят ущерб здоровью людей, убивают животных, сжигают жилые здания и сооружения, выбрасывают в атмосферу соединения углерода, которые относятся к парниковым газам. Это лишь малая часть негативного воздействия на окружающую среду.

Лесные пожары уничтожают большое количество древесины и, как известно, обновление этих ресурсов занимает очень много времени. Флора и фауна также страдают в опасности близлежащие здания и человеческие жизни. Поэтому необходимо повысить огнестойкость лесов, и реагировать в случае возникновения пожара так быстро, как это возможно, устраняя их, чтобы предотвратить захват больших площадей.

Целью дипломной работы является разработка математической модели для определения размеров противопожарных разрывов при низовых лесных пожарах и исследование зависимости их размеров от скорости ветра и влагосодержания ЛГМ.

Для выполнения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать физико-математическую постановку задачи о возникновении и распространении низового лесного пожара с учетом противопожарных разрывов.
2. Применить метод контрольного объема для получения дискретного аналога.
3. Выполнить математическое моделирование процесса.
4. Определить размеры безопасных размеров противопожарных разрывов.

5. Изучение влияния влагосодержания ЛГМ и скорости ветра на размеры противопожарных разрывов.

Подобные модели могут быть использованы для составления прогнозов поведения реальных лесных пожаров, для разработки мер по предупреждению и устранению пожаров в случае их возникновения. Натурные исследования являются дорогостоящими, оказывают воздействие на окружающую среду, а также могут выйти из-под контроля и перейти в стадию ЧС. Кроме того, при необходимости проведения массовых экспериментов для различных метеоусловий и параметров, невозможно применять натурные испытания. Поэтому предпочтительнее использовать математические модели, которые лишены этих недостатков. Именно этим обусловлена актуальность работы и ее практическая значимость. Использование представленной в работе математической модели дает возможность описать различные условия распространения лесных пожаров с учетом состояния лесных горючих материалов, что позволяет применять данную модель для профилактических мероприятий по борьбе с лесными пожарами.

Объект исследования – лесные пожары.

Предмет исследования – математические модели распространения лесных пожаров.

Научная новизна заключается в том, что впервые с помощью математической модели для двухтемпературной многофазной реагирующей среды проведено исследование зависимости размеров противопожарных разрывов от скорости ветра и влагосодержания ЛГМ. Апробация математической модели и компьютерной программы проводилась путем сравнения с экспериментальными данными [1].

# 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1. Общие сведения и понятия о лесе

Первым, кто дал определение леса был русский ученый, лесовод Г.Ф. Морозов, еще в начале XX века, он доказывал, что лес это сообщество древесных растений и деревьев [2].

Лес – это один из важнейших растительных ресурсов планеты, который играет немаловажную роль в жизни человечества. Лес является многоярусной структурой, вследствие сосуществования растений разных видов и возраста и наличием отмерших частей растений. [3].

Видовое разнообразие лесов зависит от природно-климатических условий его произрастания. Так, в России выделены следующие зоны растительности:

- субтропики;
- широколиственные леса, лесостепь;
- смешанные хвойно-широколиственные леса;
- таежная зона;
- лесотундра

Наибольшую площадь в России занимает тайга. Это массив, состоящий из хвойных пород деревьев – ели, кедра, пихты, лиственницы, сосны. Тайга является основным источником древесины и подвергается постоянным обширным антропогенным нагрузкам [4].

Для лесов определяющим фактором является климат. При этом лес тоже оказывает влияние на окружающие условия – поддерживает уровень грунтовых и наземных вод, снижает скорость ветра, изменяет газовый состав атмосферы. Также влияние оказывают уровень солнечной радиации, водный режим, состав почвы и атмосферы, скорость движения воздуха [5].

## 1.2. Лесные пожары и способы борьбы с ними

Лесные пожары – это стихийные бедствия, которые, как правило, охватывают огромные территории в несколько сотен, тысяч и даже

миллионов гектаров. Истинные размеры реальной пожарной опасности очень велики, мало кто знает, как часто возникают пожары, каковы их социальные, экономические и экологические последствия. Ежегодно погибает большое количество людей, выгорает лесов, уничтожается жилищ, зданий.

Разрушающим и губительным фактором экосистем в лесу являются лесные пожары. Лесные пожары затрагивают множество актуальных проблем для большинства стран мира. Для мониторинга, контроля, предупреждения и ликвидации природных пожаров требуются очень большие материальные затраты. Поэтому задача повышения эффективности работы лесопожарных служб с помощью математических методов и современных информационных технологий является весьма актуальной [6].

Пожар в лесу зависит от немалого количества факторов, таких, как метеорологические условия, характеристики растительного покрова, топография и рельеф местности, а также антропогенная нагрузка, поэтому изучение его является очень сложным объектом исследования. Ряд факторов имеет немаловажное свойство, воздействующее на пожар, а именно большинство из них трудно или невозможно точно измерить. Поэтому воздействие на образование и распространение лесного пожара и их отношение между этими факторами являются актуальными на сегодняшний день, поскольку исследованы не до конца [7].

Лесной пожар — это чрезвычайно сложное и разрушительное природное явление, у которого тепло -и массовыделения, перенос энергии конвективным и радиационным путем, нагревание, сушка и пиролиз лесных горючих материалов ( ЛГМ), а также интенсивность зависит от множества факторов:

- метеорологические условия;
- вид ЛГМ;
- количество ЛГМ.

Если рассматривать низовой пожар, то его распространение происходит по нижним ярусам лесной растительности – траве, листовому



опаду, кустарникам, мелкому подросту и коре. По скорости распространения бывает беглый и устойчивый. Распространение беглого пожара происходит со стремительной скоростью (до 300 м/ч) и зависит от скорости ветра в приземном слое. Такой пожар возникает весной, когда просыхает только верхний слой подстилки. Поэтому картина пожара имеет пятнистый вид, так как непросохшие участки не возгораются. Устойчивый пожар наоборот, распространяется медленнее (до 180 м/ч), однако напочвенный покров и лесная подстилка прогорают полностью, поэтому картина пожара сплошная, без разрывов. Такой пожар может перейти в другие формы – на торфяниках – в подземный, в молодых лесах – в верховой. Такой пожар наносит вред деревьям из-за глубокого повреждения корней и ствола [8].

Существует необходимость в разработке новых численных моделей возникновения и распространения лесных пожаров различного вида (верховые, низовые, крупномасштабные и т.д.) с подробным описанием изменения динамики скорости ветра и состояния окружающей среды. В результате воздействия фронта пожара происходит выделения тепла на приземный слой атмосферы. Описание воздействия природных пожаров на здания и сооружения, находящиеся в тесной близости от массивов леса (возникновение городских пожаров) является основой исследования для осуществления эффективной и результативной борьбы с природными пожарами.

Уменьшение негативного влияния лесных пожаров на окружающую среду достигается с помощью грамотного управления, которое включает всю необходимую деятельность по охране лесов и других растительных ресурсов от пожаров. Лесными пожарами невозможно управлять без исследования их природы, при котором обычно выделяют три основных направления: изучение возникновения пожара (пожарной опасности), изучение поведения пожара и изучение последствий пожара.

Мониторинг лесных пожаров может осуществляться разными способами: наземным, авиационным и космическим.

Наземный мониторинг включает в себя обходы–патрулирования,

использование наблюдателей на специальных вышках, помощь местного населения. В эту же группу входит и видеонаблюдение. В настоящее время активно внедряется система «Лесной дозор», которая включает в себя установленные видеокамеры с радиусом охвата до 30 км и программное обеспечение для просмотра видеопотока с любой из установленных камер. Также стоит отметить применяемые в «Лесном дозоре» технологию компьютерного зрения, которое анализирует изображение, выявляет потенциальные опасности и оповещает об этом оператора [9].

Авиационный мониторинг осуществляется, в основном, средствами Авиалесоохраны, как обычными воздушными судами, так и беспилотными. Интересна практика использования гражданских самолетов для мониторинга лесных пожаров. Для этого на нижнюю часть самолета устанавливаются датчики и камеры, фиксирующие происходящее на пути рейса.

Космический мониторинг пожаров – одно из наиболее перспективных направлений развития мониторинга. Для этого используются данные дистанционного зондирования местности ФКУ ЦУКС, кроме этого используются бесплатные интернет-ресурсы NASA и Сибирского центра ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»». Пожары определяются как по дымовому шлейфу, так и по локальным повышениям температур или свечению в ночное время [9].

Лесопожарная обстановка в России и в мире требует развития и совершенствования способов борьбы с лесными пожарами. Специализированная служба авиационной охраны лесов, специализированные лесопожарные подразделения, лесничества и добровольные дружины являются основными органами, отвечающим за защиту от природных пожаров. [9].

### **1.3. Общая обстановка и статистика лесных пожаров Томской области**

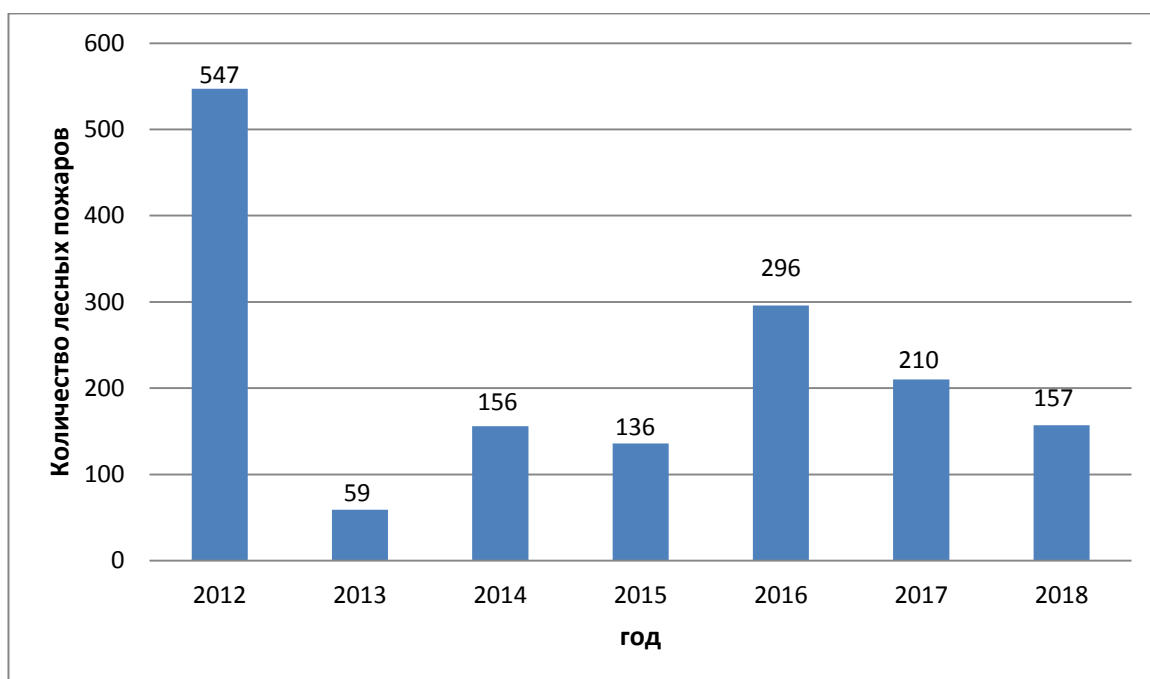
Томская область богата лесом, площадь земель лесного фонда составляет 91% (28820,7 тыс. га.) от площади всех земель, в том числе

хвойными породами занято 10334, 3 тыс. га. Ель, пихта, кедр и сосна являются наиболее ценными породами [10].

Лесные земли составляют 68,2 %, покрытые лесом – 67 %, в том числе, искусственные насаждения 1,1 %. Непокрытые лесом земли: 0,9 % площади земель лесного фонда, в том числе гари и погибшие насаждения – 0,3 %, вырубki 0,4 %, редины, пустыри и прогалины 0,2 %.

Хвойные насаждения составляют 53,7 % от покрытой лесами площади. Из них площади с преимущественной долей сосны –29 %, кедра – 19%, ели и пихты –5,7%. Общий запас древесины составляет 2861, 37 млн. м<sup>3</sup>, в том числе хвойных –1604,53 млн. м<sup>3</sup>. Продуктивность лесов области определяется годовым приростом древесины –33,18 млн. м<sup>3</sup> или 1,7 м<sup>3</sup>/га. Средний запас древесины –148 м<sup>3</sup>/га, в хвойных насаждениях –155 м<sup>3</sup>/га. [9]

Рассмотрим данные по количеству пожаров находящихся на природных территориях Томской области с 2012 по 2018 год.



**Рисунок 1.1 – Количество лесных пожаров на территории Томской области по годам**

Из Рисунка 1 видно, что наибольшее количество природных пожаров в Томской области зарегистрировано в 2012 году ввиду одновременного совпадения таких факторов, как: высокая температура воздуха (местами до +33 °С, среднесуточная 25 °С), отсутствие осадков, высокая скорость ветра (3–8 м/с, порывы до 21 м/с), обилие сухих гроз. Все это привело к

всплеску количества лесных пожаров большого масштаба.

Также подтверждается, что крупные пожары возникают в определенных погодных условиях. Крупные лесные пожары возникают при невысокой влажности воздуха (в основном, менее 50%), значительной скорости ветра (ни один крупный пожар не развился при штиле) и высокой температуре воздуха.

Стоит отметить, что преимущественной причиной возникновения пожаров являются сельскохозяйственные палы. Таким образом, основной задачей при выполнении превентивных и профилактических мероприятий является работа с местным населением и контроль за проведением необходимых огневых работ. Однако, несмотря на проведение сельскохозяйственных палов на территориях нелесного фонда, от пожаров страдают, в основном, леса. Это связано с природно-климатическими условиями Томской области, то есть высокой степенью заболачивания земель и большим количеством территорий, покрытых лесом.

#### **1.4. Экспериментальные исследования возникновения и распространения лесных пожаров**

Невозможно представить современный мир без инновационных технологий. С помощью математических моделей изучают влияние различных факторов на развитие и другие характеристики лесного пожара. Для решения поставленной задачи проводятся расчеты для различных значений параметров, которые в данной системе заменяют моделью. Модель выражает наиболее значимые свойства объекта. Математическая модель представляет систему, которая позволяет получать информацию о другой системе. [11].

В соответствии с классификацией модели подразделяются на линейные и нелинейные, статистические и динамические, сосредоточенные и распределенные, дискретные и непрерывные. С помощью численного метода определяют различные параметры пожара, включая скорость, температуру, тепловые потоки, плотность, концентрацию компонентов. Зная свойства

горючих материалов, какой сезон и район можно смоделировать развитие лесного пожара. Однако экспериментальное исследование лесных пожаров очень дорогостоящее и экологически небезопасно, поэтому единственный способ изучения фронта пламени, условий и скорости распространения лесных пожаров остается математическое моделирование на ПК [11].

В данной статье [12] автор проводит численное исследование влияния влаги в топливе на распространение низового пожара на плоской местности. Подход, используемый автором, был основан на численном моделировании с использованием физической модели огня. Численные результаты, которые получил автор, были проанализированы с точки зрения времени пребывания в пожаре, глубины фронта огня, а также скорости потери массы и скорости распространения огня. Влияние влаги на распространение пожара сильно зависит скорости ветра.

Воздействие природного пожара на сооружения является одним из ключевых пунктов политики для борьбы с пожарами в лесных районах, считает автор статьи [13]. Так случается, что руководители компаний сталкиваются с предотвращением пожаров в городской среде, но не имеют должной компетенции и ресурсов для предотвращения и устранения данной проблемы. В рассматриваемой публикации автор представляет модель поведения лесных пожаров, которая разработана именно для руководителей, столкнувшихся с подобной ситуацией. В статье представлены также численные результаты моделирования для кустарниковых пожаров и подчеркивается, что разработанная модель является сильным инструментом для рационального распределения ресурсов при возникновении лесного пожара.

В работе [14] описаны масштабы ущерба, нанесенного лесными пожарами в сельских районах, возникшие из-за изменения климата. В данной статье представлено исследование распространения огня в лесу и вблизи находящихся зданий и построек. Авторы рассматривают возможные стратегии для предотвращения распространения огня, а также какие

эффективнее всего использовать строительные материалы для постройки зданий в лесу. В исследовании приведены крупные структурные сооружения, проведено индивидуальное тестирование материалов здания, крыш, вентиляционных отверстий, ограждений. Используя результаты проведенных тестов и исследований, была достигнута уязвимость и эффективность стратегий предотвращения распространения огня. Более подходящими строительными материалами были предложены бетонные блоки, кирпич, брус, деревянный каркас. Кирпич и блоки более долговечны и надежны, но нуждаются в утеплении и нужен мощный фундамент, для бруса характерны быстрота возведения и обремененный фундамент, но данный материал подвержен горению и гниению.

Целью данного исследования является совершенствование знаний об основных физических процессах, которые контролируют возникновение и распространение лесных пожаров. При определенных условиях лесной низовой пожар, распространяющийся через почвенный покров, превращается в верховой пожар, который перемещается через кроны деревьев со значительно скоростью, нежели низовой пожар, следовательно, более опасен для окружающей среды. Исследование проводилось с помощью методов математического моделирования физических процессов. Этот метод основан на численном решении двумерных уравнений Рейнольдса для описания турбулентного потока с учетом диффузионных уравнений химических компонентов и уравнений сохранения энергии для газовой и конденсированной фазы. Для получения дискретных аналогов использовался метод контрольного объема (МКО) Патанкара-Спалдинга [24]. В данной статье [15] проведено исследование – математическое моделирование условий распространения лесных пожаров, которые позволяют получить детальную картину изменения полей скорости, температуры и концентрации компонентов во времени, а также определить влияние различных условий распространения лесных пожаров

С помощью экспериментального моделирования лесных пожаров можно выявить, по какой закономерности распространяется пожар. Метод

численного моделирования на сегодняшний день является актуальным и перспективным для изучения возникновения и распространения лесных пожаров, поскольку он удобен в использовании и менее энергозатратен.

### **1.5. Прогнозирование ЧС с помощью математического моделирования**

Несмотря на все более возрастающую потребность в прогнозировании ЧС, это остается трудной задачей. В первую очередь это связано с тем, что чрезвычайным ситуациям характерны такие свойства как внезапность возникновения, быстрота развития, цепной неопределенный характер развития, часто неполнота и неточность исходных данных. Поэтому часто единственной возможностью для предсказания развития ЧС является математическая модель [16].

Математическая модель ЧС – система уравнения и соотношений, отражающиеся в математической форме, способные воспроизводить или имитировать наиболее важные факторы и особенности реальных опасных явлений, чтобы анализировать их возникновение, развитие и последствия [17]. Вид и количество уравнений напрямую зависит от типа рассматриваемой ЧС. Так, например, модели пожаров основываются на ключевых законах аэродинамики и гидродинамики, определяющих параметры турбулентности, идущих химических процессов, переноса частиц, распространения границ. Разумеется, в рамках модели невозможно учесть все факторы, поэтому прибегают к упрощениям. Например, учитывают направление ветра только вдоль одной из координатных осей, пренебрегают жидкой фазой в воздухе, лес представляется недеформируемой продуваемой средой.

Первая модель распространения пожаров была опубликована в 1946 году В.Л. Фонсом [18]. Она была основана только на уравнении теплового баланса и использовала в качестве коэффициентов данные, полученные при сжигании горючих веществ в аэродинамической трубе.

В отечественной науке первая модель была создана в 1949 году В.Г.

Нестеровым и была основана на экспериментальных исследованиях горимости лесов. Впервые были предложены критерии пожарной опасности [19]. Наиболее крупным ученым в области математического моделирования является А.М. Гришин [8]. Он разработал несколько моделей, использующихся и сегодня. Согласно его моделям, лес при пожаре является пористо-дисперсной реакционноспособной непрерывной средой, неоднородной по составу и структуре. Для получения необходимых данных о лесе (влагосодержание лесного покрова, коэффициенты переноса, аэродинамические характеристики лесных массивов, объемные доли фаз, процесс передачи энергии от фронта пламени к окружающей среде, характеристики химических реакций) были осуществлены многочисленные натуральные, полунатуральные и экспериментальные исследования в лабораториях и был сформирован один из крупнейших банков данных, использующийся до сих пор [8].

По возможному назначению модели делятся на три уровня:

-фундаментальное моделирование;

-тактическое моделирование;

стратегическое моделирование.

Фундаментальное моделирование исследует горение отдельных частиц, слоев из однородных частиц и слоев из разных горючих материалов и основано на процессах тепломассопереноса. В качестве исходных параметров берутся физико-химические свойства веществ (содержание, влажность, теплопроводность, количество и состав выделяющихся при горении веществ) и характеристики среды (скорость и направление ветра, влажность воздуха, турбулентность атмосферы). Решениями для данных моделей являются распределение температур, концентраций веществ, размеры пламени, скорость его распространения. В качестве примера можно привести модели А.М.Гришина [8]. Часто эти модели являются основой для тактического моделирования.

Тактическое моделирование прогнозирует пожар в целом – скорость распространения, контур и площадь горения, интенсивность горения. Также



в данных моделях определяется вид пожара и факторы, приводящие к перемене вида пожара (параметры, при которых низовой пожар переходит в верховой, а тот в свою очередь – в пятнистый). Данные модели разрабатывали Э.В. Конев Е.К. Кисиляхов [20, 21].

Стратегическое моделирование изучает совокупности пожаров – их возникновение, распространение, развитие, а также основные важнейшие их характеристики – скорость, площадь, длину фронта. Эти модели используются руководителями административных единиц, соответствующими органами МЧС и имеют важное практическое значение, поскольку на основании их прогнозов принимаются меры по защите населения и территории в пожароопасный период. В нашей стране этими моделями занимался Г.Н.Коровин [22].

Таким образом, математическое моделирование пожаров имеет в основе труды многих именитых ученых, которые рассматривали данную проблему с разных точек зрения. Имеющиеся модели позволяют решать широкий спектр задач в зависимости от поставленных целей.

### **1.6. Возможности программного обеспечения PHOENICS**

PHOENICS - это надежная и экономичная программа с проверенным опытом, имитирующая сценарии, связанная с потоком жидкости, теплом или массопереносом, химическими реакциями и сжиганием для широкого спектра применений [23].

PHOENICS отличается от других программ благодаря простому использованию и включению инновационных функций, разработанных для того, чтобы помочь пользователю достичь наилучшего моделирования [23]. PHOENICS использует методы CFD (Computational Fluid Dynamics) (например, вычислительная гидродинамика) для прогнозирования:

- Процессов в окружающей среде, их взаимодействие;
- Изменения температуры в зависимости от химического или физического воздействия и проч.

PHOENICS действительно и эффективно используется учеными для интерпретации своих экспериментальных наблюдений; инженерами для проектирования самолетов и других транспортных средств, а также оборудования, которое производит электроэнергию или которое обрабатывает материалы; архитекторами для проектирования зданий; экологическими специалистами для прогнозирования и, если возможно, контроля, воздействия на окружающую среду и опасностей; а также преподавателями и студентами для изучения динамики жидкости, теплопередачи, сжигания и смежных дисциплин.

PHOENICS постоянно продается, используется и разрабатывается с 1981 года. Также используется как «вычислительная машина» специализированных программных пакетов, будь то собственный, такой как FLAIR для моделирования отопления, вентиляции и воздушного движения, или в пакетах других компаний, таких как WINDSIM, для моделирования оборудования, получающего электричества [23].

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ

### 2.1 Физическая постановка задачи

Для описания процессов тепломассопереноса используются общие законы сохранения для многофазной среды. Задана область по координате  $x = 8$  м, по  $y = 1$  м, по  $z = 2$  м, также по каждой координате заданы контрольные объемы 200, 1, 10 соответственно. Температура окружающей среды ( $T=300$  К), температура источника зажигания ( $T=1000$  К), продолжительность распространения пламени ( $t = 90$  с). Под действием ветра очаг низового пожара начинает распространяться по слою ЛГМ. На рисунке 2.1 схематично представлена расчетная область.

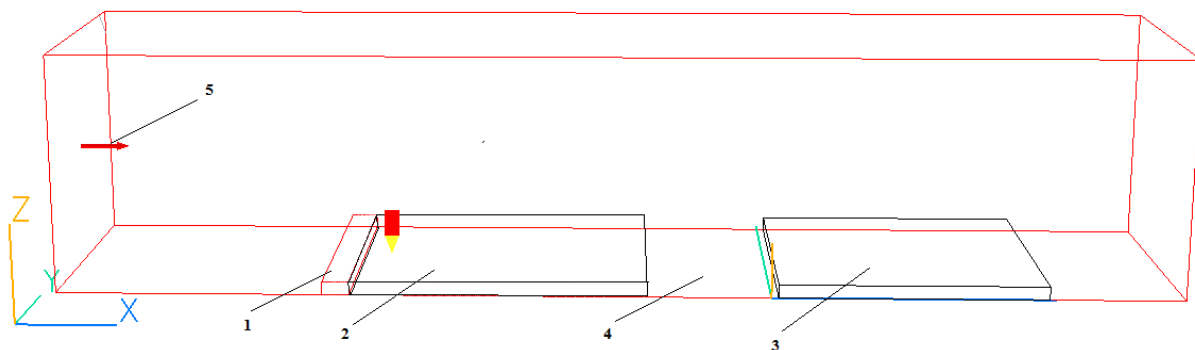


Рисунок 2.1 – Расчетная область с очагом зажигания, где 1 – очаг зажигания, 2,3 – слой ЛГМ, 4 – противопожарный разрыв, 5 – направление ветра

Основные допущения, принятые при выводе системы уравнений начальных и граничных условий.

1. Ветер направлен вдоль оси  $X$ ;
2. Предполагается, что лесной покров является недеформируемой пористой средой, которая влияет только на величину силы сопротивления в уравнении сохранения импульса в газовой фазе;
3. В зоне пожара ЛГМ представляют собой пористо-дисперсную, многофазную, двухтемпературную односкоростную среду, т.к. различаются температура газовой и конденсированной фазы;
4. Учитываются энергетические и физико-химические процессы при лесном пожаре;

5. Поток имеет развитую турбулентную природу, а ламинарным переносом пренебрегают;

6. Плотность газовой фазы не зависит от давления, т.к. скорость течения мала по сравнению со скоростью звука;

7. Перенос энергии осуществляется путем турбулентной конвекции и излучения.

В данном случае разрыв и слой ЛГМ находятся рядом и имеют конечные размеры, но это не является обязательным. В процессе расчетов были рассмотрены различные случаи взаимного расположения или отсутствия одного из этих объектов.

## 2.2 Математическая постановка задачи

Поскольку любое перемещение воздушных потоков в атмосфере носит турбулентный характер, то для их описания используются уравнения Рейнольдса [24].

Сформулированная выше задача сводится к решению системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, каждое из которых может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho u_i \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) = S_\Phi \quad (2.1)$$

Здесь  $\Phi$  – зависимая переменная,  $t$  – время;  $x_i$  – пространственная координата ( $i = 1, 2, 3$ , в дальнейшем  $x_1$  соответствует  $x$ ,  $x_2$  –  $y$ ,  $x_3$  –  $z$ );  $\rho$  – плотность газовой смеси;  $u_i$  – компонента скорости в направлении  $x_i$ ,  $\Gamma_\Phi$  – коэффициент диффузионного обмена,  $S_\Phi$  – источниковый член. Плотность газа рассчитывается из уравнения состояния идеального газа для смеси газов:  $p = \rho RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}$ , где  $p$  – давление газа;  $T$  – абсолютная температура газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $c_\alpha$  – является массовая концентрация  $\alpha$  – компоненты газовой смеси; индекс ( $\alpha = 1, 2, 3$ , где 1 соответствует кислороду, 2 – угарному газу, 3 – всем другим компонентам газовой смеси);  $M_\alpha$  – молекулярным масса;  $\alpha$ - компонента газовой фазы.

Таблица 2.1 – Зависимые переменные и коэффициенты, исходные члены в уравнении

	$\Phi$	$\Gamma_{\Phi}$	$S_{\Phi}$
масса	1	0	$m$
$X_i$ – импульс	$u_i$	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i - \frac{1}{8} A_s C_d \rho u_i  u $
энтальпия	$h$	$\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}$	$m_5 q_5 - A_s h_s (T - T_s) + 4 \varepsilon_1 \sigma (T_3^4 - T^4)$
Масса $\alpha$	$C_{\alpha}$	$\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t}$	$m_{5\alpha}$
Турбулентная кинетическая энергия	$k$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$\rho (P_k + W_k + \varepsilon)$
Скорость диссипации турбулентной кинетической энергии	$\varepsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t}$	$\rho \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{\varepsilon 3} W_k - R_{RNG})$

Уравнения, описывающие скорости пиролиза, испарения влаги, горения конденсированных продуктов пиролиза.

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1 \quad (2.2)$$

$$\rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2 \quad (2.3)$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_3 - \frac{\gamma R_3}{\gamma_c} \quad (2.4)$$

$$\sum \rho_i \varphi_i C_{\rho i} \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + x(CU_R - 4\sigma T^4) + A_s (T - T_s) \quad (2.5)$$

Здесь  $R_1, R_2, R_3, R_{5\alpha}$  – массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза и образования  $\alpha$  – компонентов газодисперсной фазы;  $C_{\rho i}, \rho_i, \varphi_i$  – удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли  $i$ -ой фазы (1 – сухое органическое вещество, 2 – вода, 3 – конденсированные продукты пиролиза;  $T, T_s$  – температура газовой и твердой фаз;  $\rho, c_p$  –

плотность и теплоемкость газовой фазы;  $c_\alpha$  - массовые концентрации ( $\alpha=1$ -кислород, 2 – газообразные летучие горючие продукты пиролиза,);  $p$  - давление;  $U_R$  - плотность энергии излучения;  $\sigma$  - постоянная Стефана–Больцмана;  $M_\alpha$ ,  $M_C$ ,  $M$  - молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси.

При решении вышеизложенной системы уравнений следует учитывать следующие начальные и граничные условия:

$$t=0: \quad T=T_e; \quad T_s = T_e; \quad C_\alpha = C_{\alpha e}; \quad \varphi_\alpha = \varphi_{\alpha e}; \quad (2.6)$$

$$x_1=0; \quad u_1=u(x_3); \quad u_2=u_3=0; \quad T=T_e \quad (2.7)$$

$$x_1 = 0: \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial x_1} = 0; \quad (2.8)$$

$$x_3 = 0; \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_3} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0; \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial x_3} = 0;$$

$$x_3 = h: \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_3} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0; \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial x_3} = 0.$$

Величина температуры в очаге зажигания изменяется в зависимости от времени:

$$T = T_s = \begin{cases} T_e + \frac{t}{t_0}(T_0 + T_e), & t \leq t_0 \\ T_e + \left( T_0 - T_e \exp \left[ -k \left( \frac{t}{t_0} - 1 \right) \right] \right), & t > t_0 \end{cases} \quad (2.9)$$

При описании и решении задачи выделяют температуру конденсированной (твердой)  $T_s$  и газовой  $T$  фаз. К первой фазе относится сухое органическое вещество, влага, конденсированные продукты пиролиза, а также минеральная часть ЛГМ. Твердая фаза представлена главным образом тонкими ветками и хвоей в размере до 6 мм, водой в жидко-капельном состоянии и конденсированными продуктами пиролиза. Поэтому твердая фаза не имеет своей скорости и ее объемной долей, по сравнению с газовой фазой, можно не учитывать в соответствующих уравнениях, т.к. в единице объема растительного покрова находится меньше 0.5 кг

## 2.3 Метод решения

Для численного решения задачи описания процесса тепломассопереноса в заданной области при использовании программного обеспечения PHOENICS [23], в котором используется метод контрольного объема. Метод контрольных объёмов — численный метод интегрирования систем дифференциальных уравнений в частных производных [24]. Основная идея метода контрольного объема легко понятна и поддается прямой физической интерпретации. Расчетную область разбивают на некоторое число непересекающихся контрольных объемов таким образом, что каждая узловая точка содержится в одном контрольном объеме. Дифференциальное уравнение интегрируют по каждому контрольному объему.

В методе контрольного объема и будет искомое решение в виде значений только в узловых точках. Интерполяционные формулы или профили рассматриваются как вспомогательные, необходимые для расчета интегралов. После получения дискретных аналогов предположения о характере профилей можно не учитывать. [24].

Для получения дискретного аналога уравнение (2.1) интегрируем по контрольным объемам и используем расположение узловых точек, представленное на рисунке 2.2. В центре оказывается точка P, окруженная точками E и W. Штрихом показаны границы контрольного объема. Эти границы обозначены буквами e и w.

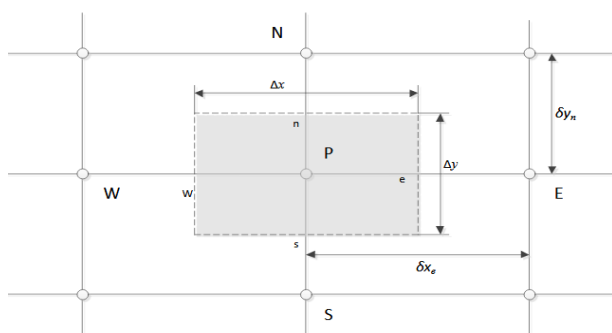


Рисунок 2.2 – Шаблон узловых точек для двумерной задачи

Полезно записать полученное уравнение в следующем виде:

$$a_p T_p = a_e T_e + a_w T_w + a_N T_N + a_S T_S + b, \quad (2.10)$$

$$a_e = D_e A(|P_e|) + [|-F_e; 0|]; \quad (2.11)$$

$$a_w = D_w A(|P_w|) + [|F_w; 0|]; \quad (2.12)$$

$$a_N = D_N A(|P_N|) + [|-F_N; 0|]; \quad (2.13)$$

$$a_S = D_S A(|P_S|) + [|F_S; 0|]; \quad (2.14)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^0 - S_p \Delta x; \quad \Delta x = \Delta x_3; \quad (2.15)$$

$$b = S_C \Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3 + a_p^0 \Phi_p^0, \quad S = S_p \Phi + S_C \quad (2.16)$$

$$a_p^0 = \frac{\rho_p^0 \Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3}{\Delta t} \quad (2.17)$$



### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

#### 3.1 Достоверность исследования

На основании вышеизложенной модели были проведены расчеты параметров горения при низовом лесном пожаре в растительном слое с учетом противопожарных разрывов. Изменяемыми параметрами являлись:

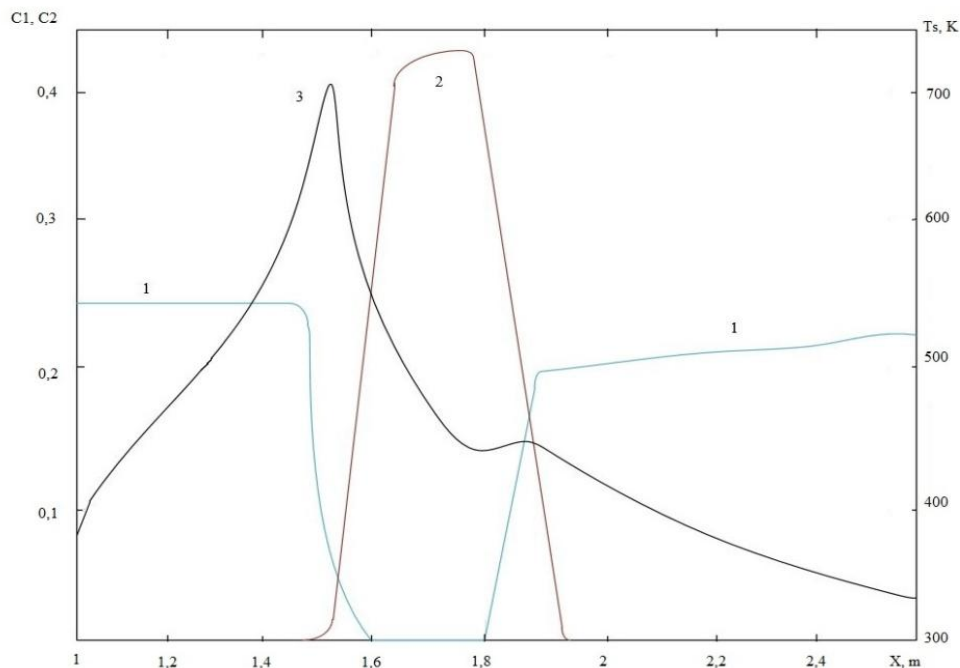
- влагосодержание ЛГМ в хвойном массиве;
- скорость ветра в невозмущенной среде;

Для визуализации [23 полученных результатов и построения графиков используем программу PHOENICS].

Для получения достоверных расчетов важно, чтобы полученные результаты распространения фронта горения при моделировании совпадали с экспериментальными результатами, представленными в статье [1].

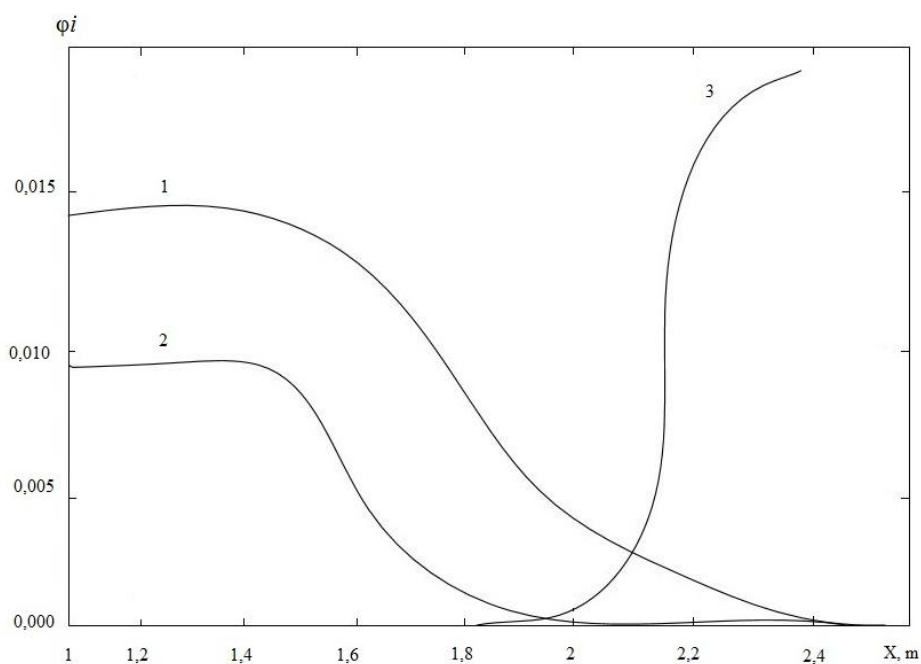
Для достоверности программы в ходе расчетов были получены распределение температуры твердой и газов фаз в процессе распространения пламени, концентрации кислорода, оксида углерода и продуктов пиролиза, а также объемные доли.

На рисунке 3.1 показаны распределения температуры твердой фазы ( $T_s$ ) и массовых долей кислорода ( $C_1$ ) и угарного газа ( $C_2$ ) при скорости ветра 1 м/с при  $t = 40$  с. Нагрев топливного слоя от распространяющегося пламени вызывает испарение воды, пиролиз и сжигание полукокса (при температуре около 700 К). Окись углерода, которая выделяется при пиролизе, участвует в газообразном сгорании, и его массовая доля приближается к нулю. Массовая доля кислорода в зоне пиролиза уменьшается из-за образования угарного газа в этой зоне, а затем она падает до нуля в зоне горения из-за потребления кислорода.



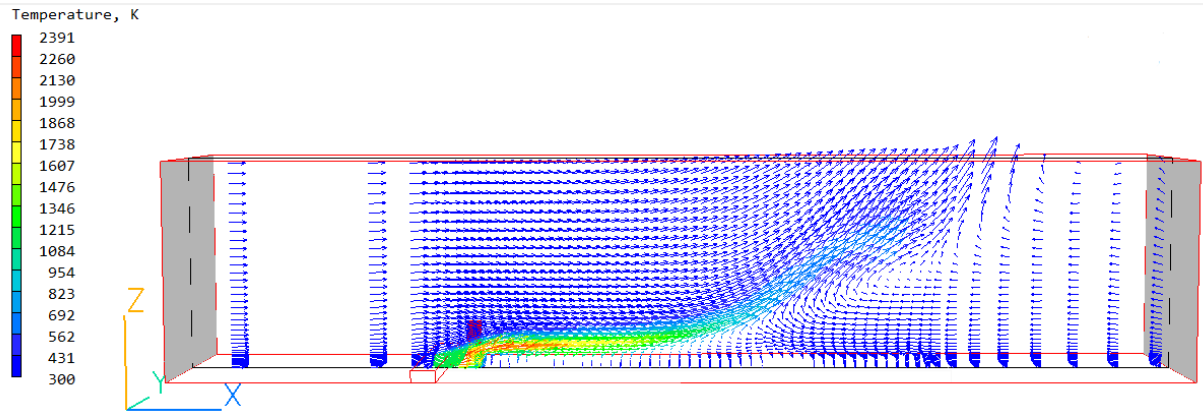
**Рисунок 3.1 – Температура твердой фазы (3) и массовые доли кислорода (1) и оксида углерода (2) при скорости ветра 1 м/с  $t = 40$  с**

Рисунок 3.2 иллюстрирует изменение объемных долей фаз в ЛГМ вблизи очага горения, зависящие от координаты  $X$ . Из анализа кривых следует, что в результате воздействия очага повышенной температуры происходит прогрев ЛГМ, затем испарение влаги, разложение сухого ЛГМ. В результате этого выделяются летучие горючие продукты пиролиза.

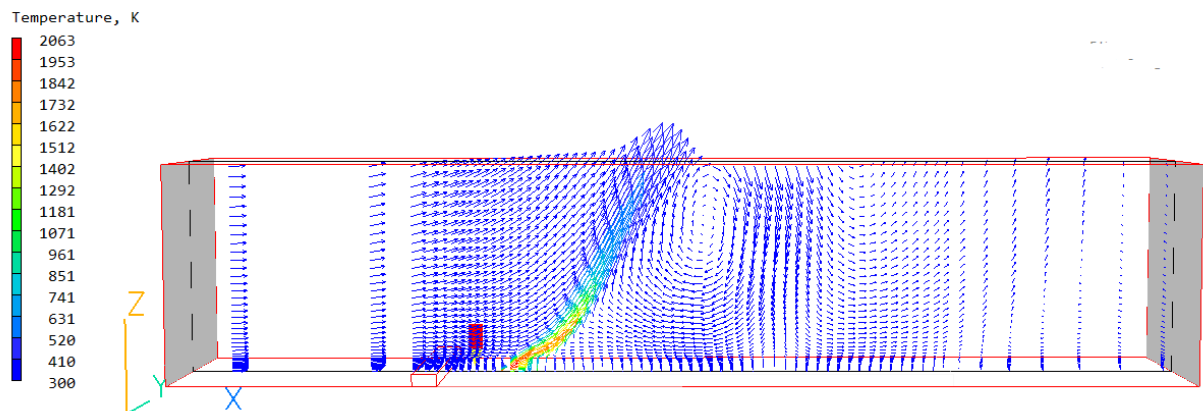


**Рисунок 3.2 – Изменение объемных долей сухого органического вещества (1), воды в жидко-капельном состоянии (2), кокс (3)**

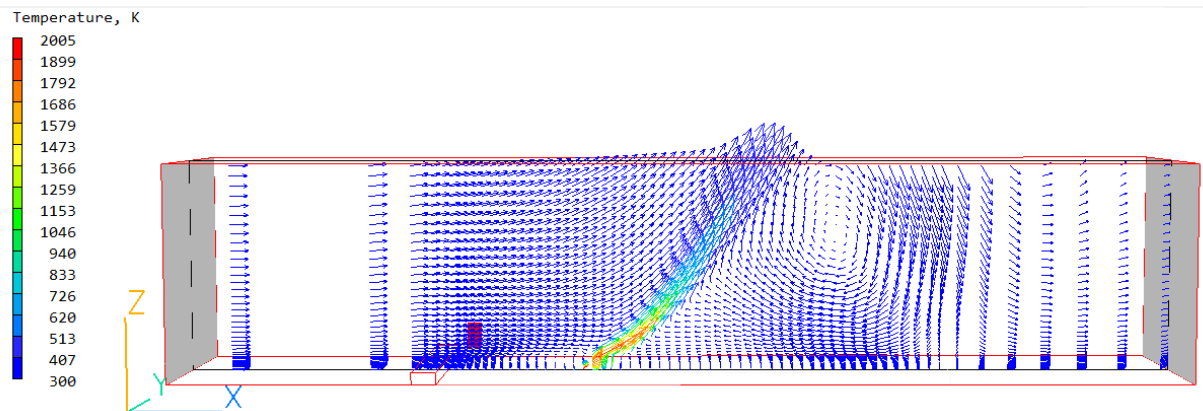
На рисунках 3.3-3.6 показаны распределения температуры при  $t = 10$  с,  $t = 20$  с,  $t = 40$  с,  $t = 70$  с для скоростей ветра 1. При скорости ветра 1 м / с перед сильным плавучим шлейфом образуется большой вихрь по часовой стрелке, который со временем колеблется. Об этих моделях потока также сообщалось в статье [24].



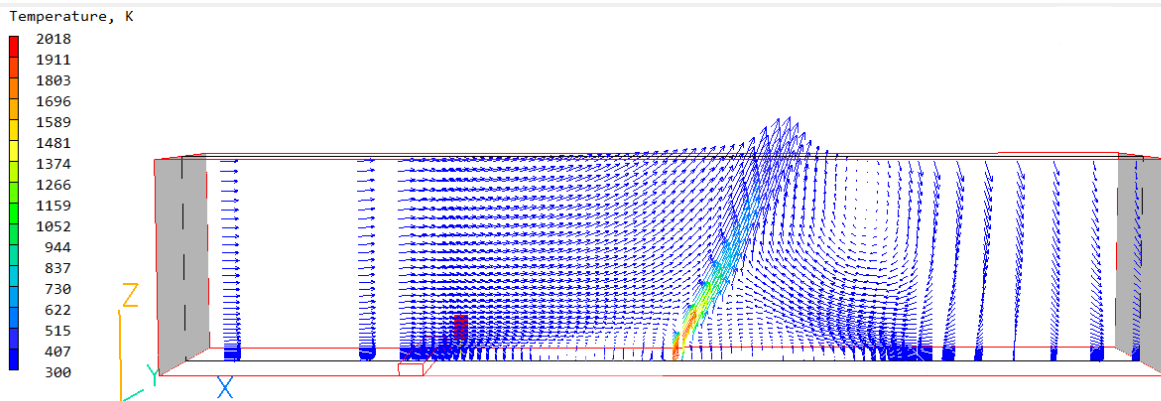
**Рисунок 3.3 – Векторное распределение температуры при скорости ветра 1 м/с при  $t = 10$  с**



**Рисунок 3.4 – Векторное распределение температуры при скорости ветра 1 м/с при  $t = 20$  с**

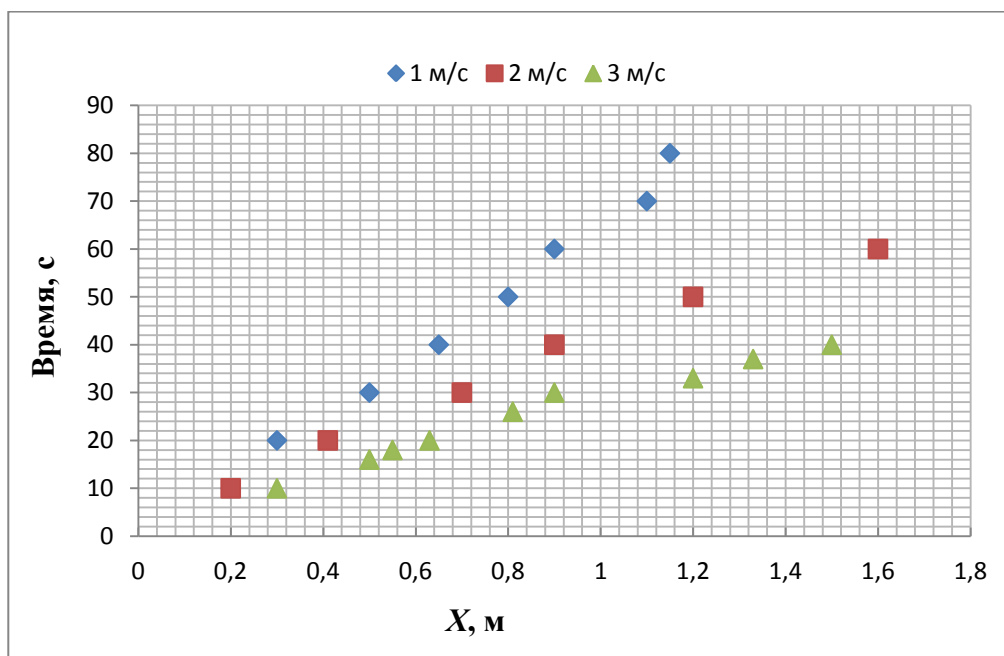


**Рисунок 3.5 – Векторное распределение температуры при скорости ветра 1 м/с при  $t = 40$  с**



**Рисунок 3.6 – Векторное распределение температуры при скорости ветра 1 м/с при  $t = 70$  с**

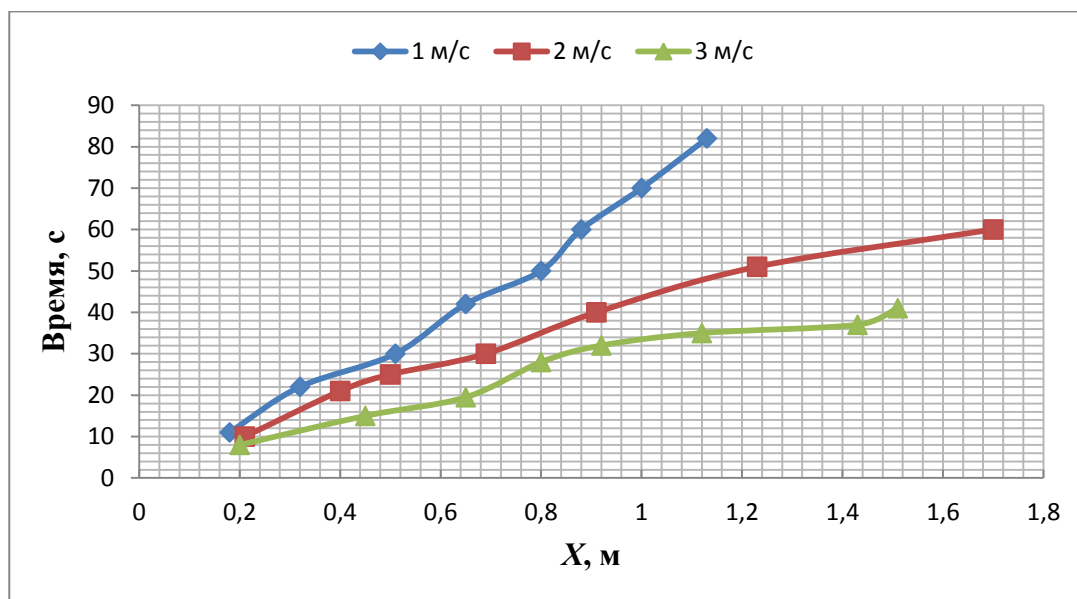
На рисунке 3.7 приведены результаты эксперимента, а на рисунке 3.8 представлены результаты модели распространения горения.



**Рисунок 3.7 – График экспериментального распространения пиролиза для скоростей ветра 1 м/с, 2 м/с, 3 м/с**

В этом случае слой имеют следующие входные параметры: высота 5 см, объемная плотность горючего материала  $10 \text{ кг/м}^3$ , начальное содержание влаги 10%. Для простоты была применена двумерная формулировка, игнорирующая поток газа и перенос массы и энергии в направлении  $y$ . Источник воспламенения был расположен в начале топливного слоя (на расстоянии 1 м от источника), и воспламенение имитировалось путем введения объемного источника тепла длиной 0,1 м по всей ширине и высоте топливного слоя (его температура линейно увеличивалась от 700К до 1000К

в течение первых 8 секунд). Были рассмотрены три скорости ветра 1, 2 и 3 м/с.



**Рисунок 3.8 – График распространения пиролиза при моделировании для скоростей ветра 1 м/с, 2 м/с, 3 м/с**

Результаты показывают, что скорость распространения пожара резко возрастает со скоростью ветра. Скорость распространения уменьшается при содержании влаги в лесном массиве. Как видно из графиков результаты с экспериментом близки, что свидетельствует о достоверности модели. Погрешность полученных измерений составляет 5%.

### 3.2 Анализ результатов исследования

В ходе исследования были проведены расчеты для получения изолиний температуры, концентрации кислорода, углекислого газа, концентрации продуктов пиролиза и объемных долей.

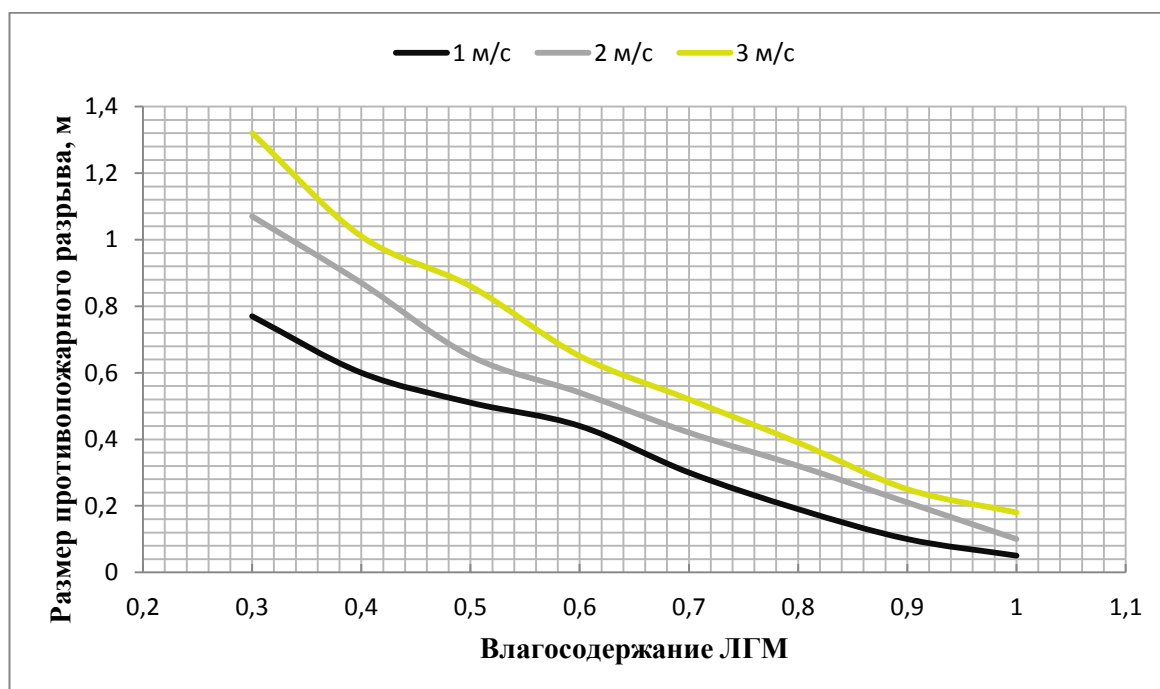
В таблице 3.1 представлены результаты расчета безопасного размера противопожарного разрыва в зависимости от скорости ветра и влагосодержания. Рисунок 3.9 иллюстрирует эти зависимости.

*Таблица 3.1 – Результаты расчетов размера противопожарного разрыва в зависимости от влагосодержания лиственных пород и скорости ветра*

	Влагосодержание лесного массива							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	Скорость ветра 1 м/с							
Размер	0,77	0,6	0,51	0,44	0,3	0,19	0,11	0,08

противопожарного разрыва, м								
Скорость ветра 2 м/с								
Размер противопожарного разрыва, м	1,07	0,87	0,65	0,54	0,42	0,32	0,26	0,1
Скорость ветра 3 м/с								
Размер противопожарного разрыва, м	1,32	1,01	0,86	0,65	0,52	0,39	0,25	0,18

Расчеты проводились со следующими параметрами: запас ЛГМ в хвойном массиве  $11,75 \text{ кг/м}^3$ , значение влагосодержания ЛГМ изменялось в диапазоне от 0,3 до 1.



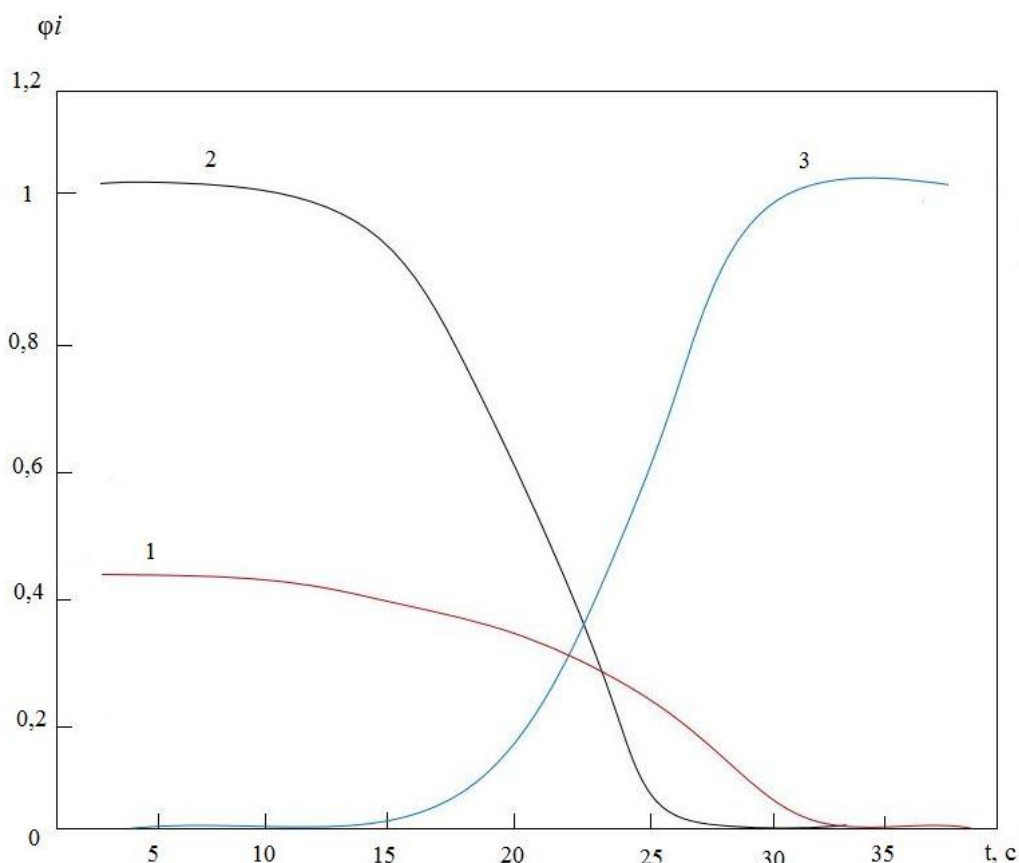
**Рисунок 3.9 – Зависимость размеров противопожарного разрыва от его влагосодержания при различных скоростях ветра**

Видно, что зависимость размеров противопожарного разрыва имеет вид убывающей функции. С увеличением влагосодержания хвойного массива величина размера разрыва резко уменьшается и стремительно приближается к нулю. Также, согласно данным из таблицы 3.1 и полученному графику 3.9 заметно, что уменьшение размеров разрыва закономерно вытекает из того факта, что более влажные ЛГМ хуже загораются. Из этого следует, что для распространения пожара через слой влажной растительности требуется больше энергии для испарения избытка воды, а также уменьшение массовой доли кислорода, возникающее в результате разбавления водяным

паром перед фронтом огня, способствует тушению пламени. Увеличение влагосодержания тоже способствует уменьшению глубины огня в ЛГМ.

Следующим этапом по результатам численного расчета было получение распределения температур для твердой фазы, концентраций кислорода и продуктов пиролиза, объемных долей сухого органического вещества, воды в жидко-капельном состоянии и коксика.

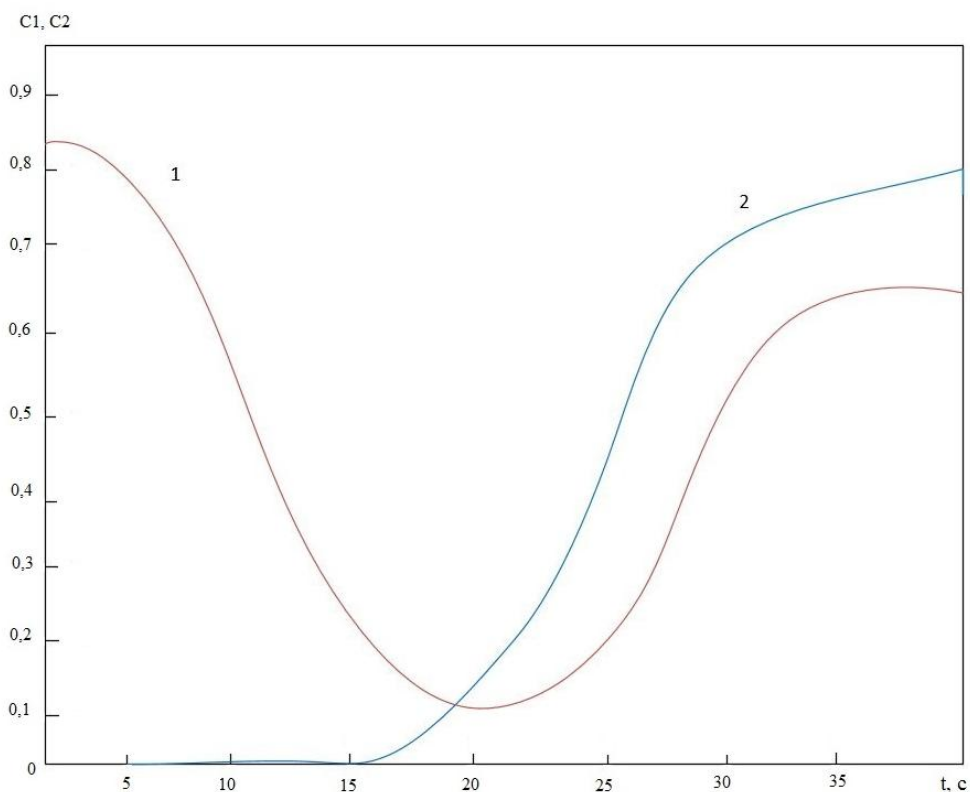
Рисунок 3.10 иллюстрирует изменение объемных долей фаз вблизи очага горения. При воздействии очага повышенной температуры в его окрестности происходит прогрев полога леса, испарение влаги, разложение сухого ЛГМ. В результате этого в пологе леса выделяются летучие горючие продукты пиролиза



**Рисунок 3.10 – Распределение объемных долей в процессе горения, где 1 – сухого органического вещества, 2 – воды в жидко-капельном состоянии, 3 – кокса**

На рисунках 3.11-3.12 представлены изменения с течением времени температуры твердой фазы, массовых концентраций кислорода и горючих продуктов пиролиза вблизи очага горения. Из анализа кривых следует, что, концентрация кислорода падает почти до нуля перед фронтом пожара, так

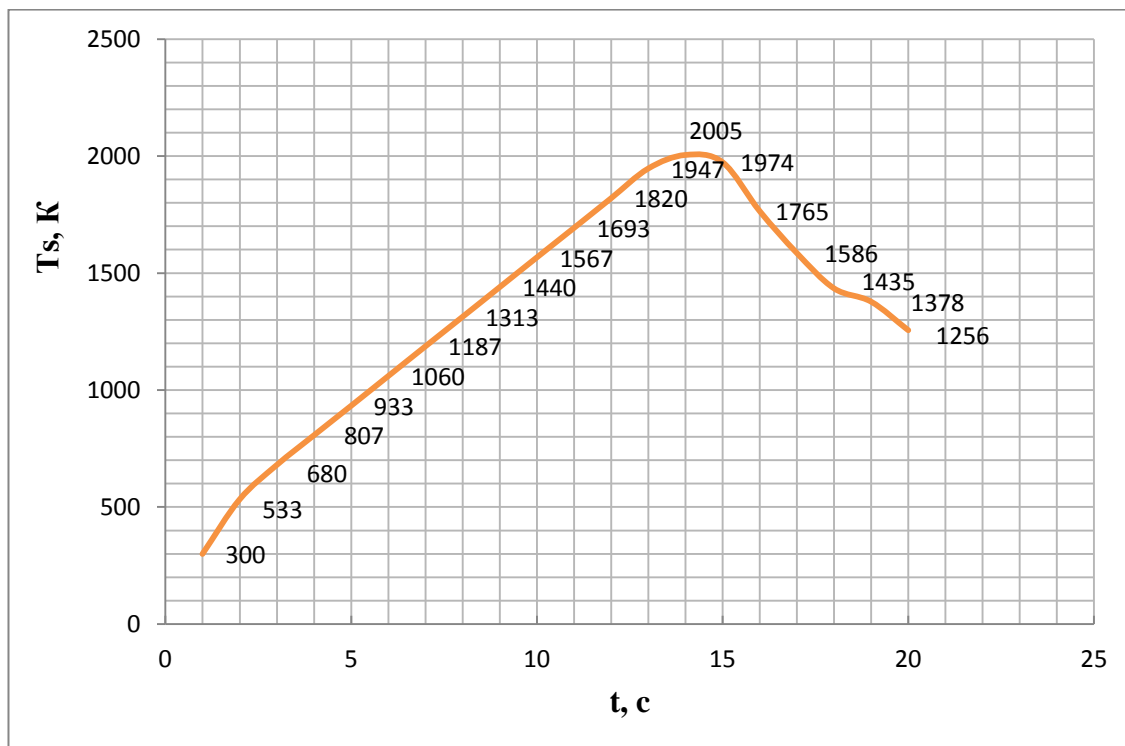
как он расходуется при горении продуктов пиролиза, концентрация которых достигает максимума перед достижением максимальной температуры.



**Рисунок 3.11 – Распределение концентраций кислорода 1 –  $C_1$  и продуктов пиролиза оксида углерода 2 –  $C_2$**

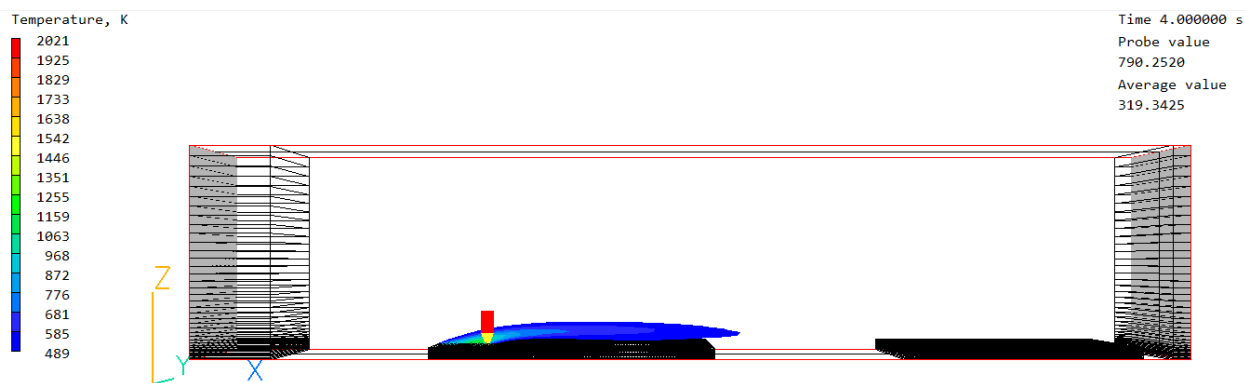
На основе полученных данных следует, что с течением времени возрастает до максимума и постепенно убывает температура твердой фазы (рисунок 3.11), происходит уменьшение массовой концентрации кислорода и изменение количества горючих продуктов пиролиза и объемных долей фаз вблизи очага горения. В результате воздействия очага повышенной температуры в его окрестности происходит прогрев ЛГМ.



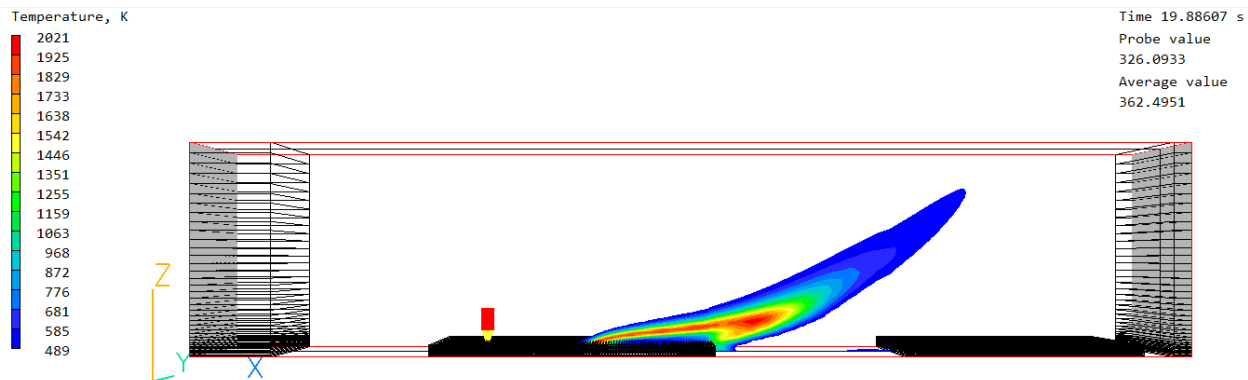


**Рисунок 3.12 – График распространения температуры твердой фазы ( $T_s$ ) на ЛГМ**

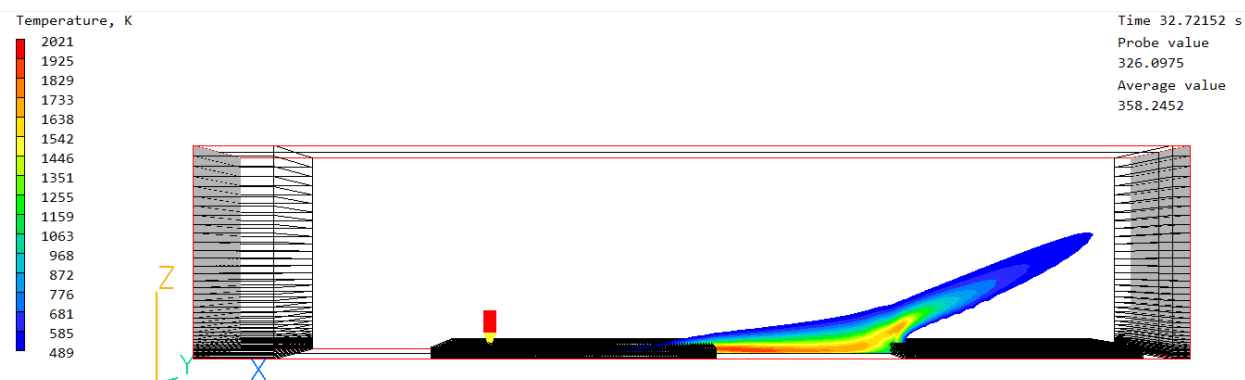
Благодаря написанному коду в ПО PHOENICS на рисунках 3.12-3.15 можно наблюдать распространение пламени по ЛГМ при скорости ветра 3 м/с и влагосодержанию 0,3, где противопожарный разрыв имеет критический размер, при котором пламя способно преодолеть разрыв и распространяться на соседний участок ЛГМ за 35 секунд. Данный параметр имеет значение 1,20 м.



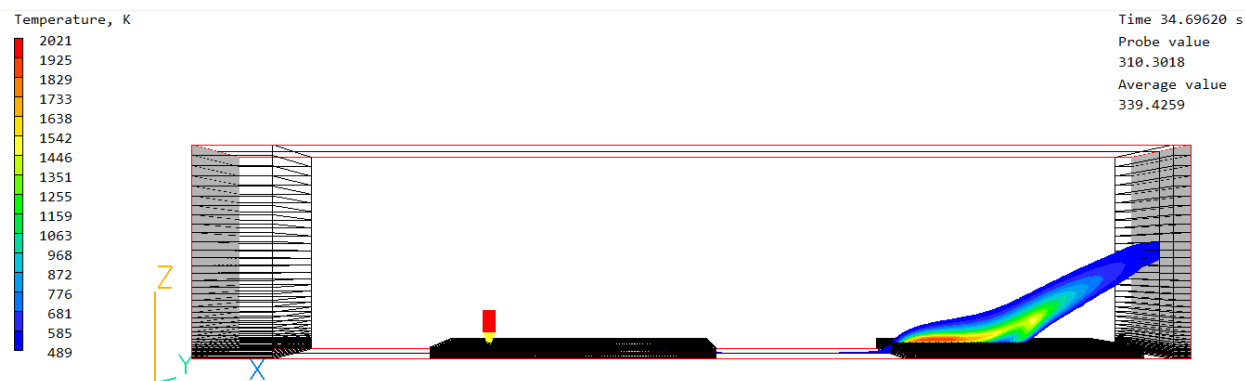
**Рисунок 3.12 – Распределение температуры при скорости ветра 3 м/с при  $t = 4$  с в ПО PHOENICS**



**Рисунок 3.13 – Распределение температуры при скорости ветра 3 м/с при  $t = 20$  с в ПО PHOENICS**



**Рисунок 3.14 – Распределение температуры при скорости ветра 3 м/с при  $t = 33$  с в ПО PHOENICS**



**Рисунок 3.15 – Распределение температуры при скорости ветра 3 м/с при  $t = 35$  с в ПО PHOENICS**

При анализе данных было получены распределения температуры, концентраций, объемных долей, значения которых дают материал для более глубокого понимания протекающих термических и физико-химических процессов на первоначальном этапе зажигания ЛГМ в результате воздействия очага возгорания. Помимо этого из рисунка 3.9 видно, что

по мере увеличения влагосодержания ЛГМ размер противопожарного разрыва уменьшается. Полученные расчеты также показывают влияние скорости ветра на распространение пламени и влагосодержание на размер противопожарного разрыва.

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

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

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

Целью данной работы является с помощью метода математического моделирования определить размеры противопожарных разрывов при низовых лесных пожарах и исследовать зависимость их размеров от скорости ветра и влагосодержания ЛГМ.

На рынке представлено большое количество программ, позволяющих решить различные задачи, связанные с моделированием. В числе прочих стоит отметить PHOENICS как представителя программ для решения широкого спектра задач, связанных с моделированием потока жидкости и газа. Среди таких программ можно отметить следующие: ANSYS, Fluent, STAR-CD, FASTEST-3, Sigma6, Gas Dynamics Tool и другие. Однако не все программы позволяют оперативно определить безопасные расстояния. Как правило большинство программ при численном решении требуют больших временных затрат и высокой производительности ЭВМ.

В ходе определения целей работы были определены следующие задачи:

1. Определить потенциальных потребителей результатов исследования;
2. Провести анализ конкурентных технических решений
3. Выполнение SWOT-анализа;
4. Планирование научно-исследовательских работ;
5. Бюджет научно-технического исследования (НТИ);
6. Оценка социальной эффективности исследования.

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

Учитывая область исследований, которые направлены на обеспечение

пожарной и экологической безопасности, можно выделить следующие сегменты рынка (таблица 4.1):

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

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка

	Параметры программы					
	Тематическая библиотека активного режима		Оперативность		Возможность работы с исходными текстами	
ВУЗ						
НИИ						
Лесная охрана						
МЧС						

ПО PHOENICS
  ANSYS
  MATLAB

Исходя из анализа результатов проведенного сегментирования, приложение занимает более выгодное положение для потенциальных покупателей, и оставляет возможным его ориентирование и доработку на конкретного потребителя по сравнению с другими программными обеспечениями.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения проводится с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 4.2.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и

ресурсосбережения подбирались, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Данная разработка сравнивается с альтернативными программными продуктами подобного класса: программа ANSYS ( $K_1$ ) и MATLAB ( $K_2$ ).

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>1</sub>	К <sub>2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
2. Удобство интерфейса	0,1	5	4	2	0,5	0,4	0,2
3. Выполняемые задачи	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
4. Функциональные возможности (встроенные модули)	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
5. Визуальное представление результатов	0,1	5	3	2	0,5	0,3	0,2
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,2	5	5	4	1	1	0,8
2. Цена	0,1	4	2	2	0,4	0,2	0,2
3. Уровень проникновения на рынок	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
4. Послепродажное обслуживание	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>43</b>	<b>33</b>	<b>28</b>	<b>4,8</b>	<b>3,9</b>	<b>3,2</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i * B_i, \quad (4.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

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

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Итогом анализа является, что программа, используемая в дипломной работе, эффективней, чем программы конкурентов. Конкурентное преимущество в том, что в программном обеспечении «PHOENICS»: моделируются графики и результат представлен наглядно; данная программа

считает все необходимые уравнения автоматически; проста в использовании; приемлемая цена.

### 4.1.3 SWOT-анализ

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

Он проводится в несколько этапов. На первом этапе описываются сильные слабые стороны проекта, выявляются возможности и угрозы при его реализации, которые проявились или могут появиться в его внешней среде [25].

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должно быть направлено на выявление степени необходимости проведения стратегических изменений (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

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

В рамках третьего этапа составляем итоговую матрицу SWOT-анализа научно-исследовательского проекта (таблица 4.4)

Таблица 4.4 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>С1. Отсутствие финансовых затрат;</p> <p>С2. Высокая скорость работы;</p> <p>С3. Возможность работы с исходными данными программы, в том числе с кодом программы;</p> <p>С4. Доступность в использовании.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>Сл1. Отсутствие квалифицированного персонала;</p> <p>Сл2. Ограниченная область применения;</p> <p>Сл3. Медленный процесс вывода на рынок новой технологии.</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1. Программа позволяет решать одномерные, двумерные и трёхмерные задачи как в области пожарной, так и в области экологической безопасности;</p> <p>В2. Использование для заблаговременного прогнозирования ситуации;</p> <p>В3. Возможно использование в научных, образовательных и прикладных целях.</p>	<p>В3С2С1; В1С2С4;</p> <p>Высокая скорость работы программы и низкая стоимость позволяют использовать программу как в научных, так и в прикладных целях.</p>	<p>В1Сл2Сл3; В3Сл3;</p> <p>Ограниченная область применения программы позволяет более глубоко проработать тематику и выйти в лидеры на рынке программ для решения конкретной задачи</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>У1. создание более совершенный программ – быстрых и точных;</p> <p>У2. Без глубоких знаний математики и</p>	<p>У3С2</p> <p>пользователи без основательных знаний математики, программирования и при отсутствии обучения не</p>	<p>У1Сл2Сл3; У3Сл2.</p> <p>Наличие программ с одинаковым и более широким функционалом может привести к потере части потребителей.</p>



<p>программирования отсутствует возможность решения сложных задач и построение адекватных моделей УЗ. без финансирования становится невозможным приобретение программы.</p>	<p>имеют возможности использовать все возможности данной программы и решать задачи повышенной сложности.</p>	<p>Необходимо усиливать преимущества и устранять недостатки.</p>
---	--	--

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

## **4.2 Планирование научно-исследовательских работ**

### **4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования**

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей приведен в таблице 4.5.

*Таблица 4.5 –Перечень этапов, работ и распределение исполнителей*

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель, студент
	2	Выдача задания для проекта	Научный руководитель
Выбор направления исследования	3	Постановка задачи	Научный руководитель, студент
	4	Поиск и изучение материалов по теме	Студент
	5	Календарное планирование работ	Научный руководитель, студент
Теоретические исследования	6	Подбор и изучение литературы по теме	Студент
	7	Поиск нормативных документов	Студент
	8	Изучение компьютерной программы	Студент
Практические исследования	9	Моделирование распространения низовых пожаров	Студент
	10	Проведение расчетов по теме	Студент
	11	Оформление расчетов в виде графиков	Студент
Обобщение и оценка результатов	12	Анализ полученных результатов	Научный руководитель, студент
	13	Вывод	Студент

По результатам таблицы 4.5 можно сделать вывод, что основная структура научного исследования выполнена студентом.

#### 4.2.2 Разработка графика проведения научного исследования

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (4.2)$$

Где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;  $T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;  $k_{\text{кал}}$  –

коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (4.3)$$

Где  $T_{\text{кал}}$  – кал–кол-во календарных дней в году;  $T_{\text{вых}}$  – кол-во выходных дней в году;  $T_{\text{пр}}$  – кол-во праздничных дней в году.

Согласно производственному и налоговому календарю на 2019 год для 6-дневной рабочей недели, количество календарных 365 дней, кол-во рабочих дней составляет 299 дней, кол-во выходных и праздничных дней – 66, таким образом:  $k_{\text{кал}}=1,22$ .

Все рассчитанные значения отображены в таблице 4.6. После заполнения таблицы 4.6 строим календарный план-график (таблица 4.7). График строится для максимального по длительности исполнения работ, в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам за период времени написания диплома (10 дней). При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 4.6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнители $T_{ci}$	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			
Составление и утверждение темы проекта	2	4	2,8	Научный руководитель, студент	2	3
Выдача задания для проекта	1	2	1,4	Научный руководитель	1	1
Постановка задачи	1	3	1,8	Научный руководитель, студент	1	1
Поиск и изучение материалов по теме	5	8	6,2	Студент	6	7
Календарное планирование работ	1	2	1,4	Научный руководитель, студент	3	4
Подбор и изучение литературы по теме	7	12	9	Студент	9	11
Поиск нормативных документов	5	8	6,2	Студент	6	7
Изучение компьютерной программы	14	20	16,4	Студент	16	20
Моделирование распространения низовых пожаров	14	21	16,8	Студент	17	21
Проведение расчетов по теме	2	4	2,8	Студент	3	4
Оформление расчетов в виде графиков	3	5	3,8	Студент	4	5
Анализ полученных результатов	5	8	6,2	Научный руководитель, студент	3	4
Вывод	2	4	2,8	Студент	3	4

Таблица 4.7 – Календарный план-график по теме

№ ра бо т	Вид работ	Исполнители	$T_{ki}$ , кал · дн.	Продолжительность работ										
				март			апрель			май			июнь	
				10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	
1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель, студент	3	■										
2	Выдача задания для проекта	Научный руководитель	2	■										
3	Постановка задачи	Научный руководитель, студент	2	■										
4	Поиск и изучение материалов по теме	Студент	9		■									
5	Календарное планирование работ	Научный руководитель, студент	4			■								
6	Подбор и изучение литературы по теме	Студент	9			■								
7	Поиск нормативных документов	Студент	13				■							
8	Изучение компьютерной программы	Студент	24					■						
9	Моделирование распространения низовых пожаров	Студент	25							■				
10	Проведение расчетов по теме	Студент	4										■	
11	Оформление расчетов в виде графиков	Студент	6										■	
12	Анализ полученных результатов	Научный руководитель, студент	4										■	
13	Вывод	Студент	4										■	

■ – студент      ■ – научный руководитель

### 4.2.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ необходимо обеспечить полное и верное отражение различных видов расходов, связанных с его выполнением.

### 4.2.4 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi} \quad (4.4)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, используемых для научного исследования;  $N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при научном исследовании (шт., кг, м, м<sup>2</sup>);  $C_i$  – 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. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов.

Таблица 4.8 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб	Затраты на материалы, руб.
Бумага	лист	100	1	100
Распечатанные материалы	лист	100	3	300
Интернет	М/бит	3	350	1050
Канцелярские принадлежности	набор	1	200	200
<b>Итого:</b>				1650

### 4.2.5. Основная заработная плата исполнительной темы

Данная статья включает расчет оплаты труда научному руководителю и студенту, а также ежемесячно выплачиваемой премии в размере 12-20% от оклада. Согласно приказу ректора ТПУ ежемесячный оклад для профессора со степенью доктора наук составляет 47104 рублей без районного коэффициента ( $PK=1.3$ ). Таким образом, заработная плата

рассчитывается по формуле:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (4.5)$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{м} \cdot M}{F_{д}} \quad (4.6)$$

где  $Z_{м}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя);  $F_{д}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 4.9 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52	52
-выходные дни	13	13
-праздничные дни		
Потери рабочего времени	48	24
-отпуск	-	-
-невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	252	276

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{м} = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_{д}) \cdot k_{р} \quad (4.7)$$

где  $Z_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{тс}$ );  $k_{д}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;  $k_{р}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска). Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.10

Таблица 4.10 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	разряд	$k_T$	$Z_{тс}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_{р}$ , раб.дн	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	ДН	–	47104	0,3	0,2	1,3	95527	4359,4	20	91852,8
Студент	–	–	1800	–	–	1,3	2340	97,5	54	2340
<b>Итого</b>										94192,8

#### 4.2.6 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (4.8)$$

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

$$Z_{\text{допР}} = 91852,8 \cdot 0,12 = 11\,022,3 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{допС}} = 2340 \cdot 0,12 = 280,8 \text{ руб.}$$

#### 4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (4.9)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2019 года водится пониженная ставка – 28 % [26].

Таблица 4.11 – Отчисление в внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель	91852,8	11022,3
Студент	2340	280,8
коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды	28 % = 0,28	
Итого	28805	734

#### 4.2.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат НИР является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве



нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Таблица 4.12 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Доля затрат, %
Материальные затраты НТИ	1650	1,23
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	94192,8	70,2
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	11303,1	8,43
Отчисления во внебюджетные фонды	29539	21,32
Бюджет затрат НТИ	134085	100

Итого, общий бюджет затрат составляет 134085 рублей. Основную его долю составили затраты по основной з/п (~70%) и отчисления во внебюджетные фонды (~21%). Наименьшую долю затрат составили материальные затраты НТИ (~1%)

### 4.3 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

#### 4.3.1 Оценка социальной эффективности исследования

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населений, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты. В таблице 4.13 приводится оценка социальной эффективности проекта приложения «PHOENICS» для построения модели возникновения и распространения лесных низовых пожаров.

Таблица 4.13 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Дорогостоящий эксперимент по моделированию лесных пожаров.	Низкая стоимость приложения по сравнению с затратами на эксперимент.
Невозможность проведения	Получение модели по средствам

<p>эксперимента в силу большого риска и невозможности получения модели на практике, особенно актуально для верховых лесных пожаров.</p>	<p>компьютера без риска и опасности для здоровья людей и окружающей среды.</p>
<p>Большие затраты времени на постановку эксперимента. Сложная, а порой и невозможная постановка эксперимента</p>	<p>Существенная экономия времени, наглядность результатов моделирования.</p>
<p>Высокие затраты на реализацию эксперимента.</p>	<p>Экономия средств при создании модели с помощью «PHOENICS».</p>

## **5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Целью данной работы является с помощью метода математического моделирования определить размеры противопожарных разрывов при низовых лесных пожарах и исследовать зависимость их размеров от скорости ветра и влагосодержания ЛГМ.

Основной целью данного раздела является рассмотрение оптимальных норм для улучшения условий труда, обеспечения производственной безопасности человека, повышения его производительности, сохранения работоспособности в процессе деятельности, а также охраны окружающей среды.

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

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

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

Право работников на труд в безопасных условиях, то есть отвечающим требованиям охраны труда, закреплено в статье 219 Трудового кодекса РФ [27].

Каждый работник имеет право:

- на рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- быть застрахованным в системе обязательного социального страхования от несчастных случаев;
- получать достоверную информацию от работодателя об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения

здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;

- отказаться от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;

- получить средства индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;

- направить запрос о проведении проверки условий и охраны труда на его рабочем месте;

- лично или через своих представителей участвовать в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;

- на внеочередной медицинский осмотр за счет работодателя в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра (обследования).

## 2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Рабочее место – это зона, оснащенная необходимыми техническими средствами, в которой совершается деятельность. Главная цель организации рабочего места – обеспечить высококачественное и эффективное выполнение работ с соблюдением установленных сроков и при полноценном использовании закрепленного за работником оборудования. Для ее достижения к рабочему месту предъявляются требования организационного, технического, эргономического, санитарного, гигиенического и экономического характера [28].

Выполняя планировку рабочего места необходимо учитывать следующее:

- 1) Рекомендуемый проход слева, справа и спереди от стола 500 мм.

Слева от стола допускается проход 300 мм;

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

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

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

5) Стул не может располагаться непосредственно на границе площади рабочего места. Рекомендованное расстояние от спинки стула до границы

должно быть не менее 300 мм [28].

## 5.2 Производственная безопасность

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

Опасные и вредные факторы, которые постоянно или периодически действуют на человека за работой на ПК [29], представлены в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 «Санитарные правила и нормы. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»
2. Превышение уровня шума	-	+	+	
3. Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание	-	+	+	

6. Напряженность, монотонность трудового процесса	+	+	+	Р 2.2.2006–05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.
---	---	---	---	---

### 5.2.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровней их воздействия

1. На рабочем месте пользователей должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата. На работах, производимых сидя и не требующих физического напряжения, температура воздуха должна быть в теплый период года 22–25°C, в холодный период года 21–24°C, относительная влажность воздуха 40–60%, скорость движения воздуха 0,1–0,2 м/с[30].

Таблица 5.2 – Допустимые значения микроклимата в рабочей зоне [30]

Период года	Категория работ	Температура, °С				Относительная влажность, %	Скорость движения, м/с
		Верхняя граница		Нижняя граница			
		на рабочих местах					
		постоянных	непостоянных	постоянных	непостоянных		
Холодный	Легкая Ia	25	26	21	18	75	не более 0,1
	Легкая Ib	24	25	20	17	75	не более 0,2
Теплый	Легкая Ia	28	30	22	20	55 (при 28°C)	0,1-0,2
Теплый	Легкая Ib	28	30	21	19	60 (при 27°C)	0,1-0,3

Интенсивность теплового излучения от нагретых поверхностей, осветительных приборов не должна превышать 35 Вт/м<sup>2</sup>. Чистота воздушной среды достигается удалением загрязненного, нагретого или ионизированного воздуха из рабочего помещения с подачей свежего воздуха. Для поддержания нормального микроклимата необходим достаточный объем вентиляции, для чего в помещениях с работающими компьютерами

предусматривается кондиционирование воздуха, осуществляющее поддержание постоянных параметров микроклимата независимо от внешних условий. Параметры микроклимата поддерживаются в холодное время года за счет систем водяного отопления с нагревом воды до 100°C, а в теплое время года – за счет кондиционирования. Для повышения влажности воздуха в помещениях следует применять увлажнители воздуха [31].

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

При выполнении основной работы на мониторах и ПЭВМ, где работают инженерно-технические работники, уровень шума не должен превышать 60 дБА, в помещениях операторов ЭВМ (без дисплеев) – 65 дБА, на рабочих местах в помещениях, где размещаются шумные агрегаты вычислительных машин – 75 дБА [32].

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

Меры защиты от шума:

а) подбор рабочего оборудования, обладающего меньшими шумовыми характеристиками;



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

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

г) проведение производственного контроля виброакустических факторов;

д) ежегодное проведение медицинских осмотров для лиц, подвергающихся шуму выше 80 дБ [33].

3. Создание оптимальной световой среды занимает важное место в комплексе мероприятий по охране труда и оздоровлению условий труда при работе с ЭВМ и компьютерной техникой. Помещения, оснащенные ЭВМ и компьютерной техникой должны иметь как естественное, так и искусственное освещение. В таких помещениях используется естественное боковое одностороннее освещение в дневное время, в вечернее время используется искусственное общее равномерное освещение. Нормированный уровень освещенности для работы с компьютерами составляет 400 Лк, а КЕО=4% [34].

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

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

недостаточно, устраивают совместное освещение.

4. Дополнительное искусственное освещение создает хорошую видимость информации на экране монитора, текста на бумаге и других материалов для работы. При этом в поле зрения работающих обеспечиваются оптимальные яркости окружающих поверхностей, исключена или предельно ограничена отраженная блеклость от экрана в результате отражения светового потока от источников света и светильников. При периметральном расположении компьютеров светильники располагаются локализовано над рабочим местом ближе к переднему краю, обращенному к пользователю. В качестве источников искусственного освещения используются люминесцентные лампы дневного света мощностью 65-80 Вт, коэффициент пульсации не должен превышать 5%. Существуют специальные люминесцентные лампы, имитирующие полный спектр естественного солнечного света. Нельзя применять светильники без рассеивателей и экранирующих решеток [34].

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

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает предельно допустимые напряжения и токи, протекающие через тело человека при нормальном режиме работы электроустановок производственного и бытового назначения постоянного и переменного тока частотой 50 и 400 Гц. Для переменного тока 50 Гц допустимое значение напряжения прикосновения составляет 2 В, а силы тока –0,3 мА, для тока частотой 400 Гц –соответственно 2 В и 0,4 мА; для постоянного тока –8 В и 1,0 мА (эти данные приведены для продолжительности воздействия не более 10 мин в сутки). На рабочем месте пользователя находятся системный блок, клавиатура и монитор. При включении монитора на электронно-лучевой трубке формируется большое

напряжение в несколько киловольт. Поэтому запрещается работать на компьютере во влажной одежде и влажными руками, прикасаться к тыльной стороне дисплея, вытирать пыль с компьютера при его включенном состоянии. Перед началом работы необходимо убедиться в отсутствии висящих под столом или свешивающихся со стола проводов электропитания, в целостности провода электропитания и вилки [35].

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

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

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

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

Данные перерывы в работе должны включаться в общее время

трудовой деятельности, а также увеличиваться на 30 %, если сотрудник работает за компьютером в ночное время суток. Совокупная продолжительность перерывов: при рабочем дне продолжительностью 8 часов –от 50 минут до 1,5 часа; при 12-часовом –от 80 до 140 минут[31].

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

### **5.3 Экологическая безопасность**

Работы за ПЭВМ, к которым относится математическое моделирование, напрямую не влияют на окружающую среду. Однако отслужившая электроника, батареи при неправильной утилизации являются опасными и требуют особого подхода.

Каждый компьютер содержит более 30 компонентов, многие из них высокотоксичные. Их демонтаж относится к производству по переработке вторичного сырья, которое сейчас активно развивается. Однако объемы компьютерных компонентов, требующих утилизации, растут быстрее мощностей по их переработке. Деление отходов на отдельные классы опасности для окружающей природной среды установлено Порядком ведения государственного кадастра отходов, утвержденным приказом Министерства природных ресурсов РФ от 30 сентября 2011 г. No 792 [36]. Наименее опасными считаются так называемые практически неопасные отходы. Кроме них существуют только более опасные: малоопасные, умеренно опасные, высокоопасные и чрезвычайно опасные.

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

Пользователь ПК, выбрасывает отслужившие детали компьютера

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

Утилизация ПЭВМ проходит в несколько этапов:

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

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

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

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

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

Персональные компьютеры являются наиболее защищенными от возгорания устройствами: им не страшны перепады в сети и внезапные отключения электроэнергии. Однако при нарушении определенных правил использования, даже они могут вспыхнуть пламенем и нанести

колоссальный ущерб имуществу и здоровью людей

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

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

В России в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 [37] пожарная безопасность обеспечивается:

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

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

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

При обнаружении возгорания действовать необходимо быстро, используя все доступные способы для тушения огня. Если потушить огонь в кратчайшее время невозможно, вызовите пожарную охрану. При эвакуации горящие помещения и задымленные места проходить следует быстро, задержав дыхание, защитив нос и рот влажной плотной тканью. В сильно задымленном помещении передвигаться следует ползком или пригнувшись [38].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была разработана математическая модель возникновения и распространения низового лесного пожара с учетом противопожарных разрывов, а также определены их размеры в зависимости от скорости ветра и влагосодержания ЛГМ. В ходе проделанной работы были решены следующие задачи:

1. Разработана физико-математическая постановка задачи о возникновении и распространении низового лесного пожара с учетом противопожарных разрывами.

2. Использован метод контрольного объема для получения дискретного аналога.

3. Выполнено математическое моделирование процесса.

4. Определены размеры безопасных противопожарных разрывов.

5. Изучено влияния влагосодержания ЛГМ и скорости ветра на размеры противопожарных разрывов.

На основании этой модели была создана программа в ПО PHOENICS, при помощи которой проведено моделирование процессов распространения низовых лесных пожаров. В результате расчетов получены поля распределения скорости, температуры, концентраций кислорода и продуктов пиролиза.

В результате численных расчетов получено, что с увеличением влагосодержания ЛГМ уменьшаются размеры противопожарных разрывов. А с увеличением скорости ветра необходимо увеличивать размеры противопожарных разрывов.

Таким образом, были выполнены все поставленные задачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Porterie B., Morvan D, Larini M, Loraud JC (2000) Firespread through fuel beds: modeling .of wind-aided fires and induced hydrodynamics. *Physics of Fluids*12, 1762-1782. (Дата обращения 12.02.2019).
2. Морозов Г.Ф. Лес и наука о лесе//Лесоведение. -Тюмень: Изд. ТГУ, 1998. –Вып. 6
3. 100 чудес природы / Авт.–сост. Ю.Андрушкевич. –М.:Эксмо, 2014. –96 с. : ил. –(100 лучших)
4. Блам Ю. Ш. Лесной комплекс Сибири: от стратегии выживания к развитию / Ю. Ш. Блам, Л. В. Машкина, О. В. Машкина // Регион: экономика и социология. – 2003. – No2. – С. 149
5. Климат Воробьев А. Е. Человек и биосфера: глобальное изменение климата : учеб. для студентов вузов / А. Е. Воробьев, Л. А. Пучков. - М. : РУДН, 2006. – Ч. 2. – 445
6. Ходаков В.Е. Лесные пожары: методы исследования / В.Е.Ходаков, М.В.Жарикова. – Херсон : Гринь Д.С., 2011. —470 с.
7. Коровин Г.Н., Исаев А.С., Охрана лесов от пожаров как важнейший элемент национальной безопасности России. «Лесной бюллетень», No8–9. –1042010. –No8–9. URL: <http://old.forest.ru/rus/bulletin/08-09/index.html> (Дата обращения 01.05.2019)
8. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров / А.М.Гришин. – Томск: Изд-во Томского университета, 1981. –277 с.
9. "Лесной Дозор" - эффективная система раннего обнаружения лесных пожаров [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Нижний Новгород, 2011–2017. URL: <http://lesdozor.ru/ru/problemy-obnaruzheniya-lesnykh-pozharov/analitika/qlesnoj-dozorq-effektivnaya-sistema-rannego-obnaruzheniya-lesnykh-pozharov> (Дата обращения 02.03.2019)
10. Департамент лесного хозяйства Томской области / Лесной план Томской области. Книга 1. –2015 URL:



<https://deples.tomsk.gov.ru/files/front/download/id/35578>. Режим доступа: свободный (дата обращения 02.05.2019)

11. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. -Новосибирск: Наука, 1997-. 408 с

12. D. Morvan. Numerical study of the effect of fuel moisture content (FMC) upon the propagation of a surface fire on a flat terrain // Fire Safety Journal. – Vol 58 – 2013. p. 121-131. – Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037971121300012X> (Дата обращения 10.02.2019).

13. L. Dupuy, J.C. Valette, D. Morvan. A ‘complete’ physical model of forest fire behavior as a tool to manage the forest fuel on WUI // – 2010 – p. 106-112 – Available at: <file:///G:/morvan/warmCh13Dupuy.pdf> (Дата обращения 12.02.2019).

14. Raquel S.P Hakes, Sara E. Caton, Daniel J. Gorham , Michael J. Gollner, A. Review of Pathways for Building Fire Spread in the Wildland Urban // Fire Technology Journal –2016.

15. B. Porterie, J. C. Loraud and M. Larini, D. Morvan. Firespread through fuel beds: Modeling of wind-aided firesand induced hydrodynamics// – 2000 – Available at: <file:///G:/morvan2/0a85e53b6b8d2999fb000000.pdf> (Дата обращения 27.03.2019).

16. Алексеев, С. П. Безопасность жизнедеятельности в чрезвычайных ситуациях. Учебное пособие / С.П. Алексеев. - М.: Изд-во Политехнического университета, 2017. - 482 с

17. Шаптала В.Г. Основы моделирования чрезвычайных ситуаций: учебное пособие / В.Г. Шаптала, В.Ю. Радоуцкий, В.В. Шаптала; под общ. ред. В.Г. Шапталы. –Белгород: изд-во БГТУ, 2010. –166с.

18. Fons, W.L. Analysis of fire spread in light forest fuels / W.L. Fons // Journal of Agric. Res. –1946. –Vol. 72, N 3. –P. 93–121.

19. Нестеров, В.Г. Горимость леса и методы ее определения / В.Г. Нестеров. –Л.: Гослесбумиздат, 1949. –74 с.

20. Конев, Э.В. Физические основы горения растительных материалов / Э.В. Конев. –Новосибирск: Наука, 1977. –239 с.
21. Кисляхов Е. К. Влияние влагосодержания лесных горючих материалов на предел пламенного горения/Е. К. Кисляхов // Исследование компонентов лесных биогеоценозов Сибири, Красноярск, 1976. т.С. 145 –147
22. Коровин Г.Н. Методика расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров / Сборник научных трудов Л.: ЛенНИИЛХ, 1969. - В. XII. -С. 244 – 262.
23. Encyclopaedia Index CHAM [Электронный ресурс] // URL: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_docs/tr001/tr001.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr001/tr001.htm) (дата обращения 12.03.19)
24. Патанкар С.В. Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости. -М.: Энергоатомиздат, 1984. -124с.
25. Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А.Гаврикова, Л.Р.Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического уни-верситета, 2014. –36 с
26. О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования. от 24.07.2009 N 212-ФЗ, статья 58, часть 1.
27. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 No 197-ФЗ // Собрание законодательства РФ. –2002. –No 1 (ч. 1).–ст. 219.
28. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Минздрав России, 2003. – 32 с

29. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Росстандарт, 2017. – 18 с
30. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Госстандарт СССР, 1989. – 78 с.
31. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Минздрав России, 2003. – 32 с.
32. Белокопытов В.Н. Безопасность работы с ПЭВМ и копировальномультипликативной техникой – Смоленск, 2007. – 155 с
33. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – М.: Минздрав России, 2016. – 103с.
34. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. – М.: Минздрав России, 2003. – 37 с
35. ГОСТ 12.1.038–82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. – М.: Стандартиформ, 2001. – 5 с.
36. Приказ Министерства природных ресурсов РФ. Об утверждении Порядка введения государственного кадастра отходов от 30 сентября 2011 г. №792. – М.: Минприрода России, 2011. – 10 с.
37. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Минздрав России, 1991. – 126 с.
38. ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в ЧС. Основные положения. – М.: Технический комитет по стандартизации, 2017. – 6 с.