

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



Институт неразрушающего контроля  
Направление подготовки: 20.04.01 «Техносферная безопасность»  
Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Разработка математической модели распространения верховых лесных пожаров в сопряженной постановке с учетом противопожарных разрывов и заслонов

УДК 614.841.42:630 432.1:519.863

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM51	Иванова Маргарита Валерьевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	Доктор физико-математических наук		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Баннова Кристина Алексеевна	Кандидат экономических наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	Кандидат технических наук		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭБЖ ИНК ТПУ	Романенко Сергей Владимирович	Доктор химических наук, профессор		

Томск – 2017 г.

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	Применять <i>глубокие</i> математические, естественно-научные, социально-экономические и профессиональные знания при осуществлении изысканий и <i>инновационных</i> проектов создания и оптимизации методов и средств обеспечения безопасности человека и окружающей среды от техногенных и антропогенных воздействий	Требования ФГОС (ПК-1–4, 6; ОПК-1–3, 5; ОК-4) <a href="#">[1]</a> , Критерий 5 АИОР <a href="#">[2]</a> (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р2	<i>Создавать</i> и использовать на основе <i>глубоких и принципиальных</i> знаний необходимое оборудование, инструменты и технологии по защите человека в техносфере, а также для повышения надежности и устойчивости технических объектов, поддержания их функционального назначения в условиях <i>жестких</i> экономических, экологических, социальных и других ограничений	Требования ФГОС (ПК-5, 7; ОПК-1–3, 5; ОК-5, 6), критерии АИОР Критерий 5 АИОР (пп. 1.3, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р3	Проводить <i>инновационные</i> инженерные исследования опасных природных и техногенных процессов и систем защиты от них, включая <i>критический анализ данных из мировых информационных ресурсов, формулировку выводов в условиях неоднозначности</i> с применением <i>глубоких и принципиальных</i> знаний и <i>оригинальных</i> методов в области современных информационных технологий, современной измерительной техники и методов измерения.	Требования ФГОС (ПК-8–13; ОПК-1–3, 5; ОК-9, 10), Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р4	Организовывать и руководить деятельностью подразделений по защите среды обитания и безопасному размещению и применению технических средств в регионах, осуществлять взаимодействие с государственными службами в области экологической, производственной, пожарной безопасности, защиты в чрезвычайных ситуациях, применять на практике теории принятия управленческих решений и методы экспертных оценок.	Требования ФГОС (ПК-14–18; ОПК-1–5; ОК-1, 8), Критерий 5 АИОР (п.1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р5	Организовывать мониторинг в техносфере, составлять краткосрочные и долгосрочные прогнозы развития ситуации на основе его	Требования ФГОС (ПК-19, 21, 22; ОПК-1–5; ОК-2), Критерий 5 АИОР (пп.1.2,

	результатов с использованием <i>глубоких фундаментальных и специальных</i> знаний, аналитических методов и <i>сложных</i> моделей в условиях <i>неопределенности</i> , анализировать и оценивать потенциальную опасность объектов экономики для человека и среды обитания и разрабатывать рекомендации по повышению уровня безопасности объекта	1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Проводить экспертизу безопасности и экологичности технических проектов, производств, промышленных предприятий и территориально-производственных комплексов, аудит систем безопасности, осуществлять мероприятия по надзору и контролю на объекте экономики, территории в соответствии с действующей нормативно-правовой базой	Требования ФГОС (ПК-20, 23–25; ОПК-1–3, 5), Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Общекультурные компетенции</i>		
P7	Использовать <i>глубокие</i> знания в области проектного <i>менеджмента</i> , в том числе <i>международного менеджмента</i> , находить и принимать управленческие решения с соблюдением профессиональной этики и норм ведения <i>инновационной инженерной</i> деятельности с учетом юридических аспектов в области техносферной безопасности.	Требования ФГОС ВО (ОК-7, ОК-8; ОПК-1–3, 5; ПК-4, ПК-6)  Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	<i>Активно владеть иностранным языком</i> на уровне, позволяющем работать в интернациональной профессиональной среде, включая разработку документации, презентацию и защиту результатов <i>инновационной инженерной</i> деятельности.	Требования ФГОС (ОК-4–6, 10–12; ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Эффективно работать индивидуально, а также в качестве <i>руководителя группы</i> с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области техносферной безопасности, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам	Требования ФГОС (ОК-1-3, 8; ОПК-1–4), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Демонстрировать <i>глубокое знание</i> правовых, социальных, экологических и культурных аспектов <i>инновационной инженерной</i> деятельности, <i>компетентность</i> в вопросах охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.	Требования ФГОС (ОК-4, 5; ОПК-2–3; ПК-18, 19), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Понимать необходимость и уметь <i>самостоятельно учиться</i> и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2–4), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

# Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



## «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт неразрушающего контроля  
Направление подготовки: 20.04.01 «Техносферная безопасность»  
Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

УТВЕРЖДАЮ:

Зав.кафедрой ЭБЖ

Романенко С.В.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерская диссертация

Студенту:

Группа	ФИО
1ЕМ51	Иванова Маргарита Валерьевна

Тема работы:

Разработка математической модели распространения верховых лесных пожаров в сопряженной постановке с учетом противопожарных разрывов и заслонов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	1290/с от 01.03.2017

Срок сдачи студентом выполненной работы	07.06.2017
---	------------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Литературные данные по проблематике лесных пожаров, их математическому моделированию, нормативно-техническая документация.
<b>Перечень подлежащих исследованию вопросов</b>	1) Обзор существующих теоретических и экспериментальных методов изучения лесных пожаров 2) Выбор метода математического моделирования 3) Применение метода контрольного объема для получения дискретного аналога 4) Разработка математическая постановки задачи о возникновении и распространении верхового лесного пожара 5) Задание исходных данных и параметров 6) Разработка численной методики решения задачи. 7) Численное решения задачи о возникновении и распространении верховых лесных пожаров 8) Решения задачи определения размеров противопожарных разрывов

	9) Решения задачи определения размеров противопожарных заслонов 10) Анализ результатов решения задачи о возникновении и распространении верхового лесного пожара 10) Анализ результатов решения задачи распространения лесного пожара при наличии противопожарных разрывов 11) Анализ результатов решения задачи распространения лесного пожара при наличии противопожарных заслонов
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кандидат экономических наук Баннова К.А.
Производственная и экологическая безопасность	Кандидат технических наук Сечин А.А.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Литературный обзор	

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	Доктор физико-математических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM51	Иванова Маргарита Валерьевна		



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля  
Направление подготовки: 20.04.01 «Техносферная безопасность»  
Уровень образования: Магистратура  
Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности  
Период выполнения (осенний/весенний семестр 2016/2017 учебного года)

Форма представления работы:

**Магистерская диссертация**

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

Срок сдачи студентом выполняемой работы:	07.06.17
--	----------

Дата контроля	Название раздела модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
5.02.2017	Введение	10
10.02.2017	1. Обзор литературы	10
10.03.2017	2. Физическая и математическая постановка задачи.	10
20.03.2017	3. Результаты численных расчетов. 3.1. Расчеты по определению картины полей температур при распространении верхового лесного пожара.	10
30.03.2017	3.2. Расчеты по определению картин распределения полей температур при распространении верхового лесного пожара с учетом противопожарных разрывов	10
15.04.2017	3.3. Расчеты по определению картин изотермы температуры при распространении верхового лесного пожара с учетом противопожарных заслонов.	10
10.05.2017	3.4 Сравнение эффективности противопожарных разрывов и противопожарных заслонов	10
18.05.2017	4. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	10
28.05.2017	5. Раздел «Социальная ответственность»	10
30.05.2017	Заключение	10

Составил преподаватель:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	Доктор физико- математических наук		

**СОГЛАСОВАНО:**

<b>Зав. кафедрой</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ЭБЖ ИНК ТПУ	Романенко Сергей Владимирович	Доктор химических наук, профессор		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНИНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ,  
РЕСУРСООЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>		
1EM51	Иванова Маргарита Валерьевна		
<b>Институт</b>	<b>ИНК</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭБЖ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Техносферная безопасность
<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>			
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 бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; наблюдение.		
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов			
3. Использованная система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования			
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>			
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведение НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Определение потенциального потребителя результатов исследования, SWOT-анализ, определение возможных альтернатив проведения научных исследований		
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование этапов работы, определение календарного графика и трудоемкости работы, расчет бюджета		
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка сравнительной эффективности проекта		
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>			
1. Сегментирование рынка 2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений 3. Матрица SWOT 4. Морфологическая матрица 5. Временные показатели проведения научного исследования 6. График проведения и бюджет НИ 7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ			
<b>Дата выдачи задания по линейному графику</b>			

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент	Баннова Кристина Алексеевна	Кандидат экономических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1EM51	Иванова Маргарита Валерьевна		



**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1EM51	Иванова Маргарита Валерьевна

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

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

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Описание рабочего места (аудитория 120 корпуса №8 ТПУ, оборудованная компьютерами) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вредных проявлений факторов производственной среды (освещение, шум, микроклимат);</li> <li>- опасных проявлений факторов производственной среды (электрической и пожарной природы);</li> <li>- негативное воздействие на окружающую природную среду;</li> <li>- чрезвычайных ситуаций.</li> </ul>
<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</p>	
<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>- действие фактора на организм человека;</li> <li>- приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>- предлагаемые средства защиты;</li> <li>- (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>- термические опасности (источники, средства защиты);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>- предлагаемые средства защиты.</li> <li>- электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты).</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты).</li> </ul>	
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>- анализ воздействия объекта на литосферу (отходы).</li> </ul>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>- выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>- разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>- разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>
<p><b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	кандидат технических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM51	Иванова Маргарита Валерьевна		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 125 с., 14 рисунков, 34 таблицы, 48 источников.

Ключевые слова: верховой лесной пожар, математическое моделирование, метод контрольного объёма, противопожарные разрывы, противопожарные заслоны.

Объектом исследования являются лесные пожары, распространяющиеся с учётом противопожарных разрывов и заслонов. Предмет исследования – математические модели лесных пожаров с учётом противопожарных разрывов и заслонов.

Цель работы – Разработка математической модели распространения верховых лесных пожаров с учетом противопожарных разрывов и заслонов.

Метод математического моделирования позволяет адекватно описывать состояние лесного биогеоценоза и приземного слоя атмосферы при лесных пожарах, а также противопожарные разрывы и заслоны.

В результате исследования процесс возникновения и распространения верхового лесного пожара описан в рамках осредненной математической постановки, т.е. все функции интегрируются по высоте и их значения рассматриваются как средние по пологу леса. Изучено влияние метеоусловий и других факторов на скорость распространения пожара и выбросы продуктов горения в приземный слой атмосферы. Определено влияние противопожарных разрывов и заслонов на распространение пожара и прекращение горения.

Степень внедрения: разработанная в работе математическая модель возникновения и распространения верховых лесных пожаров опубликована в сборниках научных конференций.

Экономическая эффективность/значимость работы: данная работа позволит более точно рассчитать противопожарный разрыв и заслон.

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

## Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ Р 1.5 – 2012 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.
2. ГОСТ 2.104 – 2006 Единая система конструкторской документации. Основные надписи.
3. ГОСТ 2.105 – 95 Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам.
4. ГОСТ 2.106 – 96 Единая система конструкторской документации. Текстовые документы.
5. ГОСТ 2.301 – 68 Единая система конструкторской документации. Форматы.
6. ГОСТ 3.1102 – 2011 Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов.
7. ГОСТ 3.1105 – 2011 Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов общего назначения.
8. ГОСТ 7.0.5 – 2008 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка.
9. ГОСТ 7.1 – 2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание.
10. ГОСТ 7.9 – 95 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация.
11. ГОСТ 7.32 – 2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

## Содержание

Введение.....	16
1. Теоретическая часть .....	19
1.1. Обзор литературы .....	19
1.1.1. Общие сведения о лесе .....	19
1.1.2. Пожар и его виды. Способы борьбы с пожарами .....	20
1.1.3. Лесопожарная обстановка в Томской области.....	22
1.2. Противопожарное обустройство лесов.....	30
1.3. Математическое моделирование для прогнозирования ЧС .....	32
1.3.1. Виды моделей. Построение модели .....	33
1.3.2. Обзор математических моделей пожаров.....	37
2. Постановка задачи и метод решения .....	41
2.1. Физическая постановка задачи .....	41
2.2. Математическая постановка .....	42
2.3. Метод решения .....	46
3. Результаты численных расчетов .....	49
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	56
4.1. Предпроектный анализ .....	56
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	56
4.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	57
4.1.3. SWOT – анализ .....	59
4.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	62
4.1.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	63

4.2. Инициация проекта .....	64
4.2.1 Цели и результат проекта .....	64
4.2.2 Организационная структура проекта .....	65
4.2.3 Ограничения и допущения проекта .....	65
4.3.1 Иерархическая структура работ проекта .....	66
4.3.2 Контрольные события проекта .....	66
4.3.3 План проекта.....	68
4.3.4 Бюджет научного исследования .....	71
4.3.5 Матрица ответственности .....	76
4.3.6 Реестр рисков проекта .....	76
4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	76
4.4.1 Оценка социальной эффективности исследования .....	76
5. Социальная ответственность .....	81
5.1. Профессиональная социальная безопасность. ....	82
5.1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований. ....	82
5.1.2. Анализ опасных производственных факторов.....	90
5.2. Экологическая безопасность.....	93
5.2.1. Утилизация электроники. ....	94
5.2.2. Утилизация люминесцентных ламп. ....	94
5.2.3. Другие воздействия.....	95
5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	96
5.3.1 Пожарная и взрывная безопасность .....	96
5.4. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. ....	97

5.4.1. Расчет искусственного освещения .....	98
Заключение .....	101
Список публикаций.....	102
Список используемых источников.....	103
Приложение А .....	108
Раздел 1.....	108
Einführung.....	109
1. Der theoretische Teil.....	111
1.1. Literaturübersicht .....	111
1.1.1. Waldübersicht .....	111
1.1.2. Waldbrand und seine Form. Brandbekämpfung. ....	111
1.1.3. Waldbrandsituation im Tomsker Gebiet. ....	113
1.2. Mathematische Modellierung für die Waldrandvoraussage .....	118
1.2.1. Die Waldbrandmodelle .....	119
1.2.2. Emprische Modelle .....	121
1.2.3. Waldbrandmodellierung.....	123
1.2.4. Physikalische Modelle .....	124

## ВВЕДЕНИЕ

Лес крайне важен в жизни любого человека. Это не только материалы для строительства, энергетической, химической и бумажной промышленности. Лес – место обитания тысяч видов животных, лес – рекреационная зона. Лес – основной источник кислорода на Земле. К сожалению, издавна леса подвергались уничтожению – вырубались в экономических целях, исчезали из-за природных процессов, выгорали по неосторожности человека. Несмотря на меры предосторожности, в Российской Федерации ежегодно уничтожается более 1 млн. гектар леса.

Мировые ученые сходятся на мнении, что лесные пожары являются важной и неотъемлемой частью динамики лесной растительности. Интенсивные лесные пожары приводят к замене лесных запасов разного возраста и состава. Частые пожары с низкой интенсивностью поддерживают оптимальное удельное количество лесных горючих материалов, что в перспективе снижает риск катастрофических пожаров. Также существуют некоторые виды хвойных растений (например, секвойи), чьи шишки гораздо более активно раскрываются в условиях экстремальных температур [1].

Однако, современное состояние лесов и антропогенная природа лесных пожаров говорит о том, что отрицательных моментов гораздо больше, чем положительных. В качестве примера подобных отрицательных моментов можно выделить установленную связь глобального потепления с массовыми выбросами CO<sub>2</sub> от лесных пожаров [2], задымленность городов, возможный переход лесного пожара на постройки, находящиеся недалеко от границы леса. В частности, известны случаи выгорания целых деревень [3]. Моделирование пожара, его параметров и поведения играет важную роль при управлении пожарами и обеспечении безопасности в целом.

Вышеуказанные причины обуславливают актуальность данной темы. Кроме того, большие площади распространения пожара по массиву и возможное пересечение границ государств выводит эту проблему на



международный уровень. Однако, сегодня не уделяется достаточного внимания физическому моделированию лесного пожара.

Целью данной работы является разработка математической модели распространения верховых лесных пожаров с учетом противопожарных разрывов и заслонов из лиственных деревьев.

Задачи ставятся следующие:

1. Разработать математическую и физическую постановку задачи о возникновении и распространении верхового лесного пожара с противопожарными разрывами и заслонами.

2. Выполнить математическое моделирование процесса.

3. Определить размеры противопожарных разрывов, заслонов и их комбинаций.

4. Проанализировать полученные результаты.

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.

Объектом исследования являются лесные пожары. Предмет исследования – математическое моделирование возникновения и распространения верхового лесного пожара при наличии и в отсутствие разрывов и противопожарных заслонов.

Расчеты проводились при помощи математической модели, созданной на основе модели А.М. Гришина [4], являющейся наиболее полной в том плане, что предыдущие модели, которые не учитывали существенные условия

и параметры процессов распространения лесных пожаров, а также вносили упрощения, от которых отказались при составлении данной модели. Итогом расчетов стали результаты – зависимость размеров противопожарного разрыва и противопожарного заслона от параметров лесного массива и метеорологических условий. Данные результаты были продемонстрированы в ходе научных конференций.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1. Обзор литературы

### 1.1.1. Общие сведения о лесе

Существует множество определений леса, но все они сходятся в том, что лес состоит из древесных, кустарниковых, кустарничковых, травянистых растений, мхов и лишайников, является местом обитания животных и микроорганизмов, биологически взаимосвязанных в своем развитии и влияющих друг на друга и на внешнюю среду [5]. Видовое разнообразие лесов зависит от природно-климатических условий его произрастания. Так, в России выделены следующие зоны растительности:

- лесотундра;
- таежная зона;
- смешанные хвойно-широколиственные леса;
- широколиственные леса, лесостепь;
- субтропики [6].

Наибольшую площадь в России занимает тайга. Это массив, состоящий из хвойных пород деревьев – ели, кедра, пихта, лиственница, сосна. Тайга является основным источником древесины и подвергается постоянным обширным вырубкам.

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.

### **1.1.2. Пожар и его виды. Способы борьбы с пожарами**

Лесной пожар – стихийное, неуправляемое распространение огня в лесу или на землях лесного фонда. Лесные пожары принято разделять на верховые, низовые и подземные [6].

Низовой пожар распространяется по приземному слою – траве, кустарникам, листовому опаду, мелкому подросту и коре. По скорости распространения бывает беглый и устойчивый. Беглый пожар распространяется со значительной 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 проплешин. 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.

Верховой пожар также бывает устойчивым и беглым. Он распространяется по кронам деревьев, причем чаще всего является продолжением низового пожара. Огонь поднимается по низкоопущенным кронам и разновозрастным деревьям, поэтому он чаще возникает в хвойных, многоярусных и горных лесах, а также в сухостоях. Скорость верховых пожаров велика – от 1500 м/ч при устойчивом пожаре до 5000 м/ч при беглом.

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 [7].

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.

Лесопожарная обстановка в России и в мире требует развития и совершенствования способов борьбы с лесными пожарами. Основным органом, отвечающим за защиту от лесных пожаров, является специализированная служба авиационной охраны лесов, специализированные лесопожарные подразделения, лесничества, добровольные дружины.

Авиалесоохрана – сеть из региональных авиабаз и авиаотделений, охватывающая около 90% всех охраняемых лесов и оленьих пастбищ, при этом наиболее важную роль играет в таежных лесах, где авиационное тушение является единственно возможным ввиду отсутствия дорог и коммуникаций. В условиях достаточного финансирования авиалесоохрана справлялась с более чем 95% возникающих лесных пожаров на подконтрольных территориях и обеспечивало оперативное обнаружение неразвитых очагов горения [8]. Однако использование авиационного тушения при локализации и ликвидации

верховых пожаров признано опасным. Неоднократно случались аварии из-за крайне плохой видимости и высоких температур. В 2016 году в Иркутской области при выполнении задачи по тушению пожара разбился самолет Ил-76, погибло 10 человек. Подобные случаи происходили в Италии, Болгарии, Швейцарии [9].

Также применяется наземное тушение водой, с добавками и без них. Этот метод имеет как преимущества, так и недостатки, главным из которых является возможное отсутствие доступных источников воды, а также привнесение в экосистему несвойственных ей веществ.

Наиболее эффективно локализовать верховой пожар удастся при помощи встречного пала или прокладывания минерализованных полос достаточной ширины. Эти способы имеют под собой одну и ту же физическую основу – увеличение расстояния, через которое огонь не сможет пройти, отсекая таким образом горящий массив от не горящего. Однако, согласно инструкции Министерства обороны СССР, ширина очищенной полосы должна составлять не менее 100–200 метров, что наносит дополнительный ущерб лесному массиву. Имеется способ тушения при помощи взрыва снарядов и направления энергии взрыва навстречу фронту пламени. Однако такой способ тоже имеет массу недостатков, в том числе низкую эффективность ввиду рассеивания энергии взрыва [10].

### **1.1.3. Лесопожарная обстановка в Томской области**

Томская область богата лесом. Общая площадь земель лесного фонда составляет 91% (28820,7 тыс. га.) от площади всех земель, в том числе хвойными породами занято 10334,3 тыс. га. Наиболее ценные породы: сосна, ель, пихта, кедр.

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 % [11]

Нелесные земли занимают 31,8 % общей площади. Они подразделяются на используемые и неиспользуемые. К используемым землям относятся пашни, сенокосы, пастбища – 0,2 %, дороги, просеки, усадьбы – 0,2 %, воды рек и озер – 1%. Большую долю неиспользуемых земель составляют болота – 30,2 %, а также пески и овраги – 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 [11]

Леса делятся на защитные и эксплуатационные. Доля эксплуатационных лесов составляет 94 % (27091,4 тыс. га).

Доля защитных – 6% (1728,7 тыс. га), причем:

- в водоохранных зонах 56,6 тыс. га,
- леса для защиты – 156 тыс. га, из них
- вдоль дорог и железнодорожных путей 74,6 тыс. га,
- зеленые зоны 69,4 тыс. га,
- лесопарковые зоны – 12 тыс. га,

Ценные леса – 1516, 1 тыс. га. Из них:

- имеющие научное или историческое значение 4 тыс. га,
- орехово-промысловые 394,9 тыс. га
- закрепные полосы вдоль водных объектов 765,6 тыс. га,
- нерестоохранные 351.6 тыс. га

В землях лесного фонда находятся 18 государственных природных заказников: 1 федеральный и 17 региональных [11]

Территория Томской области характеризуется высокой степенью пожарной опасности различных типов леса. Наиболее пожароопасными являются сосновые и кедровые леса, территории кедрового стланика. Здесь

прослеживается большая разреженность пологая, что приводит к быстрому высыханию подстилающей поверхности и быстрому накоплению лесного горючего материала.

По ежедневным отчетам выявленных и проверенных термических точек, преобладающим фактором в возникновении лесных пожаров был и остается антропогенный:

- Неконтролируемые сельскохозяйственные палы – 73–78 %
- Несоблюдение правил пожарной безопасности – 14–19 %
- Проведение сельскохозяйственных палов с нарушением пожарной безопасности – 7–8 %

При этом несоблюдение правил пожарной безопасности включает в себя непотушенные костры, сигареты, выброс стеклянного мусора, промасленных тканей, неосторожное обращение с огнем.

Более 74% термических точек регистрируются на расстоянии 5 и меньше километров от населенных пунктов, что неоднократно было причиной перехода огня на населенные пункты и садоводческие участки. Кроме того, количество установленных термоточек ежегодно увеличивается – например, за 6 месяцев 2016 года (январь–июнь) зафиксировано почти столько же термоточек, сколько за весь 2015 год (таблица 1.1).

*Таблица 1.1 – Сравнение количества термоточек за 2015 и 2016 год*

Общее число термоточек		Из них, в 5-ти километровой зоне		Количество палов		Термоточки по причине пала сухой растительности	
Январь-июнь 2016	2015	Январь-июнь 2016	2015	Январь-июнь 2016	2015	Январь-июнь 2016	2015
212	255	173	179	247	452	179	189

Пожарная опасность в Томской области определяется природными особенностями территории – значительными площадями хвойных лесов,



развитым горимым надпочвенным покровом и жарким сухим летом, особенно в первой его половине.

Среднегодовая горимость лесов составляет 100 – 110 дней и длится с начала мая и до второй декады сентября. Наибольшее число пожаров – в мае и июле. Лесорастительные условия и метеорологические факторы области способствуют развитию преимущественно низовых пожаров.

Сбор статистических данных проводился в архивах Центра управления кризисными ситуациями Главного управления МЧС России по Томской области, а также в базе данных ИСДМ «Рослесхоз». В архивах Центра имеются данные с 2011 года.

В таблице 1.2 приведены статистические данные по количеству пожаров и их площадям в 2011 – 2016 годах.

*Таблица 1.2 – Сведения о количестве, площади и причинах пожаров за 2011–2016 год*

Год	Количество пожаров	Площадь, га			Преимущественная причина
		Суммарная	Лесная	Нелесная	
2011	254	8724,9	7306,42	1418,5	с/х палы
2012	548	597205,2	255408	41796,7	Грозы
2013	59	2223,4	2180,3	43,1	Грозы
2014	155	4582,98	3564,66	1018,32	с/х палы
2015	136	2409,5	2137,9	271,5	с/х палы
2016 (на 13.06)	102	1107,98	1055,3	52,68	с/х палы

Для большей наглядности представим часть данных в виде гистограммы (рисунок 1.1)



**Рисунок 1.1 –Количество пожаров с 2011 по 2016 года**

Видно, 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. Также стоит обратить внимание на тот факт, что, 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.

Наиболее пожароопасным был 2012 год 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

Рассмотрим данные о распределении пожаров по месяцам (Таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Сведения о количестве лесных пожаров за 2011–2016 года по месяцам

	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Апрель	30	23	0	17	3	18
Май	110	111	8	46	53	70
Июнь	85	151	5	20	32	56
Июль	8	170	39	34	45	0
Август	1	64	7	34	0	0
Сентябрь	18	29	0	3	3	0
Октябрь	2	0	0	1	0	0

Для наглядности на рисунке 1.2 изображена гистограмма распределения количества пожаров по месяцам.

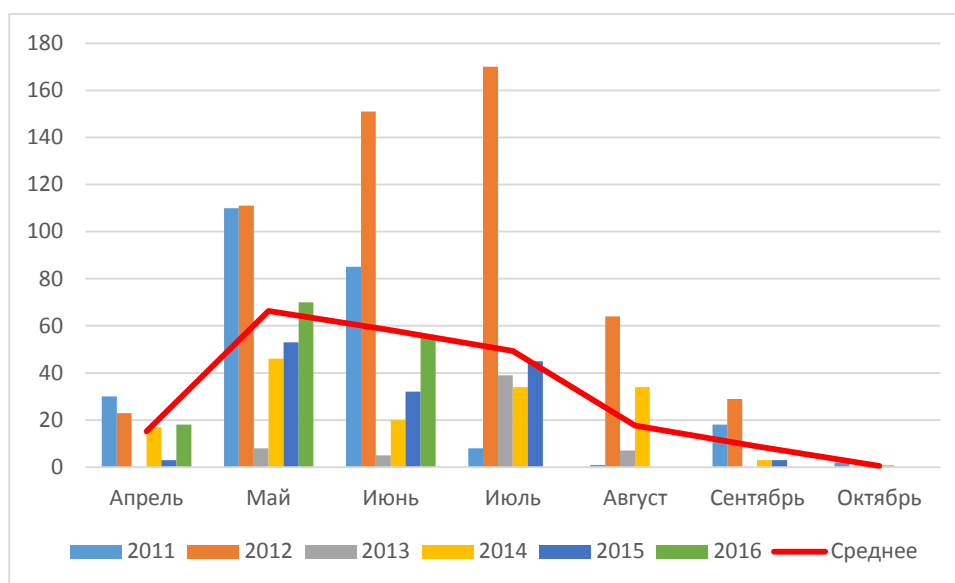


Рисунок 1.2 – Распределение количества пожаров по месяцам

На основании данной таблицы можно судить, что наиболее опасными в отношении возникновения и распространения лесных пожаров месяцами являются май и конец июля – начало августа. В первом случае это связано повсеместно проводимыми сельскохозяйственными палами, часто бесконтрольными, а во втором – с устанавливающейся жаркой погодой с малочисленными осадками.

В таблицах 1.4 и 1.5 приведены данные о крупных пожарах, происходящих на территории области в 2015 и 2016 годах, а также информация о метеоусловиях, которые были зафиксированы на этих территориях до и во время пожара.

*Таблица 1.4 – Сведения о крупных (>50 га) пожарах за 2015 год, соотнесенные с данными метеослужбы*

Дата	Район	Температура воздуха	Влажность воздуха	Скорость ветра
8.05	Томский, с. Губино	19,3	17	1
23.06	Парабельский с. Куржино	26,2	51	5
28.06	Молчановский. Суйга	26,0	29	2
7.07	Колпашевский, Зайкино	18,3	59	3
20.07	Парабельский, Усть-Гузик	21,9	41	6
21.07	Бакчарский, Парбинг	23,6	37	2
22.07	Верхнекетский, Катайга	25,4	34	2
24.07	Верхнекетский, Усть-Гузик	25,4	42	3

Таблица 1.5 – Сведения о крупных (>50 га) пожарах за 2016 год, соотнесенные с данными метеослужбы

Дата	Район	Температура воздуха	Влажность воздуха	Скорость ветра
4.05	Бакчарский, Вавилово	14	26	4
26.05	Бакчарский, Центральный	21	40	4
10.06	Каргасокский, Чарышево	29,1	24	1
12.06	Верхнекетский, Катайга	32,4	16	3
15.06	Верхнекетский, Степановка	23,8	59	3
20.06	Верхнекетский, Степановка	25,2	20	3
20.06	Молчановский, Золотушное	22,5	31	4
22.06	Верхнекетский, Белый Яр	29,8	19	1
22.06	Первомайский, Францево	27,4	25	2
24.06	Парабельский, Нарым	26,2	41	1
27.06	Верхнекетский, Катайга	28,6	33	4
29.06	Верхнекетский, Катайга	23,0	49	2

По этим данным видно, что наибольший урон от пожаров несут северные районы – Каргасокский, Бакчарский, Парабельский, Верхнекетский

(находится на северо-востоке). Это связано с тем, что данные территории покрыты таежными лесами, на них малая плотность населения, в связи с чем информация о начавшемся пожаре поступает несвоевременно.

Также подтверждается, что крупные пожары возникают в определенных погодных условиях. Эти данные в достаточной степени коррелируют с данными, полученными в ходе математического моделирования лесных пожаров, проводимыми при помощи программы *barrier*. 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.

## **1.2. Противопожарное обустройство лесов**

При рассмотрении статистических данных, остро встает вопрос о защите лесов от пожара, причем мониторинга и прогнозирования часто оказывается недостаточно. Необходимо внедрять превентивные меры, причем не только для недопущения возникновения пожара (на это направлена работа с населением, соблюдение безопасности при эксплуатации потенциально опасных объектов на территории лесных массивов, в том числе ЛЭП), но и для ограничения распространения огня в случае, когда очаг возгорания уже образовался.

Противопожарное обустройство лесов – система мероприятий по противопожарной профилактике, своевременному обнаружению, локализации и ликвидации на минимальных площадях, причем перечень этих мероприятий напрямую зависит от климатических условий, породного состава, рельефа и топографии местности.

Основополагающим документом в данной области является Лесной кодекс Российской Федерации, где указан перечень мер противопожарного обустройства лесов [12]:

–Строительство, эксплуатация и сохранение лесных дорог;

- Строительство, эксплуатация и сохранение посадочных вертолетных и самолетных площадок;
- Обустройство просек, противопожарных разрывов, заслонов и минерализованных полос;
- Строительство, эксплуатация и сохранение наблюдательных пунктов;
- Обустройство пожарных водоемов;
- Гидромелиорация;
- Регулирование породного состава деревьев, проведение санитарно-оздоровительных мероприятий;
- Контролируемые выжигания сухой растительности.

В данной работе рассматриваются противопожарные заслоны и разрывы.

Противопожарный разрыв представляет собой просеку, очищенную от горючих материалов (ЛГМ), достаточной ширины, чтобы ограничить распространение пожара. Пожар не может перейти разрыв ни путем конвекции, ни путем излучения. В качестве разрыва могут учитываться и естественные преграды, такие как реки, озера, песчаные отложения, обнажения горных пород шоссейные и железные дороги.

Противопожарный заслон устраивается вокруг хвойных насаждений и представляет собой полосу из лиственных деревьев, часто совмещается с противопожарным разрывом. Такой метод направлен, в первую очередь, на борьбу с верховыми пожарами и позволяет более рационально использовать территорию. Недостатком такого метода является тот факт, что устраивать заслон необходимо на этапе планирования и закладки лесных культур.

Основные требования и критерии оценки заслонов и разрывов приведены в ОСТ 56–103–98 [13]. Согласно этому документу, наиболее рационально располагать противопожарные заслоны полосами шириной 3,5 метра, разбивая массив хвойных пород на квадраты со стороной 150 метров.

Противопожарное обустройство лесов в каждом субъекте РФ базируется на приказе Рослесхоза №174 от 27 апреля 2012 года «Об

утверждении нормативов противопожарного обустройства лесов» [14]. Так, для Томской области, на 2016 год запланированы следующие мероприятия:

- Строительство дорог противопожарного назначения – 148,9 км.
- Реконструкция дорог противопожарного назначения – 45 км
- Содержание дорог противопожарного назначения – 245,1 км
- Устройство противопожарных минерализованных полос, барьеров – 2019 км
- Уход за противопожарными минерализованными полосами – 3181,2 км
- Профилактические контролируемые выжигания – 4700 га.

Анализ плана противопожарного обустройства лесов показывает, что принимаемых мер недостаточно для обеспечения полноценной защиты лесов от пожаров, однако тенденция увеличения объемов мер защиты дает понять, что этот вопрос не остается без внимания.

### **1.3. Математическое моделирование для прогнозирования ЧС**

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.

Математическая модель ЧС – система уравнения и соотношений, геометрических понятий, которые в математической форме отображают, воспроизводят или имитируют наиболее важные особенности и свойства реальных опасных явлений с целью анализа их возникновения, развития и последствий [15]. 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.

Также проблемой являются неровности рельефа, оказывающие большой влияние на поведение пожара. Решением этой проблемы может являться применение ГИС-технологий. Включение важных точек на оцифрованном рельефе в расчеты позволяет снизить погрешности, а наложение результатов моделирования на картографическую основу позволяет оценить зоны, которые могут находиться в опасной зоне.

### **1.3.1. Виды моделей. Построение модели**

Ввиду разнообразия ЧС, различий в требуемых результатах, качестве и количестве исходных данных, существует несколько видов моделирования ЧС.

1. Описание ЧС как совокупности нелинейных дифференциальных уравнений. Необходимым условием являются определение переменных величин и установленные зависимости между ними и параметрами, установленными эмпирически, вычисляемыми или собранными статистически. Этим способом в дальнейшем и будем пользоваться.

2. Формулировка описания ЧС на основе сетей Петри. Этот подход довольно популярен, так как он способен учитывать разные варианты поведения людей в различных ситуациях и проведения оценок по возможным последствиям.

3. Использование при описании ЧС различных когнитивных моделей. Такой способ дает возможность исследования плохо формализованных и слабоструктурированных задач и выявления внутренних противоречий. Когнитивные модели формируются в рамках подходов, исследующих

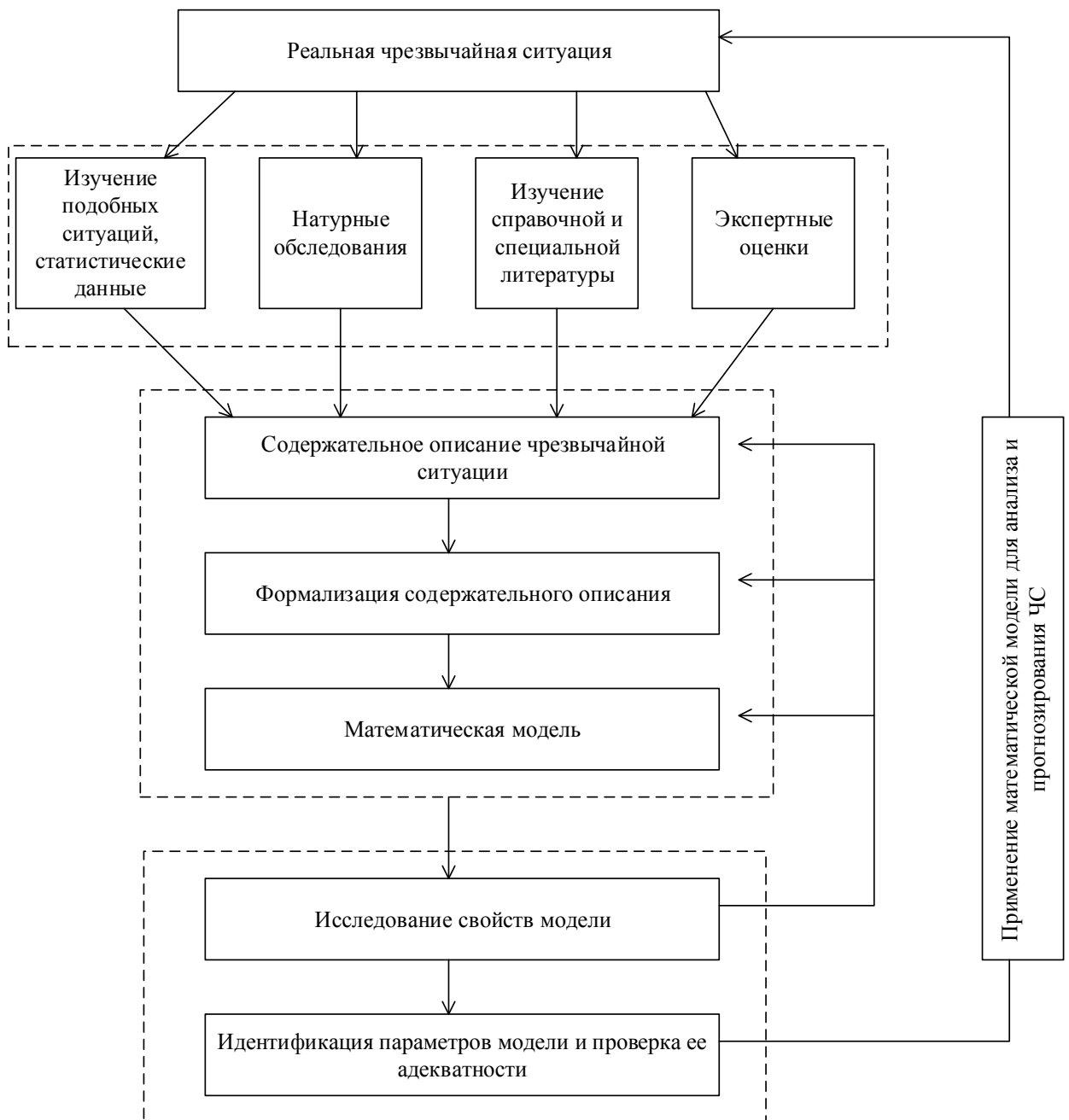
знаковые и взвешенные графы, ведущие к представлению взаимодействий базовых положительных и отрицательных обратных связей. Преимуществом такого подхода является возможность использования неполной или недостоверной информации.

4. Применяют ситуационные подходы, которые основаны на ситуационном управлении. В данном случае все возможные ситуации разбивают на некоторое количество групп, для каждой из которых имеются воздействия, позволяющие управлять. При этом проведение выбора по решению делают на основе прогнозирования того, какие будут последствия по принимаемым решениям. Довольно часто ситуационный метод применяют для проблем, связанных с ликвидацией последствий ЧС.

5. Проведение описаний ЧС на базе функционально-структурного подхода в рамках системного анализа. При этом ЧС представляют в виде совокупности отдельных частей, которые взаимодействуют друг с другом. Может происходить объединения этих частей в группы для достижения более глобальной цели.

6. Применение нейросемантических подходов. Это может быть полезно при оценке причинно-следственных связей в системах. [16]

Итак, построение модели проходит в четыре этапа (рисунок 1.3).



**Рисунок 1.3 – Схема построения математической модели**

На первом этапе необходимо описать ЧС, используя все имеющиеся знания о ней. Создание математической (теоретической) модели на этом этапе неразрывно связано с практическими наблюдениями, ведением статистики, измерением данных. Известный ученый Гришин А.М, создатель одной из наиболее полных математических моделей лесных пожаров, для получения необходимых данных о лесе (объемные доли фаз, аэродинамические характеристики лесных массивов, механизм передачи энергии от фронта пожара к окружающей среде, коэффициенты переноса, характеристики

химических реакций) проводил многочисленные натуральные, полунатуральные и лабораторные экспериментальные исследования и сформировал один из крупнейших банков данных, использующийся до сих пор [17].

На втором этапе происходит формализация модели, постановка задачи с указанием всех вводимых и выводимых величин, констант и зависимостей.

На третьем этапе созданная выше формализованная схема ЧС преобразуется в математическую модель. Для этого всю имеющуюся информацию нужно выразить с помощью соотношений, уравнений, неравенств, алгоритмов. Уравнения, входящие в модель, дополняются начальными и граничными условиями, а также неравенствами, определяющими область допустимых значений вычисляемых величин.

На четвертом этапе исследуется модель. Определяется ее поведение в различные моменты расчетов, просчитываются начальные и конечные результаты, сравниваются с аналитическими решениями, статистическими данными и известными решениями задач теории горения. Также возможен метод априори задаваемых аналитических решений, состоящий в том, что в используемые уравнения подставлялись аналитические выражения искомых функций, вычислялась неувязка уравнений, которая затем трактовалась как фиктивный источник в каждом уравнении. Затем значения функций восстанавливаются. Точность восстановления этих функций должна составлять не менее 0,5%. Устойчивость и точность полученных решений проверяется также уменьшением шагов по времени и пространству [18].

После того, как заканчивается проверка адекватности модели (соответствие ее реальным ЧС), можно использовать модель для анализа и прогнозирования ЧС. Таким образом моделирование происходит быстро и со сравнительно минимальными затратами, при этом одна и та же ЧС может быть описана несколькими моделями в зависимости от требуемых результатов и имеющихся вычислительных мощностей.

### 1.3.2. Обзор математических моделей пожаров

Математическое моделирование лесных пожаров возникло относительно недавно, но уже занимает важное место в деле изучения лесных пожаров. Благодаря моделированию отпала необходимость в проведении натурных испытаний, хотя имеющиеся модели не обладают абсолютной точностью и не учитывают возможных случайных возмущений, а также отражают лишь некоторые из возможных параметров.

Первая модель распространения пожаров была опубликована в 1946 году В.Л.Фонсом [19]. Она была основана только на уравнении теплового баланса и использовала в качестве коэффициентов данные, полученные при сжигании горючих веществ в аэродинамической трубе. Далее стоит выделить модель Г.М.Байрама (1970) [20], которая определяла соотношение между длиной пламени, величиной расходуемых горючих веществ и теплотой их сгорания. В этой модели использовались реальные данные, полученные при изучении пожаров в сосновых лесах. Однако недостатком этой модели было то, что в качестве входных данных использовались данные (например, длина и высота пламени), которые могут быть получены только из наблюдения за конкретным пожаром. Первой моделью, которая использовала только те данные, которые могут быть измерены заранее, стала модель низовых пожаров Р.Ротермела (1972) [21], в основе которой лежит баланс энергии твердой фазы горючего. Эта модель стала одной из наиболее удачных, прошла многочисленные полевые проверки. Некоторые положения этой модели используются до сих пор.

До 1980-х годов большинство математических моделей распространения лесных и торфяных пожаров были одномерными и описывали изменение только одного из параметров – скорости распространения, контуров, характеристик течения, теплопереноса. Лишь немногие модели включали в себя прогнозирование нескольких характеристик. Также не были изучены полностью процессы перехода

низового пожара в верховой – они были описаны лишь с точки зрения прогрева и сушки ЛГМ и не затрагивали химические реакции в пологе леса. Также в большинстве моделей того времени скорость распространения огня задавалась эмпирически, не учитывалось влияние приземного слоя атмосферы и фронта пожара друг на друга, хотя и позволяет определить контур и площадь пожара. Также не были предсказаны критические условия для воспламенения и распространения лесных пожаров, при которых горение не распространяется или прекращается вовсе. Скорость распространения пожара рассчитывалась только в направлении ветра [22].

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 [23].

Наиболее крупным ученым в области математического моделирования является А.М.Гришин. Он разработал несколько моделей, использующихся и сегодня. Согласно его моделям, лес при пожаре является пористо-дисперсной реакционноспособной сплошной средой, неоднородной по структуре и составу. Для получения необходимых данных о лесе (объемные доли фаз, аэродинамические характеристики лесных массивов, механизм передачи энергии от фронта пожара к окружающей среде, коэффициенты переноса, характеристики химических реакций) были проведены многочисленные натуральные, полунатуральные и лабораторные экспериментальные исследования и был сформирован один из крупнейших банков данных, использующийся до сих пор [24].

Рассмотрим различные методы исследования пожаров.

Физико-математическое моделирование поведения пожаров условно делят на три группы:

- модели, построенные «из первых принципов»;
- модели «черного ящика»;
- феноменологические [22].

- Модели первой группы основаны на физике горения и для прогноза используют расчеты на основе исходной теории. Эти модели учитывают три вида передачи тепла: теплопроводность, конвекция и радиация.
- Модели второй группы рассматривают только исходные данные пожара и сравнивают их с имеющимися экспериментальными данными и на основании сходства выдают прогнозы. Однако, успешность применения напрямую зависит от соответствия данных тем данным, которые содержатся в базе данных.
- Модели третьей группы сочетают в себе физические расчеты и константы, выявленные в ходе наблюдения за реальными пожарами.

Отличие моделей первой и второй группы очевидно – первые используют только расчеты, вторые – только экспериментальные данные. Третья группа моделей занимает промежуточное положение. При этом первая группа моделей обладает универсальностью, т.е, способностью рассчитывать параметры любого пожара, а вторая – точностью и простотой построения при совпадении параметров образца и текущего пожара. Поскольку граница между этими группами (а особенно между первой и третьей), то возможно рассматривать два подхода – с описанием физико-химических процессов горения и моделирование в виде «черного ящика».

В зависимости от способа отображения данных модели разделяются на пространственные и непространственные. Модели первой группы дают возможность наблюдать визуализированное распространение пожара по массиву, а модели второй группы выдают результаты в виде графов и таблиц. При этом непространственные модели требуют меньшие вычислительные мощности, однако сложнее для интерпретации, а пространственные интуитивно понятны, однако они требуют больше памяти и сложнее в построении.

По возможному назначению модели делятся на три уровня:

- фундаментальное моделирование;
- тактическое моделирование;

-стратегическое моделирование [17].

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 [17] и Ю.А.Гостинцева. [24] 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 [25], Е.К. Кисилыхов [26].

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 [27].

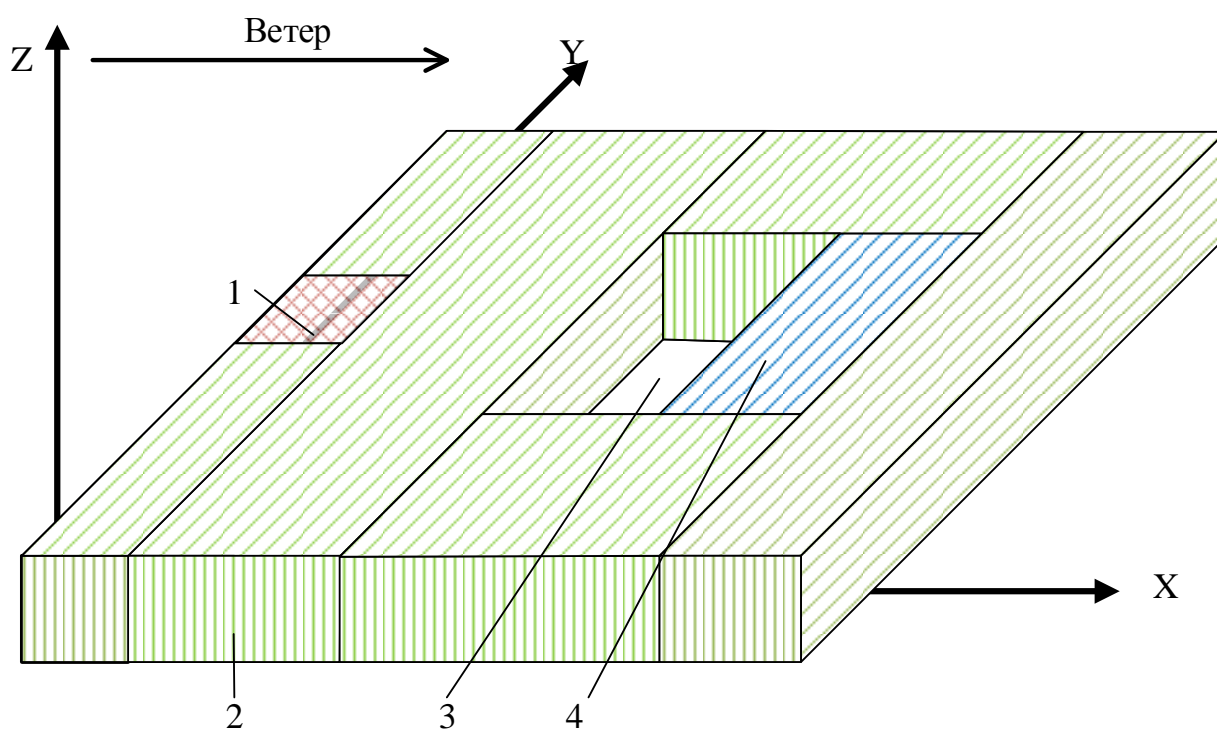
Таким образом, математическое моделирование пожаров имеет в основе труды многих именитых ученых, которые рассматривали данную проблему с разных точек зрения. Имеющиеся модели позволяют решать широкий спектр задач в зависимости от поставленных целей.



## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

### 2.1. Физическая постановка задачи

Пусть очаг зажигания имеет конечные размеры, причем начало система координат  $XYZ$  связано с центром очага. Ось  $OZ$  направлена вертикально вверх, а оси  $OX$  и  $OY$  – параллельно земной поверхности. Ось  $OX$  совпадает с направлением ветра. В начальный момент времени координаты очага зажигания равны нулю. Под действием ветра очаг верхового пожара начинает распространяться по лесному массиву. На рисунке 2.1 схематично изображено расположение лесного массива и противопожарных объектов в нем.



**Рисунок 2.1. Система координат с очагом зажигания в центре, где 1 – очаг зажигания, 2 – хвойный лесной массив, 3 – противопожарный разрыв, 4 – противопожарных барьер из лиственных деревьев**

В данном случае разрыв и заслон 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

Математическая постановка задачи опирается на физическую и представляет собой дополненную и измененную модель, приведенную в работе [4].

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

1. Ветер направлен вдоль оси  $X$ ;
2. Течение носит развитый турбулентный характер, и молекулярным переносом пренебрегаем по сравнению с турбулентным;
3. Полог леса предполагается недеформируемой пористо-дисперсной средой;
4. Среда в пологе леса считается двухтемпературной, т.к. различаются температура газовой и конденсированной фазы.
5. Известна скорость движения воздуха над пологом леса в стационарном состоянии;
6. Рассматривается так называемый продуваемый лесной массив, когда объемной долей конденсированной фазы лесных горючих материалов (ЛГМ), состоящей из сухого органического вещества, воды в жидко-капельном состоянии и золы можно пренебречь по сравнению с объемной долей газовой фазы, включающей в себя компоненты воздуха и газообразные продукты пиролиза и горения.
7. Плотность газовой фазы не зависит от давления, т.к. скорость течения мала по сравнению со скоростью звука.
8. Перенос энергии осуществляется путем турбулентной конвекции и излучения.
9. Для описания процесса переноса энергии излучением используется диффузионное приближение, для описания конвективного переноса, обусловленного действием силы тяжести, используется уравнение Рейнольдса.

Приведенные ниже уравнения справедливы для высоты  $h$ , находящейся выше уровня шероховатости  $Z_0$  и ниже уровня верхней границы полога леса в плоскости  $XZ$ . Уравнения выражают законы сохранения для многофазной многокомпонентной сплошной реагирующей среды

Исходя из того, что вертикальные размеры лесного массива несопоставимо меньше его горизонтальных размеров, общая система дифференциальных уравнений процесса теплопереноса в трехмерном массиве может быть проинтегрирована по оси  $Z$ . Для этого исходная система уравнений была приведена к дивергентному виду, затем проинтегрирована по высоте. При этом высота  $h$  – уровень осреднения, то есть:

$$\int_0^h \phi dz = \bar{\phi}h, \quad (2.1)$$

где  $\bar{\phi}$  – среднее значение величины  $\phi$ .

Проинтегрированная система уравнений выглядит следующим образом (формулы 2.2 – 2.11):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho w) = \dot{m} - (\dot{c}^- - \dot{c}^+)/h, \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{v'^2}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{v'w'}) - \rho s c_d v |\vec{v}| - \dot{m}v + \\ + (\tau_x^- - \tau_x^+)/h, \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{w'^2}) - \rho s c_d w |\vec{v}| - \dot{m}w + \\ + (\tau_y^- - \tau_y^+)/h, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x}(-\rho c_p v' \overline{T'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho c_p w' \overline{T'}) + q_5 R_5 - \alpha_V (T - T_s) + \\ (q_T^- - q_T^+)/h + k_g (c U_R - 4\sigma T^4), \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{v'c'_\alpha}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{w'c'_\alpha}) + R_{5\alpha} - \dot{m}c_\alpha + (J_\alpha^- - J_\alpha^+)/h; \quad \alpha = \overline{1, 3}, \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} \right) - kc U_R + 4k_g \sigma T^4 + 4k_s \sigma T_s^4 + \frac{(q_R^- - q_R^+)}{h} = 0, \\ k = k_g + k_s, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (cU_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_V (T - T_s); \quad (2.8)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1; \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2; \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3; \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad (2.9)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_\alpha = 1, \quad p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}; \quad (2.10)$$

$$\dot{m} = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3; \quad (2.11)$$

$$R_{51} = -R_5 - \frac{M_1}{2M_2}; \quad R_{53} = v_c (1 - \alpha_c) R_1 - R_5; \quad R_{53} = 0, \quad (2.12)$$

Формулы 2.12 – 2.15 описывают скорости пиролиза, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза.

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right); \quad (2.13)$$

$$R_2 = k_2 T^{-0,5} \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right); \quad (2.14)$$

$$R_3 = k_3 \rho s_\sigma \varphi_3 c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right); \quad (2.15)$$

$$R_5 = k_5 M_2 (c_1 M/M_1)^{0,25} (c_2 M/M_2) T^{-2,25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right); \quad (2.16)$$

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

$$t = 0: v = 0; w = 0; T = T_e; c_\alpha = c_{\alpha e}; T_s = T_e; \varphi_i = \varphi_{ie}; \quad (2.17)$$

$$x = 0: v = V_e; w = 0; T = T_e; c_\alpha = c_{\alpha e}; -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (2.18)$$

$$x = x_e: \frac{\partial v}{\partial x} = 0; \frac{\partial w}{\partial x} = 0; \frac{\partial c_\alpha}{\partial x} = 0; \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (2.19)$$

$$y = 0: \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \frac{\partial w}{\partial y} = 0; \frac{\partial c_\alpha}{\partial y} = 0; \frac{\partial T}{\partial y} = 0; -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (2.20)$$

$$y = y_e: \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \frac{\partial w}{\partial y} = 0; \frac{\partial c_\alpha}{\partial y} = 0; \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (2.21)$$

Величина температуры в очаге зажигания изменяется в зависимости от времени:

$$T = T_s = \begin{cases} T_e + \frac{t}{t_0}(T_0 + T_e), t \leq t_0 \\ T_e + \left(T_0 - T_e \exp\left[-k\left(\frac{t}{t_0} - 1\right)\right]\right), t > t_0 \end{cases}; \quad (2.22)$$

Считая, что тепломассообмен во фронте пожара с приземным слоем атмосферы и нижним ярусом леса происходит по закону Ньютона, то соответствующие члены уравнений можно записать в следующем виде:

$$\frac{J_{\alpha}^{-} - J_{\alpha}^{+}}{h} = -\frac{\alpha}{c_{ps}h}(c_{\alpha} - c_{\alpha e}), \quad (2.23)$$

$$\frac{q_T^{-} - q_T^{+}}{h} = -\frac{\alpha}{h}(T - T_e), \quad (2.24)$$

В уравнениях 2.1 – 2.23 используются следующие обозначения:

$R_1 - R_3, R_{5\alpha}$  – массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования сажи и пепла и образования  $\alpha$  – компонентов газодисперсной фазы;  $t_0$  – время формирования очага горения,  $c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$  – удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли  $i$  – ой фазы (1 – сухое органическое вещество, 2 – вода в жидко- капельном состоянии, 3 – конденсированные продукты пиролиза, 4 – минеральная часть);  $T, T_s$  – температура газовой и конденсированной фаз;  $c_{\alpha}$  – массовые концентрации ( $\alpha=1$  – кислород, 2 – горючие продукты пиролиза, 3 – инертные компоненты воздуха);  $p$  – давление;  $U_R$  – плотность энергии излучения;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $k$  – коэффициент ослабления излучения;  $k_g, k_s$  – коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз;  $\alpha_V$  – коэффициент обмена фаз,  $q_i, E_i, k_i$  – тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза;  $s_{\sigma}$  – удельная поверхность элемента лесных горючих материалов;  $M_{\alpha}, M_c, M$  – молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси;  $s, c_d$  – удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полога леса;  $c$  – скорость света;  $v, w$  – проекции скорости на оси  $x, y$  соответственно;  $\alpha_c, v_c$  –

коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза;  $\dot{m}$  – массовая скорость образования газодисперсной фазы;  $t_0$  – характерное время формирования очага лесного пожара;  $g$  – ускорение свободного падения. Индексы "0" и "e" относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно.

Характеристикам лесного массива соответствуют характеристики ЛГМ соснового леса:  $E_5/R=11500$  К,  $k_5=3 \cdot 10^{13}$ ,  $q_5=10^7$  Дж/кг,  $c_p=1000$  Дж/(кг·К),  $\alpha_c=0.06$ ,  $\nu=0.7$ ,  $\rho_e=1.2$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_{2e}=0$ ,  $p_e=10$  н/м<sup>2</sup>,  $T_e=300$  К,  $c_{1e}=0.23$  [28].

### 2.3. Метод решения

Если обозначить все неизвестные величины (температуру, массовую концентрацию химического вещества, энтальпию, кинетическую энергию турбулентности, масштаб длины турбулентности, составляющие скорости) через  $\Phi$ , то все уравнения можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_\Phi, \quad (2.25)$$

или

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -K(t)\Phi + F(t), \quad K(t) \geq 0; F(t) \geq 0; \Phi|_{t=0} = \Phi_e; \alpha_1 \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \Big|_{x_i=x_{1e}} + \alpha_2 \Phi|_{x_i=x_{1e}} = \alpha_3, \quad (2.26)$$

где

$\Phi$  – зависимая переменная,

$v_i$  – компонента скорости по оси  $y$ ;

$\Gamma$  – коэффициент диффузии;

$S_\Phi$  – источниковый член.

Для численного интегрирования исходного системы уравнений используется метод контрольного объема. Расчетную область разбиваем на некоторое число непересекающихся контрольных объемов, причем каждому

контрольному объему должна соответствовать узловая точка, относительно которой будут рассматриваться уравнения состояния. Полученные значения будут справедливы для всей области контрольного объема. Затем исходную систему уравнений интегрируем по каждому контрольному объему.

Выбираем в каждой области контрольную точку (рисунок 2.2):

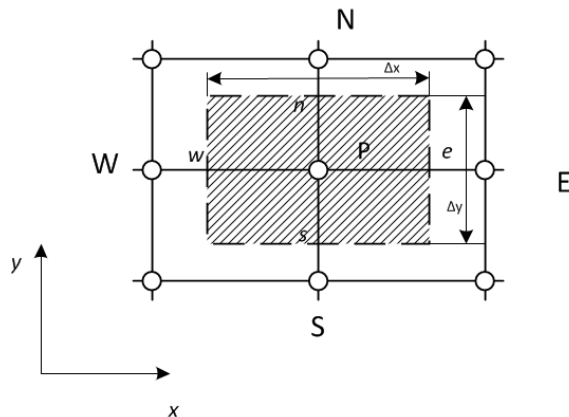


Рисунок 2.2 Контрольный объем для двумерного случая

Получаем двумерный аналог:

$$\alpha_P \Phi_P = \alpha_E \Phi_E + \alpha_W \Phi_W + \alpha_N \Phi_N + \alpha_S \Phi_S + b; \quad (2.27)$$

$$\alpha_W = D_w A(|P_w|) + [|F_w; 0|]; \quad (2.29)$$

$$\alpha_E = D_e A(|P_e|) + [| -F_e; 0|]; \quad (2.30)$$

$$\alpha_N = D_n A(|P_n|) + [| -F_n; 0|]; \quad (2.31)$$

$$\alpha_S = D_s A(|P_s|) + [|F_s; 0|]; \quad (2.32)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_p \Delta x; \quad \Delta x = \Delta x_3; \quad (2.33)$$

$$b = S_c \Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3 + a_P^0 \Phi_P^0; \quad S = S_p \phi + S_c; \quad (2.34)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3}{\Delta t}; \quad (2.35)$$

$$F_e = (Pv_1)_e \Delta x_2; \quad (2.36)$$

$$F_w = (Pv_1)_w \Delta x_2; \quad (2.37)$$

$$F_n = (Pv_2)_n \Delta x_1; \quad (2.38)$$

$$F_s = (Pv_2)_s \Delta x_1; \quad (2.39)$$

$$D_e = \frac{F_e \Delta x_2}{(\delta x)_e}; \quad (2.40)$$

$$D_w = \frac{F_w \Delta x_2}{(\delta x)_w}; \quad (2.41)$$

$$D_n = \frac{F_n \Delta x_1}{(\delta x)_n}; \quad (2.42)$$

$$D_s = \frac{F_s \Delta x_1}{(\delta x)_s}; \quad (2.43)$$

$$P_e = \frac{F_e}{D_e}; \quad (2.44)$$

$$P_w = \frac{F_w}{D_w}; \quad (2.45)$$

$$P_n = \frac{F_n}{D_n}; \quad (2.46)$$

$$P_s = \frac{F_s}{D_s}; \quad (2.47)$$

где  $F_e, F_w, F_n, F_s$  – расход через грани  $e, w, n, s$  соответственно;

$S$  – площадь боковой поверхности контрольного объема;

Дискретный аналог – уравнение, связывающее значение вышеупомянутой зависимой переменной  $\Phi$ , выражающей различные неизвестные, в узловых точках, находящихся в контрольном объеме  $wspe$ .

Тестовые проверки программы расчета осуществлялись путем сравнения с аналитическими решениями, а также с известными численными решениями задач теории горения. Кроме того, для оценки точности используемых разностных схем и проверки правильности работы программы в целом использовался метод априори задаваемых аналитических решений, состоящий в том, что в используемые уравнения подставлялись аналитические выражения искомых функций, вычислялась неувязка уравнений, которая затем трактовалась как фиктивный источник в каждом уравнении. Затем значения функций восстанавливались. Точность восстановления этих функций составляла не менее 0,5%. Устойчивость и точность полученных решений проверялась также уменьшением шагов по времени и пространству. В серийных расчетах использовался алгоритм автоматического выбора шага по времени.



### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

На основании вышеизложенной модели были проведены расчеты параметров горения при верховом лесном пожаре в хвойном массиве, с учетом противопожарных разрывов и заслонов. Изменяемыми параметрами являлись:

- Запас лесных горючих материалов в хвойном массиве;
- Влагосодержание ЛГМ в хвойном массиве;
- Скорость ветра в невозмущенной среде;
- Влагосодержание в массиве лиственных пород, выступающих как противопожарный заслон;
- Размеры и положение противопожарного разрыва и заслона.

Влагосодержание в лесных горючих материалах является безразмерной величиной и определяется по формуле (3.1.)

$$W = \frac{(m-m_0)}{m_0}, \quad (3.1)$$

где  $m$  – масса ЛГМ в естественном состоянии;

$m_0$  – масса ЛГМ в абсолютно сухом состоянии.

Для получения достоверных расчетов важно, чтобы фронт пожара, подходя к заслону или разрыву имел устойчивую скорость распространения. Поэтому начальная граница областей разрывов и заслонов установлена на расстоянии 40 м. от очага зажигания.

В результате расчетов были получены изолинии температуры, концентрации кислорода и концентрации продуктов пиролиза. Для визуализации использовалась программа Matlab.

В таблице 3.1 представлены результаты расчета размера противопожарного заслона в зависимости от величины влагосодержания лиственного массива при различных скоростях ветра. Рисунок 3.1 иллюстрирует эту зависимость.

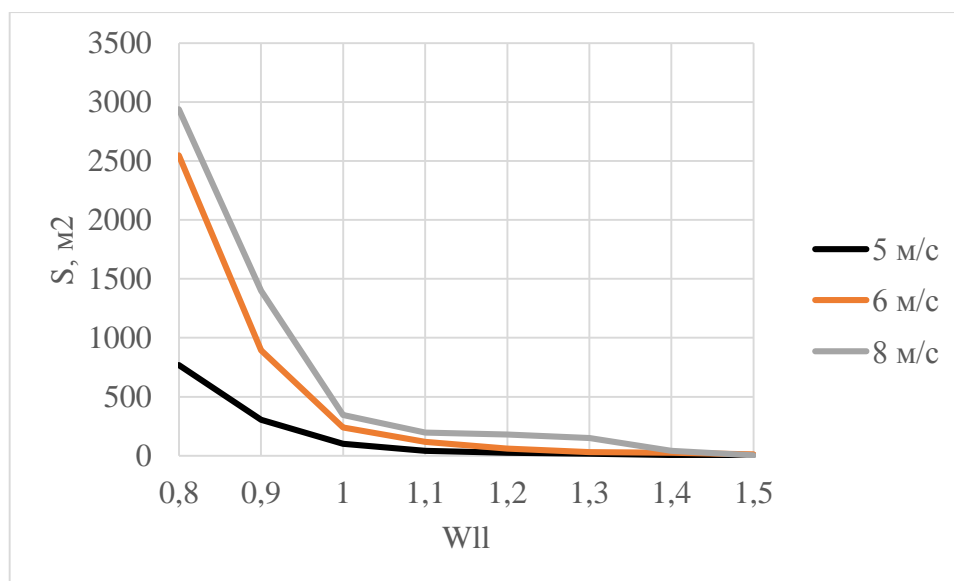
Таблица 3.1. Результаты расчетов размера противопожарного заслона в зависимости от влагосодержания лиственных пород

	Влагосодержание лиственного леса							
	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
	Скорость ветра 5 м/с							
x1, м	40	40	40	40	40	40	40	40
x2, м	48	48	45	44	43	42	41	41
y1, м	1	15,5	20	21	22,5	23	23,5	23,5
y2, м	49	34,5	30	26	26,5	27	26,5	26,5
X, м	8	8	5	4	3	2	1	1
Y, м	48	19	10	5	4	4	3	3
S, м <sup>2</sup>	768	304	100	40	24	16	6	6
	Скорость ветра 6 м/с							
x1, м	40	40	40	40	40	40	40	40
x2, м	66	49,5	45	44,5	43	42,5	42	41
y1, м	0,5	1,5	13	18,5	20	22	22	22,5
y1, м	49,5	48,5	37	31,5	30	28	28	27,5
x, м	26	9,5	5	4,5	3	2,5	2	1
y1, м	49	47	24	13	10	6	6	5
s, м <sup>2</sup>	2548	893	240	117	60	30	24	10
	Скорость ветра 8 м/с							
x1, м	40	40	40	40	40	40	40	40
x2, м	70	57,5	51,5	47	44,5	43	42,5	42
y1, м	0,5	5	17,5	18	15	12,5	21	22
y1, м	49,5	45	32,5	32	35	37,5	29	23
x, м	30	17,5	11,5	7	4,5	3	2,5	2
y1, м	49	40	15	14	20	25	8	1
s, м <sup>2</sup>	2940	1400	345	196	180	150	40	4

$x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  – координаты начала и конца заслона по осям X и Y соответственно. X и Y – размеры заслона по соответствующим осям. S – площадь заслона.

Расчеты проводились со следующими параметрами: запас ЛГМ в хвойном массиве 0,2 кг/м<sup>3</sup>, влагосодержание ЛГМ в хвойном массиве 0,66, скорость ветра в невозмущенной среде 5 м/с. Значение влагосодержания лиственного массива может находиться в диапазоне от 0,8 до 1,5. Вне этих значений пожар либо продолжает распространяться вне зависимости от

размеров заслона, либо прекращает горение на минимальном размере заслона (менее 0,5 м).



**Рисунок 3.1 – Зависимость размеров площади противопожарного заслона от его влагосодержания при различных скоростях ветра**

Видно, что зависимость размеров площади противопожарного заслона имеет вид степенной функции. С увеличением влагосодержания листового массива в диапазоне 0,7–1,0 величина площади заслона резко уменьшается. В дальнейшем изменения не столь существенны. С увеличением скорости ветра площадь противопожарного заслона увеличивается.

Также, согласно данным из таблицы 3.1, прослеживается дополнительная зависимость – с увеличением влагосодержания линейные размеры по осям  $X$  и  $Y$  изменяются по подобным законам. Уменьшение размеров заслона закономерно вытекает из того факта, что более влажные ЛГМ хуже загораются, потому размер заслона, через который не проходит огонь логично уменьшается.

Рассмотрим зависимость размеров противопожарного заслона от скорости ветра при остальных неизменных параметрах: запас ЛГМ в хвойном массиве  $0,3 \text{ кг/м}^3$ , влагосодержание ЛГМ в хвойном массиве 0,66, влагосодержание в листовом массиве 1. Данные представлены в таблице 3.2 и на рисунке 3.2.

Таблица 3.2. Результаты расчета зависимости размеров противопожарного заслона от скорости ветра

	Скорость ветра, м/с				
	4	5	6	7	8
x1, м	40	40	40	40	40
x2, м	47	47,5	49	50	52
y1, м	3	9,5	14	16	18,5
y2, м	47	40,5	36	34	31,5
X, м	7	7,5	9	10	12
Y, м	44	31	22	18	13
S, м <sup>2</sup>	616	465	396	360	312

$x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  – координаты начала и конца заслона по осям X и Y соответственно. X и Y – размеры заслона по соответствующим осям. S – площадь заслона.

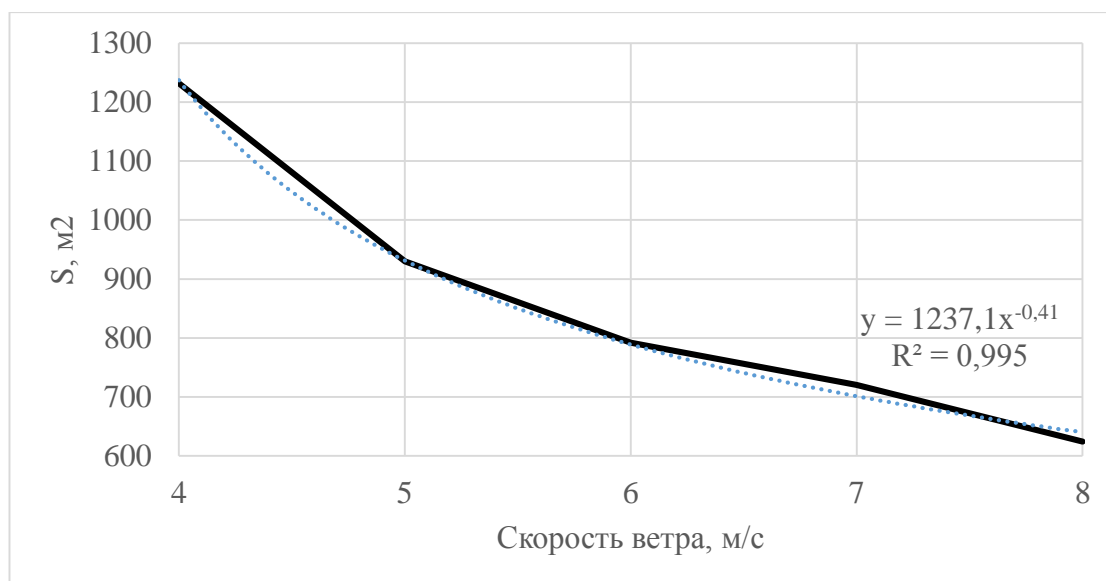
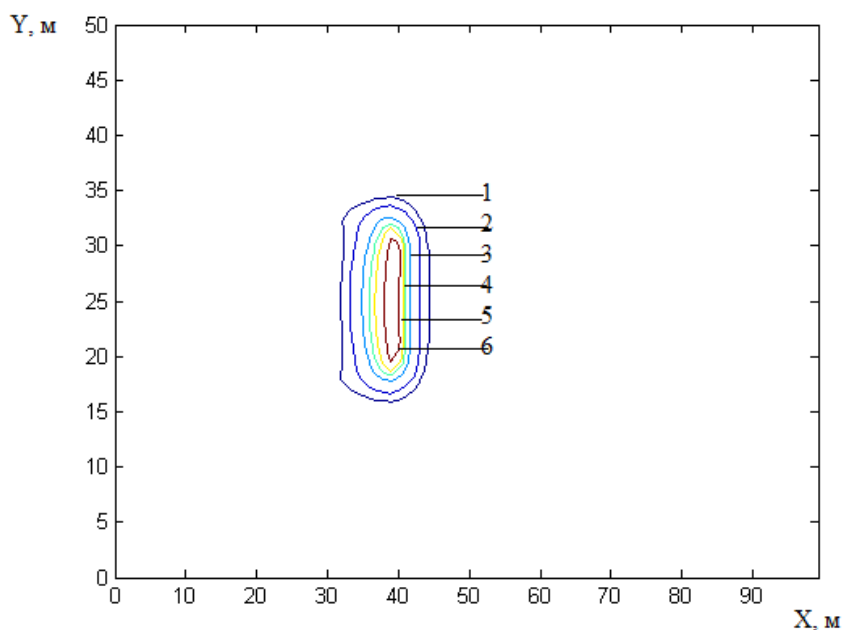


Рисунок 3.2 – Зависимость площади противопожарного заслона от скорости ветра

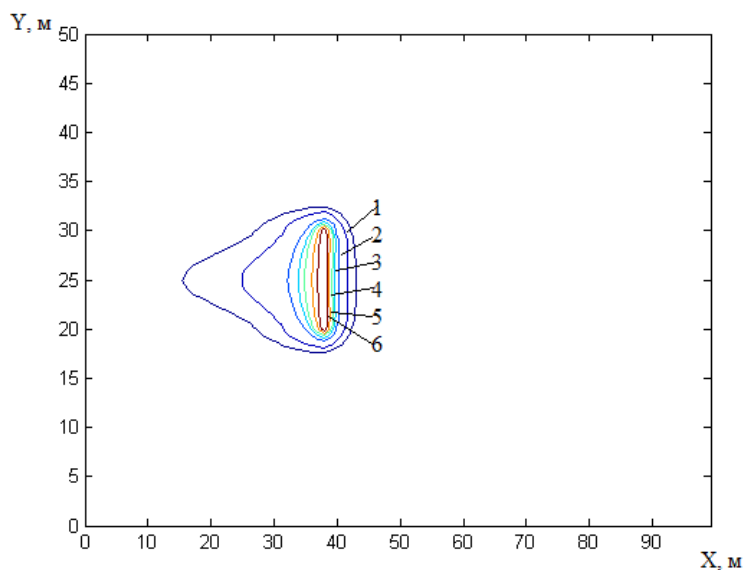
Как видно из графика, при увеличении скорости ветра, площадь минимально необходимого заслона нелинейно уменьшается, причем изменения в большей степени затрагивают размеры по оси Y. Это объясняется тем, что при небольшом ветре фронт пожара активно расширяется, а при увеличении скорости ветра остается относительно небольшим. Это видно, если сравнить изотермы во фронте пожара перед заслоном (рисунки 3.3 и 3.4).

Числами 1, 2, 3, 4, 5, 6 обозначены безразмерные изотермы 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, определяющиеся как  $t = T / T_0$ , где  $T_0 = 300$  К.

Изотермы, соответствующие скорости ветра 4 м/с образуют более широкие области, особенно это касается температуры 1500 К, при которой происходит воспламенение дерева.

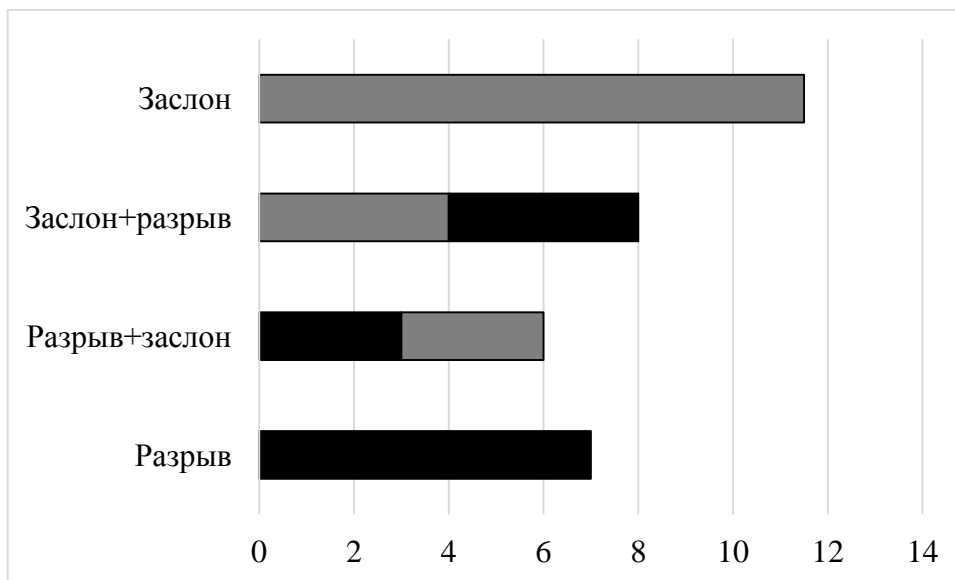


**Рисунок 3.3 – Распределение изотерм во фронте пожара при  $V=4$  м/с**

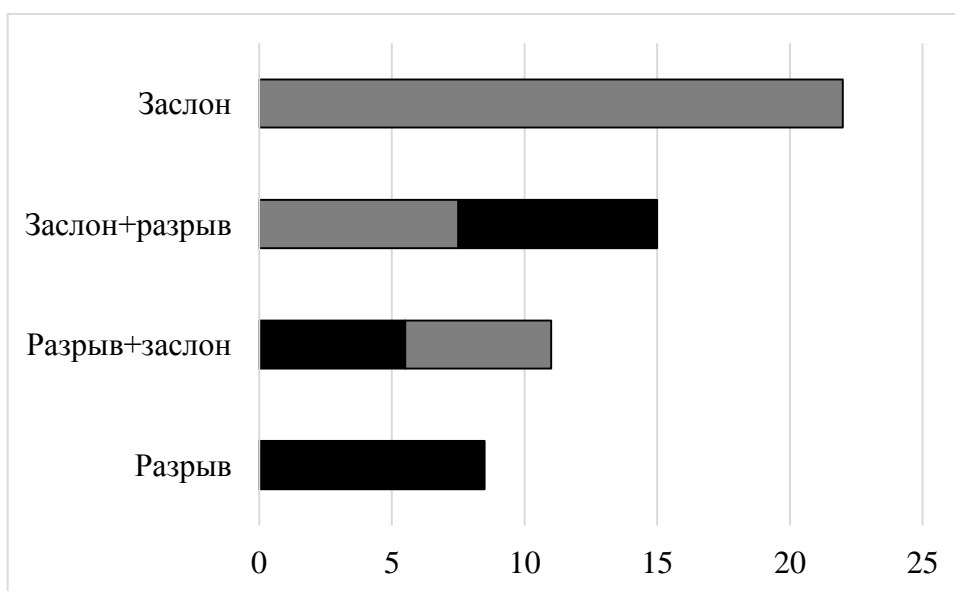


**Рисунок 3.4 – Распределение изотерм во фронте пожара при  $V=8$  м/с**

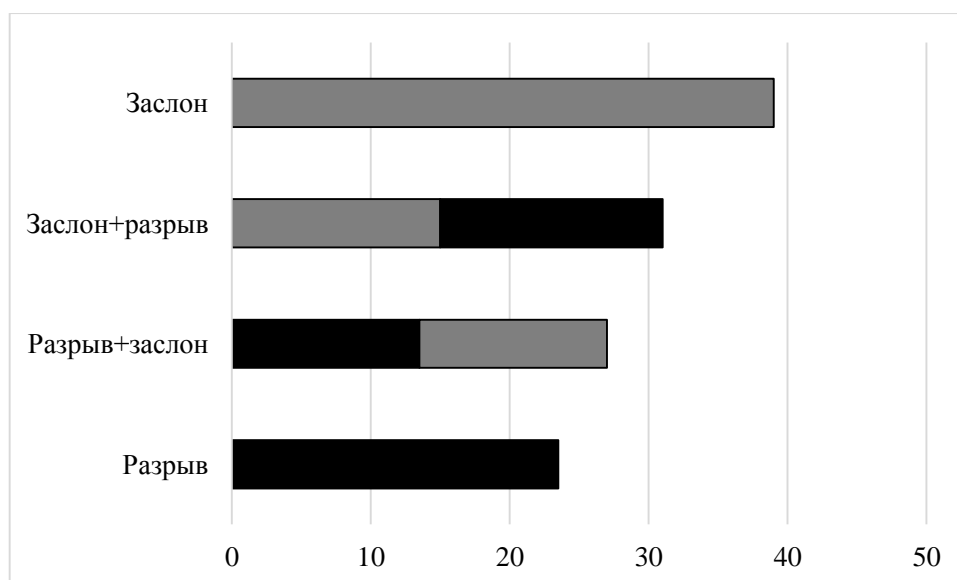
Сравним эффективность противопожарных разрывов, заслонов и их комбинации при ограничении распространения пожара. На рисунках 3.5 – 3.7 показаны результаты расчетов с разрывом, заслоном, разрывом + заслоном и заслоном + разрывом.



**Рисунок 3.5 – Сравнение размеров противопожарного разрыва и заслона, а также их комбинаций для параметров: запас ЛГМ – 0,4 кг/м<sup>3</sup>, влагосодержание хвойного массива – 0,5, скорость ветра 7 м/с, влагосодержание лиственного массива 1.**



**Рисунок 3.6 – Сравнение размеров противопожарного разрыва и заслона, а также их комбинаций для параметров: запас ЛГМ – 0,2 кг/м<sup>3</sup>, влагосодержание хвойного массива – 0,5, скорость ветра 7 м/с, влагосодержание лиственного массива 1.**



**Рисунок 3.7 – Сравнение размеров противопожарного разрыва и заслона, а также их комбинаций для параметров: запас ЛГМ – 0,2 кг/м<sup>3</sup>, влагосодержание хвойного массива – 0,2, скорость ветра 7 м/с, влагосодержание лиственного массива 1.**

При анализе данных видно, что противопожарный заслон имеет наименьшую эффективность, а противопожарный разрыв – наибольшую. При комбинировании данных методов, более эффективной оказалась комбинация разрыв + заслон. Это происходит потому, что понижение энергии, излучаемой во фронте пожара происходит по степенным законам, иными словами, основная часть энергии тратится в области, где нет ЛГМ и воспламенения быть не может. Энергии, которая достигает области лиственного массива, недостаточно для его воспламенения, особенно если влажность его велика.

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

Целью данной работы является создание двумерной математической модели тепломассопереноса от верхового лесного пожара на основе законов механики сплошных сред и экспериментальных данных, и определение безопасного противопожарного разрыва и заслона в зависимости от параметров среды и лесного массива.

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. Также существует ряд программ, нацеленных на решение определенной задачи, например, wind2, рассматривающая верховые лесные пожары в сопряженной постановке и разрывы в лесных массивах.

Программа bargier представляет интерес, поскольку несколько расширяет круг выполняемых задач, требует меньших затрат времени для расчетов.

### **4.1. Предпроектный анализ**

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

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

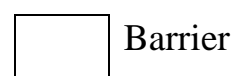
Учитывая область наших исследований, которые направлены на обеспечение пожарной и экологической безопасности, можно выделить следующие сегменты рынка (таблица 4.1)

- высшие учебные заведения;
- научно-исследовательские институты;
- специалисты лесной охраны;



Таблица 4.1. Карта сегментирования рынка

	Параметры программ		
	Бесплатная версия	Оперативность	Расчет заслонов
ВУЗ			
НИИ			
МЧС			
Лесная охрана			



Таким образом, видно, что основными конкурентными преимуществами программы barrier становится наличие бесплатной версии, оперативность и возможность расчета противопожарных заслонов.

Наиболее рациональным считаю ориентирование на МЧС и организации лесной охраны. Внедрение в научно-исследовательские организации требует наличия сертификатов точности, проверок и поверок, а использование в ВУЗах возможно, но более рационально использовать иные программы, с более широким спектром выполняемых задач для использования в различных областях.

#### **4.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

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 PHOENIX (K<sub>1</sub>) и wind2 (K<sub>2</sub>).

Таблица 4.2. – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии	Вес	Баллы			Конкурентосп особность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Повышение производительности труда	0,2	5	4	3	1	0,8	0,6
Удобство эксплуатации	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
Потребность в вычислительных ресурсах	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
Время, затраченное на 1 расчет	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
Выполняемые задачи	0,1	3	5	2	0,3	0,5	0,2
Экономические критерии эффективности							
Цена	0,2	5	2	5	1	0,4	1
Конкурентоспособность	0,1	4	5	3	0,4	0,5	0,3
Послепродажное обслуживание	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Итого	1	36	35	28	4,6	4,1	3,6

Анализ конкурентных технических решений проводился по формуле:

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

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V<sub>i</sub> – вес показателя (в долях единицы);

B<sub>i</sub> – балл i-го показателя.

После проведенного анализа, можно сделать следующие выводы:

1. Программа bartier являет собой оптимальное соотношение функциональности и упрощения и способна выполнять различные задачи за короткий промежуток времени.

2. Ближайшим конкурентом является Phoenix, однако в рамках выбранных сегментов рынка, его достоинства (математический аппарат, многофункциональность) не играют большой роли. На первое место встает

оперативность, простота использования и интуитивно понятный интерфейс. Также уязвимость заключается в высокой цене – необходимо постоянно покупать и обновлять лицензию, что влечет дополнительные расходы. В то же время лицензия для barrier стоит дешевле и приобретается один раз.

### **4.1.3. SWOT – анализ**

SWOT-анализ проводится в несколько этапов.

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

Сильные стороны:

C1 – высокая скорость работы.

C2 – минимальное вмешательство пользователя.

C3 – низкая стоимость.

C4 – не требует специальных знаний при использовании.

C5 – совместимость с другими программами.

Слабые стороны:

Сл1 – программа работает только на английском языке.

Сл2 – ограниченный круг решаемых задач.

Сл3 – отсутствие визуализации.

Сл4 – внесение изменений в программу невозможно.

Сл5 – отсутствие графической оболочки.

Возможности:

V1 – возможно использование в научных, образовательных и прикладных целях.

V2 – решение задач как с разрывами, так и с заслонами.

V3 – широкомасштабное продвижение в структурах МЧС при взаимодействии кафедры и ЦУКС.

Угрозы:

У1 – наличие программ с аналогичным функционалом.

У2 – без финансирования становится невозможным приобретение программы.

У3 – создание более совершенный программ – быстрых и точных.

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				
		С1	С2	С3	С4	С5	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
Возможности проекта	В1	+	0	+	0	0	-	-	-	-	+
	В2	+	0	-	0	+	-	+	+	-	-
	В3	+	+	-	-	-	-	0	+	-	-
Угрозы для проекта	У1	+	0	+	+	+	0	+	+	0	+
	У2	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-
	У3	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+

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

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

Таблица 4.4 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1 – высокая скорость работы.</p> <p>С2 – минимальное вмешательство пользователя.</p> <p>С3 – низкая стоимость.</p> <p>С4 – не требует специальных знаний при использовании.</p> <p>С5 – совместимость с другими программами.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1 – программа работает только на английском языке.</p> <p>Сл2 – ограниченный круг решаемых задач.</p> <p>Сл3 – отсутствие визуализации.</p> <p>Сл4 – внесение изменений в программу невозможно.</p> <p>Сл5 – отсутствие графической оболочки.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1 – возможно использование в научных, образовательных и прикладных целях.</p> <p>В2 – решение задач как с разрывами, так и с заслонами.</p> <p>В3 – широкомасштабное продвижение в структурах МЧС при взаимодействии кафедры и ЦУКС.</p>	<p>В1С1С3; В2С1С5;</p> <p>Высокая скорость работы программы и низкая стоимость позволяют использовать программу как в научных, так и в прикладных целях. Важным направлением продвижения является МЧС, что становится возможным ввиду описанных преимуществ</p>	<p>В1Сл5; В2Сл2Сл3; В3Сл3;</p> <p>Отсутствие визуализации и получение итоговых результатов только в числовой форме может отпугнуть потенциальных потребителей продукта. Ограниченная область применения программы позволяет более глубоко проработать тематику и выйти в лидеры на рынке программ для решения конкретной задачи.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1 – наличие программ с аналогичным функционалом.</p> <p>У2 – без финансирования становится невозможным приобретение программы.</p> <p>У3 – создание более совершенных программ – быстрых и точных.</p>	<p>У1У3С1С3С4С5; У2С3С5;</p> <p>Отсутствие финансирования приведет не только к затруднению приобретения данной программы, но и к невозможности ее полноценной эксплуатации – невозможности приобретения программ для визуализации.</p> <p>Продвижение на рынок необходимо осуществлять, опираясь и совершенствуя сильные стороны.</p>	<p>У1У3Сл2Сл3Сл5; У2Сл2.</p> <p>Наличие программ с одинаковым и более широким функционалом может привести к потере части потребителей. Необходимо усиливать преимущества и устранять недостатки.</p>

#### 4.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

Для оценки готовности проекта к коммерциализации необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	2
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	2
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	2	2
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	1	1
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	2
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	2	2
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	<b>22</b>	<b>22</b>

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (4.2)$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Результаты оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации на данном этапе показывают перспективность ниже среднего. Причиной этому является короткий срок работы с данным программным обеспечением и завершение исследования пока только лишь начальной стадии. Для продвижения на рынок необходимо разработать бизнес-план для данной работы и осуществить привлечение специалистов для углубленного и всестороннего изучения возможностей ПО barrier.

#### **4.1.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

Выделяют следующие методы коммерциализации научных разработок.

1. *Торговля патентными лицензиями;*
2. *Передача ноу-хау;*
3. *Инжиниринг;*
4. *Франчайзинг;*
5. *Организация собственного предприятия.*
6. *Передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия.*
7. *Организация совместного предприятия.*
8. *Организация совместных предприятий, работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».*

При продвижении такой разработки, как программное обеспечение, наиболее рациональным, на мой взгляд, является торговля патентными лицензиями, ввиду специфики продукта. Разработка программного обеспечения предполагает продажу права использования (в данном случае, бессрочно), но без права изменения или передачи иным лицам, то есть, имеется ввиду простая неисключительная беспатентная лицензия.

## 4.2. Инициация проекта

### 4.2.1 Цели и результат проекта

Таблица 4.6 – Заинтересованные стороны проекта

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидания заинтересованных сторон</b>
Научно-исследовательские институты, высшие учебные заведения	Проведение исследований в области пожарной безопасности, моделирования лесных пожаров.
Исследовательские лаборатории и службы мониторинга промышленных предприятий	Проведение исследований и разработок в области экологической и пожарной безопасности.
Проектировочные организации и институты	Проведение исследований и разработок в области экологической и пожарной безопасности.
Федеральное агентство лесного хозяйства, управление МЧС России	Использование результатов исследований с целью проведения профилактических мероприятий в области пожарной безопасности.  Возможность проведения оценки, анализа и прогноза лесных пожаров.

В таблице 4.7. представлена информация о целях проекта и критериях достижения целей.

Таблица 4.7 – Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	Создание модели верхового лесного пожара, и определение размеров безопасного противопожарного разрыва и заслона.
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Определение размеров безопасного противопожарного разрыва и заслона.
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Практическая значимость результата проекта реализуется в области пожарной безопасности, а именно: моделирование оценки воздействия верхового лесного пожара на лесной массив в присутствии разрывов и заслонов.



<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требования:</b>
	Использование программного обеспечения barrier для построения модели тепломассопереноса верхового лесного пожара.
	Определение размеров безопасного противопожарного разрыва и заслона. .
	Применения полученных результатов в области пожарной и экологической безопасности.

## 4.2.2 Организационная структура проекта

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

Таблица 4.8– Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, час.
1	Перминов В.А., профессор каф. ЭБЖ НИ ТПУ	Координация (руководитель проекта)	Координирование деятельности	84
2	Иванова М.В. магистрант каф. ЭБЖ НИ ТПУ	Выполнение (исполнитель проекта)	Выполнение исследовательской работы.	438
ИТОГО:				522

## 4.2.3 Ограничения и допущения проекта

В таблице 4.9 приведены факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта.

Таблица 4.9 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
1. Бюджет проекта	270 000 руб.
1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
2. Сроки проекта:	6.02.2017 –9.06.2017
2.1. Дата утверждения плана управления проектом	1.02.2017
2.2. Дата завершения проекта	9.06.2017

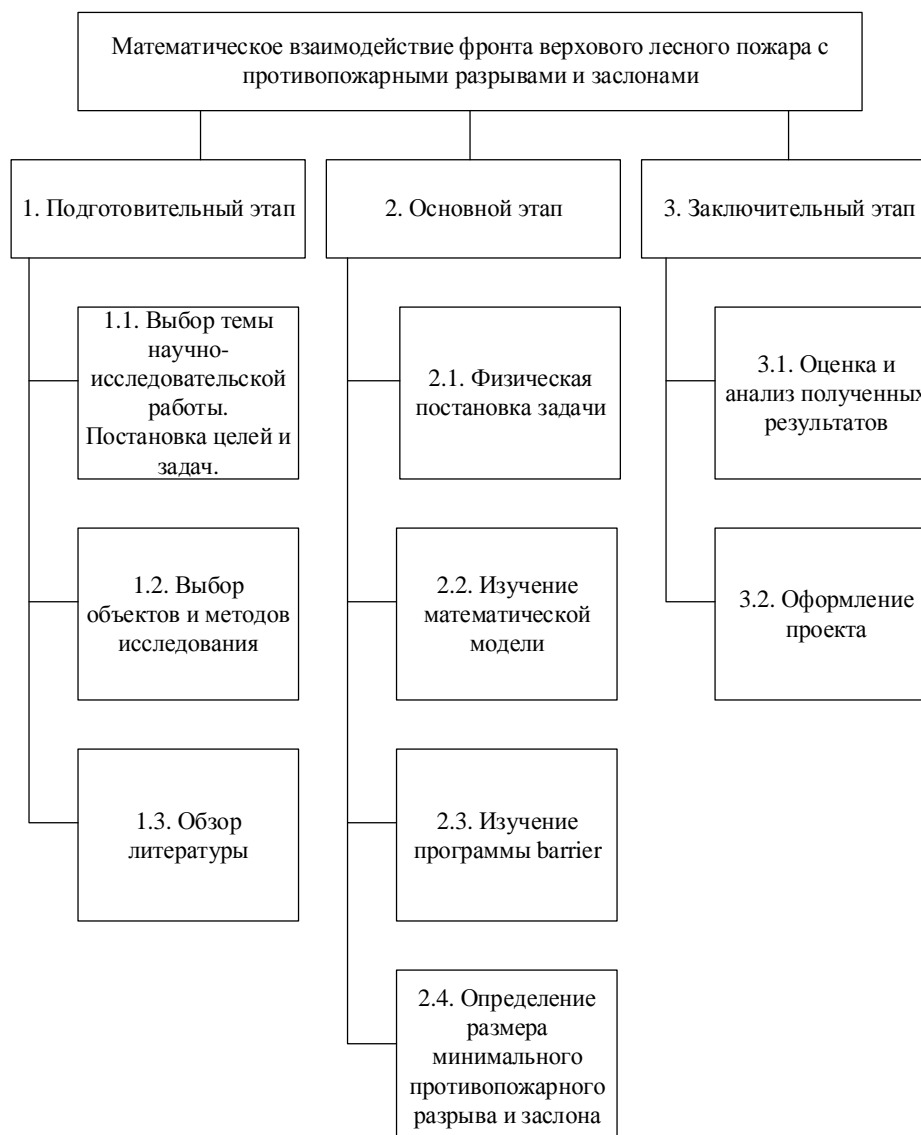
### **4.3.1 Иерархическая структура работ проекта**

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта (рисунок 4.1).

### **4.3.2 Контрольные события проекта**

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Данные сведены в таблицу 4.10.

Ключевыми событиями проекта является постановка цели и задач, аналитический обзор литературы по теме проекта, исследование в период прохождения научно-производственной практики, оценка и анализ полученных результатов и оформление проекта.



**Рисунок 4.1. – Иерархическая структура проекта**

*Таблица 4.10 – Контрольные события проекта*

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Выбор темы научно-исследовательской работы. Постановка цели и задач.	6.02.17-10.02.17	Приказ
2	Анализ литературы.	16.02.17-13.03.17	Отчет по НИР.
3	Исследования в период прохождения научно-производственной практики.	30.01.17-10.03.17	Отчет по научно-производственной практике. Защита НПП.
4	Оценка и анализ полученных результатов, оформление проекта.	11.05.17-9.06.17	Предзащита – участие в конференции. Защита проекта.

### 4.3.3 План проекта

В рамках планирования научного проекта был построен линейный график проекта (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1.1.	Выбор темы научно-исследовательской работы. Постановка целей и задач.	5			Иванова М.В. Перминов В.А.
1.2.	Выбор объектов и методов исследования	3			Иванова М.В. Перминов В.А.
1.3.	Обзор литературы	15			Иванова М.В.
2.1.	Физическая постановка задачи	7			Иванова М.В. Перминов В.А.
2.2.	Изучение математической модели	7			Иванова М.В. Перминов В.А.
2.3.	Изучение программы barrier	5			Иванова М.В. Перминов В.А.
2.4.	Определение размера минимального противопожарного разрыва и заслона	20			Иванова М.В.
3.1.	Оценка и анализ полученных результатов	7			Иванова М.В. Перминов В.А.
3.2.	Оформление проекта	15			Иванова М.В.
Итого		84			

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

$$T_{ki} = T_{pi} \times k_{\text{кал}}, \quad (4.3)$$

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:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.4)$$

где:  $T_{\text{кал}} = 365$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}} = 95$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 14$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 95 - 14} = 1.43.$$

Диаграмма представлена в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код работы	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал.дни	Продолжительность выполнения работ														
				февраль			март			апрель			май			июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1		
1.1	Выбор темы научно-исследовательской работы. Постановка целей и задач.	Руководитель, студент	7		■	■												
1.2	Выбор объектов и методов исследования	Руководитель, студент	4			■												
1.3	Обзор литературы	Студент	21			■	■	■	■	■								
2.1	Физическая постановка задачи	Руководитель, студент	10						■	■								
2.2	Изучение математической модели	Руководитель, студент	10						■	■								
2.3	Изучение программы barrier	Руководитель, студент	7								■							
2.4	Определение размера минимального противопожарного разрыва и заслона	Студент	28								■	■	■	■				
3.1	Оценка и анализ полученных результатов	Руководитель, студент	10													■	■	
3.2	Оформление проекта	Студент	21														■	■

■ Студент

■ Руководитель

### 4.3.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых-расходов, необходимых для его выполнения.

#### 4.3.4.1. Расчет материальных затрат

В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Расчет затрат на материалы представлен в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Затраты на материалы

№ п/п	Наименование	Ед. измерения	Кол-во	Цена за единицу, руб	Сумма, руб.
1	Бумага	лист	100	0,5	50
2	Распечатка материалов	лист	200	2	400
3	Канцелярские принадлежности	набор	1	200	200
Всего за материалы, руб					650
Транспортно-заготовительные расходы (5%), руб					33
Итого, руб					683

#### 4.3.4.2. Затраты на оборудование и электроэнергию

Определение стоимости оборудования происходит по ценам из открытых источников.

Стоимость электроэнергии рассчитывается по формуле 4.2

$$C_{\text{эл}} = W_y \cdot T_g \cdot S_{\text{эл}}, \quad (4.5)$$

где  $W_y$  – установленная мощность, кВт (0,35 кВт);

$T_g$  – время работы оборудования, час;

$S_{\text{эл}}$  – тариф на электроэнергию (2,66 руб/кВт·ч).

Затраты на потребляемую электроэнергию составляют:

$$C_{\text{эл}} = 0,35 \times 438 \times 2,66 = 408 \text{ руб.}$$

Таким образом, статьи по расходам на оборудование и электроэнергию сведены в таблицу 4.14

Таблица 4.14 – Затраты на оборудование и электроэнергию

№ п/п	Наименование	Ед. измерения	Кол-во	Цена за единицу, тыс.руб	Сумма, тыс.руб.
1	Компьютер	шт	1	30	30
2	Интернет, 5 мб/с	пакет	5	0,35	1,75
3	Flash-накопитель	шт	1	0,4	0,4
Всего за материалы, руб					32,15
Транспортно-заготовительные расходы (5%), руб					1,6
Электричество					0,4
Итого, руб					34.16

#### 4.3.4.3. Основная заработная плата

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

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

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

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.



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

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

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

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

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

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

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

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

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней (таблица 4.15).

Таблица 4.15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	95	95
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	24
- невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	208	232

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot k_p \quad (4.9)$$

где  $Z_b$  – базовый оклад, руб.;

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

Учитывая, что магистрант получает 100 руб/час, расчет заработной платы проводится для срока, в течение которого работали магистрант и руководитель соответственно. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_b$ , руб.	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	36800	1,3	47840	2392	29	69368
Магистрант	12900	1,3	16770	810	84	68040

#### 4.3.4.4. Дополнительная заработная плата

Размер дополнительной заработной платы рассчитывается, исходя из среднего значения в 12; от основной заработной платы. Тогда, суммарные выплаты руководителю и магистранту отражены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Заработная плата исполнителей проекта

Заработная плата	Руководитель	Магистрант
Основная зарплата, руб.	69368	68040
Дополнительная зарплата, руб.	8324	8165
Зарплата исполнителя, руб.	77692	76205
Итого по статье, руб.	153897	

#### 4.3.4.5. Отчисления на социальные нужды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Размер отчислений рассчитывается по формуле 4.10.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \times (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (4.10)$$

В 2017 году размер тарифов страховых взносов равен:

В ПФР = 22%;

В ФСС = 2,9%;

В ФФОМС = 5,1%.

Подобные процентные ставки используются потому, что исполнение проекта осуществляется без заключения договора подряда, таким образом сниженная ставка для ТПУ не может использоваться.

Дополнительно следует учесть взносы на страхование от несчастных случаев, которое для учреждений высшего образования составляет 0,2%

Тогда, общая сумма отчислений во внебюджетные фонды равна

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \times 153897 = 46477 \text{ руб.}$$

#### 4.3.4.6 Накладные расходы

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

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

В связи со спецификой разрабатываемой тематики, коэффициент накладных расходов можно принять равным 0,2.

$$\text{Тогда } C_{\text{накл}} = 0,2 \times 153897 = 30779 \text{ руб.}$$

На основании вышеописанных расчетов по отдельным статьям, плановая себестоимость проекта представлена в таблице 4.18

Таблица 4.18 – Группировка затрат по статьям

Наименование статей затрат	Сумма, руб
Материалы	683
Оборудование	34160
Оплата труда работников, непосредственно занятых созданием НИР	153897
Страховые взносы	46477
Накладные расходы	46169
Итого себестоимость ВКР	281386

### 4.3.5 Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности (табл. 4.19)

Таблица 4.19 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Руководитель	Магистрант
Подготовительный этап	О	И
Основной этап	О	И
Заключительный этап	У С О	И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

*Ответственный (О)*– лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход.

*Исполнитель (И)* – лицо, выполняющее работы в рамках этапа проекта.

*Утверждающее лицо (У)* – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение).

*Согласующее лицо (С)* – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

### 4.3.6 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информацию по данному разделу сведена в таблицу 4.20.

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

### 4.4.1 Оценка социальной эффективности исследования

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в

целом или отдельных категорий населений, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты. В таблице 4.21 приводится оценка социальной эффективности программы barrier для построения модели тепломассопереноса верхового лесного пожара с противопожарными разрывами и заслонами.

Таблица 4.20 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятн. наступл.	Уровень риска	Влияние риска	Способы смягчения	Условия наступления
1	Некорректное восприятие интерфейса на английском языке	Затруднения при использовании	1	2	низкий	Изучение английского языка	Отсутствие знаний языка
2	Ошибочные входные данные	Неверные результаты	2	5	средний	Контроль за входящими данными	Ошибка оператора
3	Неверная обработка численных результатов	Ошибка в интерпретации	3	4	средний	Логический анализ полученных данных	Ошибка оператора
4	Отсутствие программы для визуализации	Невозможность визуализации и затруднения в интерпретации	3	5	высокий	Покупка лицензии	Истечение срока действия или отсутствие лицензии
5	Ошибка в коде программы	Неверные результаты	3	5	высокий	Тестовые проверки программы на известных решениях задач	Ошибка оператора

Таблица 4.21 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Дорогостоящий эксперимент по моделированию лесных пожаров.	Низкая стоимость ПО barrier по сравнению с затратами на эксперимент.
Невозможность проведения эксперимента в силу большого риска и невозможности получения модели на практике, особенно актуально для верховых лесных пожаров.	Получение модели по средствам компьютера без риска и опасности для здоровья людей и окружающей среды.
Большие затраты времени на постановку эксперимента. Сложная, а порой и невозможная постановка эксперимента.	Существенная экономия времени, наглядность и визуализация результатов моделирования.

## **Вывод.**

В данном разделе представлены необходимые и достаточные шаги для управления научным проектом.

Произведено сегментирование рынка. Основными потребителями продукта являются МЧС и организации лесной охраны. Анализ конкурентных технических решений показал, что программа конкурентоспособна, обладает рядом преимуществ над ближайшим конкурентом - программой для моделирования потоков газа и жидкости Phoenix.

Проведен SWOT-анализ. Выявлена и описана корреляция между сильными и слабыми сторонами, возможностями и угрозами. Определены направления дальнейшего развития.

Оценка готовности проекта к коммерциализации показала перспективность ниже среднего. Это связано с коротким сроком работы с программным обеспечением и начальной стадии завершения исследования. Методом коммерциализации принята торговля патентными лицензиями.

Определены цели, критерии приемки результата, требования к результату, заинтересованные лица и их ожидания.

Организационная структура проекта состоит из двух человек – руководителя Перминова В.А и исполнителя (магистранта) Ивановой М.В. В качестве ограничений проекта выступают бюджет и сроки исполнения.

Иерархическая структура проекта состоит из трех этапов – подготовительного, основного и заключительного, каждый из которых подразделяется на 3-4 шага.

Контрольными событиями проекта являются выбор темы, анализ литературы, исследования в период практики и оценка и анализ полученных результатов.

Построен линейный график проекта, с учетом длительности, начала и окончания, состава участников. На основании этих данных составлен календарный план-график проведения НИОКР.

Произведена оценка бюджета проекта. Основными статьями расходов являются затраты на материалы, оборудование и электроэнергию, заработная плата, отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы. Общая сумма затрат составляет 281386 рублей.

Составлен реестр рисков проекта. Наибольшее влияние имеют риски, связанные с отсутствием программы для визуализации и ошибки в коде программы.

Таким образом, в рамках данного раздела были выполнены все поставленные задачи.



## 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Данная научно-исследовательская работа напрямую связана с математическим моделированием физико-химических процессов, а именно – взаимодействия фронта верхового лесного пожара с лесным массивом, при учете противопожарных разрывов и заслонов. Результатом работы является создание программы для расчетов параметров пожара при различных параметрах лесного массива, а также проведение расчетов для выявления зависимости размеров безопасных противопожарных разрывов и заслонов от условий среды и параметров лесного массива.

Создание подобных моделей в перспективе направлено на повышение защиты лесов от пожара, а также для повышения уровня пожарной безопасности объектов, находящихся в непосредственной близости от границы лесного массива. Соответственно, потребителями данного продукта являются структуры МЧС и организации лесной охраны.

В данном разделе рассматривается эксплуатация программного обеспечения *barrier*, при этом рабочее место представляет собой стандартное рабочее место, оснащенное персональным компьютером и находится в аудитории №120 8 корпуса ТПУ.

Целью составления настоящего раздела является разработка и оценка проектных решений, исключающих несчастные случаи в процессе работы и снижение вредных воздействий на окружающую среду.

Задачи ставятся следующие:

- Проанализировать вредные и опасные производственные факторы, которые воздействуют на сотрудника в процессе эксплуатации ПО *barrier*.
- Выявить уровень и пути воздействия на окружающую среду.
- Рассмотреть вероятные чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть при эксплуатации ПО *barrier*.
- Разработать организационные мероприятия по компоновке рабочей зоны.

## 5.1. Профессиональная социальная безопасность.

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

Вначале, необходимо определить, какие опасные и вредные факторы присущи данному типу работ и какие именно операции или процессы их вызывают. Идентификация потенциальных опасных и вредных производственных факторов проводится с использованием «Классификации вредных и опасных производственных факторов по ГОСТ 12.0.003–2015 [31]. Для математического моделирования основным видом работ является работа за компьютером, поэтому определять ОВПФ будем только для данного вида работ. Перечень ОВПФ, действующих на человека при проведении испытаний, приведен в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Опасные и вредные факторы при выполнении работ по математическому моделированию.

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа за ПЭВМ	Аномальные микроклиматические параметры воздушной среды		СанПиН 2.2.4.548-96 [32]

Продолжение таблицы 5.1

Чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания		СанПиН 2.2.4.1294-03 [33]; ГН 2.2.5.1313-03 [34]
Повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристики шума		СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [35]
	Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	ГОСТ 12.1.038-82 [36]
Повышенный уровень электромагнитных излучений		ГОСТ 12.1.006–84 [37] СанПиН 2.2.4.1191-03. [38]
Повышенная напряженность электрического поля		
Повышенная напряженность магнитного поля		
Отсутствие или недостаток необходимого естественного и искусственного освещения		СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [39]
Пониженная цветовая и световая контрастность		
Отраженная блескость		
Повышенная пульсация светового потока		
Рабочая поза сидя		ГОСТ 12.2.033-78 [40]
Напряженность труда		Р 2.2.2006-05 [41]

Рассмотрим подробнее каждый из опасных и вредных производственных факторов, уделяя особое внимание следующим пунктам:

- Источник возникновения
- Физико-химическая природа
- Допустимые нормы воздействия
- Предлагаемые средства защиты.

#### **5.1.1.1. Состояние воздушной среды**

К параметрам микроклимата относятся температура, влажность и скорость движения воздуха.

Нельзя выделить конкретный источник формирования опасности, связанной с неблагоприятными параметрами микроклимата. Это могут быть отсутствие кондиционирования воздуха, нагретые поверхности, нахождение большого числа людей на относительно небольшом пространстве.

Оптимальные параметры микроклимата – параметры, при воздействии которых организм пребывает в состоянии комфорта и не использует механизмы терморегуляции. Допустимые параметры – параметры, при систематическом воздействии которых у человека возникают быстро проходящие изменения в организме, не выходящие за пределы возможностей организма и не приводящие к серьезным нарушениям. Нахождение в оптимальных (допустимых) условиях увеличивает производительность труда, уменьшает риск заболеваемости и снижает утомляемость. Нахождение в неблагоприятных условиях приводит к таким заболеваниям, как различные формы простуды, радикулит, бронхит (в том числе, хронический) и иным, снижает работоспособность, ухудшает самочувствие.

Параметры состояния воздуха нормируются СанПиН 2.2.4.548 – 96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [32]. При нормировании параметров микроклимата учитывается тяжесть работ, период года и характеристику помещения по тепловому излучению.

Для работы за компьютером (легкая степень работ 1а) и в теплый период года параметры указаны в таблице 5.2

*Таблица 5.2 – Допустимые параметры микроклимата на рабочих местах производственных помещений*

Сезон года	Категория тяжести выполняемых работ	Температура поверхности, С <sup>0</sup>	Температура воздуха, С <sup>0</sup>	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/сек
Холодный	1а	19-26	20-25	15-75	0,1

В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата на организм человека в случаях возможного выхода фактических параметров за границы допустимых, необходимо применять меры защиты – системы местного кондиционирования воздуха, обогреватели, использование СИЗ - спецодежды, спецобуви, головных уборов, средств защиты рук, а также введение регламента работы. В производственных помещениях, где невозможно приведение фактических параметров к допустимым, рабочие места следует рассматривать как вредные.

#### **5.1.1.2. Загрязнение воздушной среды**

Наличие в воздухе рабочей зоны вредных веществ и недостаток аэроионов обуславливается как факторами, возникающими в процессе работы за компьютером и оргтехникой, так и факторами, не относящимися непосредственно к данной производственной деятельности.

В процессе работы основной причиной недостатка аэроионов является компьютер – генерируемое электростатическое поле деионизирует воздух.

Естественным решением является либо установка ионизаторов, либо проветривание.

Вредные вещества, а также пыль появляются ввиду многих причин – нагрева пластиковых элементов компьютера, работы оргтехники. Либо же имеет место несоблюдение норм при строительстве и отделке помещений.

Нормативы содержания веществ содержатся в ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны [34], допустимое содержание ионов в воздухе – СанПиН 2.2.4.1294-03 «Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений» [33].

### **5.1.1.3. Высокий уровень шума**

Шум – это звук, оцениваемый негативно и наносящий вред здоровью.

Для шума нет нижней границы благоприятного значения. Даже небольшой уровень шума рассеивает внимание, вызывает утомление и головную боль. Высокие уровни шума могут привести к частичной потере или ослаблению слуха, или полной глухоте. Источником шумового загрязнения при работе за компьютером могут служить неисправные системы охлаждения компьютера или воздуха, а также различные механизмы и устройства, находящиеся в соседних помещениях.

Различные виды шумов нормируются разными величинами. Для постоянного шума нормируются уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц, для прерывистого и импульсного, а также для непостоянного шума – эквивалентные уровни звукового давления для тех же октавных полос. Нормативными документами являются ГОСТ 12.1.003-83(1999) «ССБТ Шум. Общие требования безопасности», СНиП П-12-77. «Защита от шума» и СН 2.2.4/2.1.8.562-96. «Шум на рабочих местах [35], в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки». Допустимый

уровень шума для работающих в конструкторских бюро и лабораториях, согласно этим документам, приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Допустимые уровни звукового давления и эквивалентного уровня звука

(ГОСТ 12.1.003–83 с изм. 1999 г.)

Рабочее место	Уровень звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими значениями, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
						0	0	0	0	
Конструкторские бюро, лаборатории	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

При возникновении недопустимого уровня шума необходимо выполнить меры либо по ограничению распространения шума, либо по ограничению воздействия его на людей.

К первой группе мероприятий относятся различные короба, щиты, кожухи, установленные на оборудовании, изменение технологии или конструкции. Также необходимо своевременно проверять и смазывать механизмы. Ко второй группе относятся, в первую очередь, коллективные средства защиты – устройство звукоизоляции, защита расстоянием, архитектурно-планировочные изменения. Если иными средствами уменьшить воздействие шума не удастся, необходимо использовать индивидуальные средства защиты – наушники, беруши, шлемы.

#### 5.1.1.4. Освещение

При работе за компьютером именно глаза получают наибольшую нагрузку. Это связано с тем, что воздействие оказывает не только естественное и искусственное освещение, но и сам монитор. Неудовлетворительное освещение влияет не только на скорость работы, оно вызывает общее утомление организма, может привести к травматизму, а в перспективе – к нарушению или полной потере зрения.

Нормирование параметров освещенности в данном случае необходимо осуществлять при помощи двух документов - СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий» [39], который определяет наименьшую освещенность рабочих поверхностей в зависимости от вида производимой деятельности и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [43], который нормирует параметры при работе за компьютером.

Допустимые параметры приведены в таблицах 5.4 и 5.5

Таблица 5.4 – Допустимые визуальные параметры устройств отображения информации

Параметры	Допустимые значения
Яркость белого поля	Не менее 35 кд/м <sup>2</sup>
Неравномерность яркости рабочего поля	Не более ±20%
Контрастность (для монохромного режима)	Не менее 3:1
Временная нестабильность изображения (непреднамеренное изменение во времени яркости изображения на экране дисплея)	Не должна фиксироваться



Таблица 5.5 – Нормируемые параметры естественного и искусственного освещения

Помещения	Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности (Г – горизонтальная, В – вертикальная) и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение		
		КЕО $e_n$ , %		КЕО $e_n$ , %		Освещенность, лк		
		при верхнем или комбинированном	при боковом освещении	при верхнем или комбинированном	при боковом освещении	при комбинированном освещении		при общем
						всего	от общего	
Помещения для работы с дисплеями видеотерминалами, залы ЭВМ	Г-0,8	3,5	1,2	2,1	0,7	500	300	400
	Экран монитора: В-1,2	-	-	-	-	-	-	200

В СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» указаны следующие требования к параметрам освещения:

– Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 – 500 лк

– Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк

– Яркость светящихся поверхностей (окна, светильники и др.), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м<sup>2</sup>.

– Яркость бликов на экране ПЭВМ не должна превышать 40 кд/м<sup>2</sup> и яркость потолка не должна превышать 200 кд/м<sup>2</sup>.

– В качестве источников света при искусственном освещении следует применять преимущественно люминесцентные лампы типа ЛБ и компактные люминесцентные лампы (КЛЛ).

– Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.

При недостаточном освещении необходимо использовать более сильные лампы, увеличить количество источников света. При повышенной яркости необходимо снижать её, либо работать в спектральных очках.

#### **5.1.1.5. Психофизиологические факторы**

Работа за компьютером связана с длительными статическими нагрузками на позвоночник и динамическими нагрузками на кисти рук и пальцы. Не эргономичное положение тела приводит не только к хроническим проблемам со здоровьем, но и снижает производительность труда, ухудшает восприятие информации, внимание, увеличивает утомляемость. Длительное умственное перенапряжение, связанное с работой по математическому моделированию, ведет к психосоматическим проблемам – головной боли, утомляемости, нервозности.

Для снижения отрицательного воздействия на организм этих вредных факторов, необходимо выполнять некоторые мероприятия. Важно обеспечивать эргономичное место работы – иметь стулья со спинкой и подлокотниками и регулируемой высотой, иметь достаточно просторный стол для удобного размещения монитора, клавиатуры и документов.

Для снижения умственного напряжения необходимо устраивать перерывы в работе (также это важно для сохранения зрения), использовать возможности цветового оформления (например, окраска стен в неяркий синий цвет). Будет нелишним выдача работникам памятки с различными упражнениями для снижения напряжения спины, ног, шеи, глаз.

### **5.1.2. Анализ опасных производственных факторов**

#### **5.1.2.1. Электробезопасность**

Источниками опасностей в данном случае являются токоведущие части электрооборудования – компьютера и периферийных устройств. Анализ опасных факторов – опасные уровни статического напряжения и опасность замыкания цепи на человека будет приведен в следующем разделе.

Повышенный уровень электромагнитных излучений, высокая напряженность электрического и магнитного полей относятся к вредным факторам. Эти воздействия нормируются следующим образом:

Таблица 5.6 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Для обеспечения защиты сотрудника от электромагнитных излучений необходимо организовать правильное размещение и порядок работы за компьютером. Мониторы следует размещать так, чтобы сзади и сбоку в непосредственной близости не находились люди. Если планируется не использовать компьютер некоторое время, то его лучше отключить. Также во время перерывов работники не должны находиться возле компьютеров.

Опасность поражения электричеством является главной опасностью при работе за компьютером. Существует не только вероятность поражения самого человека, возможно возникновение пожара вследствие замыкания электрической цепи, возможна порча ценного оборудования. Поэтому электробезопасности уделяется большое внимание.

Оценка и анализ электробезопасности в лаборатории осуществляется при помощи «Правил устройства электроустановок» [43].

Вначале необходимо определить класс помещения по электробезопасности. Поскольку в аудитории нет агрессивных веществ, токопроводящей пыли и полов, и повышенной влажности (свыше 75%),

высокой температуры (свыше 35°C) и нет возможности одновременного прикосновения к имеющим связь с землей металлоконструкциям и металлическим частям электрооборудования, то помещение можно отнести к помещениям без повышенной опасности. [43]

Воздействие электромагнитных полей на человека проявляется в виде возникновения болезней в наиболее ослабленных системах организма – нервной, иммунной, эндокринной. Увеличивается утомляемость, нервозность, возбуждение ЦНС.

Согласно ПУЭ и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [43], при работе с компьютерами для обеспечения электробезопасности следует соблюдать правила:

–Электрооборудование, имеющее контакты для подключения заземления, должно быть заземлено, а помещения, где размещаются рабочие места с ПЭВМ (компьютерами), должны быть оборудованы защитным заземлением (занулением) в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации оборудования;

–Все крышки и защитные панели должны находиться на своих местах (при отсутствии крышки или защитной панели эксплуатация электрооборудования не допускается);

–При работе с электрооборудованием не допускать попадания влаги на поверхность электрооборудования, а также запрещается работать на электрооборудовании влажными руками;

–Вентиляционные отверстия электрооборудования не должны быть перекрыты находящимися вплотную стенами, мебелью, посторонними предметами;

–Выдергивание штепсельной вилки электроприбора необходимо осуществлять за корпус штепсельной вилки, при необходимости придерживая другой рукой корпус штепсельной розетки;

–Подключение и отключение разъемов компьютеров и оргтехники должно производиться при отключенном питании (за исключением подключения и отключения USB-устройств);

–Удаление пыли с электрооборудования должно производиться в отключенном от электрической цепи состоянии;

–Перед использованием электроприборов необходимо проверить надёжность крепления электророзетки, свериться с номиналом используемого напряжения;

–В помещениях, в которых используется напряжение двух и более номиналов, на всех штепсельных розетках должны быть надписи с указанием номинального напряжения;

–Корпуса штепсельных розеток и выключателей не должны содержать трещин, оплавлений и других дефектов, способных снизить защитные свойства или нарушить надёжность контакта;

–Недопустимо использовать штепсельные разъёмы в случае существенного нагревания штепсельной розетки или вилки электроприбора при эксплуатации;

–Кабели (шнуры) электропитания не должны содержать повреждений изоляции, сильных изгибов и скручиваний;

Персонал, работа которого связана с возможностью поражения электрическим током, должен пройти обучение с присвоением I группы по электробезопасности.

## **5.2. Экологическая безопасность**

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

### **5.2.1. Утилизация электроники.**

Утилизация электроники контролируется по двум причинам. Во-первых, на обычных свалках под открытым небом составляющие компьютера разрушаются и в окружающую среду поступают такие вещества как свинец, сурьма, кадмий, мышьяк, а также соединения на основе поливинилхлорида и фенолформальдегида. А во-вторых, в состав компьютеров старых образцов входит некоторое количество драгоценных металлов (в основном, золота), перемещение и оборот которых находится под государственным контролем. Утилизация компьютеров и оргтехники производится согласно методике, утвержденной государственным комитетом РФ по телекоммуникациям [44]. Согласно этой методике, существуют 4 этапа проведения работ – информационное обеспечение, заключение договоров, разборка техники и реализация партий лома. При этом в рамках договора реализуются не только элементы, содержащие драгоценные металлы, но и ломы цветных и черных металлов и пластмасса для вторичной переработки (до 95%). Таким образом выполняется сразу две задачи – сбережение ресурсов и уменьшение количества твердых отходов.

### **5.2.2. Утилизация люминесцентных ламп.**

Что касается люминесцентных ламп, то тут ситуация двоякая. С одной стороны, эти лампы считаются экономичными и энергосберегающими, что, несомненно, является плюсом, поскольку массовое использование энергосберегающих ламп несколько снизит потребность в электроэнергии. С другой стороны, в люминесцентных лампах используется ртуть, что переводит отработанные лампы из обычных отходов в опасные, требующие специальной утилизации. Для юридических лиц необходимо заключать контракты с компаниями, занимающимися утилизацией токсичных отходов, что несет дополнительные расходы.

Стоит упомянуть также о том, что компьютерное оборудование должно соответствовать различным стандартам безопасности для обеспечения в том числе, и защиты окружающей среды. К таким стандартам можно отнести:

FCC - сертификат, устанавливающий нормативы электромагнитных и радионаводок, создаваемых оборудованием. Компьютер относится к классу В.

MPR-II – стандарт, определяющий предельные уровни электромагнитного излучения для мониторов.

ТСО-07 – экологический стандарт, регламентирующий многие факторы – эргономику, электромагнитные излучения, акустический шум, электробезопасность, экологическую безопасность, экономию электроэнергии.

EPA Energy Star – стандарт, распространяющийся на энергопотребление и обеспечивающий снижение потребления энергии в период бездействия.

### **5.2.3. Другие воздействия**

Стоит сказать и про некоторые другие воздействия данного вида работ на окружающую среду. Это утилизация твердых бытовых отходов и пользование коммунально-энергетическими сетями. Физические и юридические лица обязаны платить налог на утилизацию ТБО, пользование КЭС и очистку сточных вод.

Для уменьшения воздействия на окружающую среду этими путями можно использовать рациональный порядок пользования КЭС: не оставлять открытыми краны, не использовать электроэнергию там, где это не нужно (например, оставлять освещение после ухода), применять энергосберегающие лампы.

Для облегчения утилизации ТБО необходимо сортировать отходы.

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

Для лаборатории, находящейся в здании промышленного корпуса, наиболее вероятными и опасными являются следующие ЧС:

- Пожары (взрывы) в зданиях (сооружениях);
- Внезапное обрушение зданий;
- Повреждение зданий вследствие военных действий.

#### **5.3.1 Пожарная и взрывная безопасность**

Согласно ФЗ №123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [45], помещение относится к классу Ф 4.3 (здание органов управления учреждений, проектно-конструкторских организаций, информационных и редакционно-издательских организаций, научных организаций, банков, контор, офисов.

Основными причинами пожаров и взрывов являются электроустановки (ПЭВМ) – искры при замыкании электрической цепи, неисправности в розетках и проводке, накопление статического электричества на токопроводящих элементах. Также возможны и другие причины возгорания и взрывов, но они маловероятны (неосторожное обращение с огнем, курение на рабочем месте, размещение легковоспламеняемых конструкций и материалов вблизи отопительных приборов, удар молнии).

Способы устранения причин пожаров могут быть следующие:

Предупредительные (организационные):

- Правильный выбор электрооборудования и способов его монтажа, систематический ремонт и контроль неисправности;
- Изолирование отопительных приборов от сгораемых конструкций и материалов,
- Запрещение хранения, транспортирования и содержания на рабочих местах огнеопасных жидкостей и растворов
- Предупреждение появления искровых разрядов статического электричества;



- Правильная организация заземления;
- Обучение персонала правилам пожарной безопасности;
- Размещение планов эвакуации,

Технические:

–Обеспечение первичными средствами пожаротушения. Согласно [46], в помещениях с возможными пожарами класса А и Е (горение твердых материалов и электроустановок) необходимо иметь 2 порошковых огнетушителя.

–Обеспечение сигнализации и оповещения. Для этого можно использовать охранно-пожарную сигнализацию, которая обеспечит своевременное обнаружение возгорания, включит оповещение и передаст сигнал на пункт управления.

#### **5.4. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.**

Исходя из рассматриваемого рабочего места, мероприятия по компоновке рабочей зоны должны заключаться только в повышении эргономичности при работе за компьютером. Основными нормативными документами, содержащими нормы охраны труда за компьютером, являются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [42] и ГОИ Р-45-084-01 [47].

Согласно вышеуказанным документам, рабочие места с компьютерами должны размещаться таким образом, чтобы расстояние от экрана одного видеомонитора до тыла другого было не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м.

Рабочие места должны располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, преимущественно слева. Оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков и др.

Рабочая мебель для пользователей компьютерной техникой должна отвечать следующим требованиям:

– высота рабочей поверхности стола должна регулироваться в пределах 680 - 800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм;

– рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, глубиной на уровне колен не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног не менее 650 мм;

– рабочий стул (кресло) должен быть подъемно - поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также - расстоянию спинки от переднего края сиденья;

– рабочее место должно быть оборудовано подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20 градусов; поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм;

– рабочее место с персональным компьютером должно быть оснащено легко перемещаемым пюпитром для документов.

Для нормализации аэроионного фактора помещений с компьютерами необходимо использовать устройства автоматического регулирования ионного режима воздушной среды (например, аэроионизатор стабилизирующий "Москва-СА1").

Женщины со времени установления беременности и в период кормления грудью к выполнению всех видов работ, связанных с использованием компьютеров, не допускаются.

#### **5.4.1. Расчет искусственного освещения**

Для работы за компьютером очень важно выбрать правильное и рациональное освещение. Слишком яркие или слишком тусклые лампы вызывают утомление, снижают работоспособность. Лампа, направленная на экран, вызывает блики, которые мешают в работе. Также необходимо учесть, что работа ведется не только на компьютере, но и на обычной бумаге.

С точки зрения экологичности, безопасности и эргономичности, следует использовать люминесцентные лампы для организации общего освещения, а для местного – светодиодные или люминесцентные.

Расчет освещения ведется для аудитории 120 8 корпуса. Размеры помещения 9х6х4 м. Для освещения используется 8 светильников типа ЛВО34. Требуемый уровень освещенности – 300 лк [39]. Расчет освещения ведется согласно методическому пособию [48]

Расположение светильников отражено на рисунке (5.1)

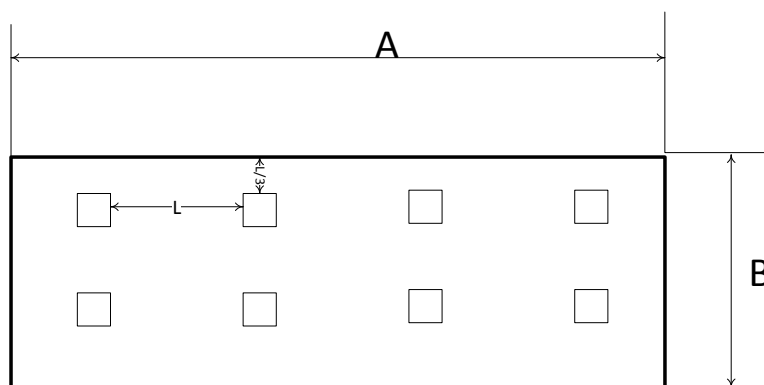


Рисунок 5.1. Расположение светильников в помещении

Расчет светового потока лампы ведется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_H \times S \times K_3 \times Z}{N \times \eta} \quad (5.1)$$

$\Phi$  – световой поток, лм

$E_H$  – нормированная минимальная освещенность, лк;

$S$  – площадь помещения, м<sup>2</sup>

$K_3$  - коэффициент запаса;

$Z$  – коэффициент неравномерности (для люминесцентных ламп = 1,1);

$N$  – число ламп в помещении

$\eta$  – коэффициент использования светового потока.

Минимальная освещенность, согласно [39] – 300 лк.

Площадь помещения  $S=A*B=9*6=54$  м<sup>2</sup>

$K_3$  определяем по таблице. Значение коэффициента равно 1,5 (т.к. помещение с малым выделением пыли);

N определяем как количество светильников, умноженное на число ламп в нем. Для данного помещения оно равно  $8 \cdot 4 = 32$ .

Чтобы определить  $\eta$ , необходимо найти  $i$  – индекс помещения.

$$I = \frac{S}{h + (A+B)}, \quad (5.2)$$

где  $h$  – расстояние от подвеса до рабочей поверхности.

$$h = H - h_{\text{рабочей поверхности}} - h_{\text{свесы}} = 4 - 0,7 - 0,2 = 3,1 \text{ м.}$$

$$\text{Тогда } i = \frac{27}{3,1 + (9+6)} = 1,49;$$

Коэффициенты отражения потолка и стен субъективно равны 70% и 56% соответственно.

Согласно таблице, коэффициент использования равен 50%. Тогда

$$\Phi = \frac{300 \times 54 \times 1,5 \times 1,1}{32 \times 0,56} = 1491 \text{ лм.}$$

Подходящая лампа – Osram L 18W/865 со световым потоком в 1300 лм.

$$\text{Делаем проверку выполнения условия: } -10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \leq +20\%$$

Получаем:  $-10\% \leq 12,8\% \leq +20\%$ . Условие выполнено.

Электрическая мощность осветительной установки  $P = 32 \cdot 18 = 576$  Вт.

## **Вывод**

В данном разделе были определены опасные и вредные факторы, которые присущи работе за компьютером, проанализированы их воздействия на организм человека и возможные способы уменьшения этого воздействия. Также были определены пути воздействия на окружающую среду.

В качестве практических расчетов был проведен расчет освещения в одной из аудиторий университета.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была разработана математическая модель возникновения и распространения верхового лесного пожара с учетом противопожарных разрывов и заслонов, а также их комбинаций. На основании этой модели была создана программа *barrier*, при помощи которой проведено моделирование процессов распространения верховых лесных пожаров. Результатом расчетов стали распределения полей температур, концентраций кислорода и продуктов пиролиза.

Было выяснено, что уменьшение размеров противопожарных заслонов с увеличением его влагосодержания уменьшается нелинейно, зависимость имеет вид степенной функции с отрицательным показателем степени.

При сравнении эффективности различных противопожарных барьеров, было выявлено, что наилучшим решением является противопожарный разрыв, однако, комбинация разрыв+заслон также весьма эффективна, при этом площадь неиспользуемых земель снижается почти на треть.

Таким образом, были выполнены все поставленные задачи.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Иванова М.В. Raumgestützte Überwachung von Waldbränden // Инженерия для освоения космоса : сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием. Том 2 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 133–135 с.

2. Иванова М.В. Математическое моделирование взаимодействия фронта верхового лесного пожара с противопожарными разрывами в сопряженной постановке // Неразрушающий контроль: сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». В 3 т. Т. 3 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 113 – 117 с.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 100 чудес природы / Авт.–сост. Ю.Андрушкевич. – М.:Эксмо, 2014. – 96 с. : ил. – (100 лучших)
2. Гришин А.М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф / А.М. Гришин // Вестник Томского Государственного университета. Математика и механика. –2008. –№2. –С.105–113.
3. Пожар в Подломске (по состоянию на 13:30 мск) [Электронный ресурс] : новости. – Электрон. дан. – пресс-центр МЧС России по Томской области. – URL: <http://www.70.mchs.gov.ru/pressroom/news/item/687576/>, свободный. – Загл. с экрана. Дата обращения 11.05.2017
4. Гришин А.М. Математическая теория верховых лесных пожаров / А.М. Гришин, А.Д. Грузин, В.Г.Зверев // В сб. Теплофизика лесных пожаров, Новосибирск, Изд-во ИТФ СО РАН, 1985, С.38-75.
5. Ходаков В.Е. Лесные пожары: методы исследования / В.Е.Ходаков, М.В.Жарикова. – Херсон : Гринь Д.С., 2011. — 470 с.
6. Мартынов А.Н., Мельников Е.С., Ковязин В.Ф., Аникин А.С., Минаев В.Н., Беляева Н.В. Основы лесного хозяйства и таксация леса: Учебное пособие для студентов направления 250300 «Технология и оборудование лесозаготовительного и деревообрабатывающего производств» и специальности 120303 «Городской кадастр». – СПб.: ООО Изд-во «Лань», 2008. – 372 с.
7. "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 12.05.2017)
8. Коровин Г.Н., Исаев А.С., Охрана лесов от пожаров как важнейший элемент национальной безопасности России. «Лесной бюллетень», №8–9. –

2010. – №8–9. URL: <http://old.forest.ru/rus/bulletin/08-09/index.html> (Дата обращения 12.05.2017)

9. Hirschberger, Peter. Walder in Flammen / WWF Deutschland, 2011, 89 S.

10. Авторское свидетельство СССР № 1644976, кл. А 62 С 3/02, 1988.

11. 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 12.05.2017)

12. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 N 200-ФЗ // Рос.газ. – 2006. №277

13. ОСТ 56-103-98 Охрана лесов от пожаров. Противопожарные разрывы и минерализованные полосы. Критерии качества и оценка состояния. Введен 01.07.1998. – 1998.

14. Об утверждении нормативов противопожарного обустройства лесов [Текст]: Приказ Рослесхоза от 27 апреля 2012 г. №174 // Российская газета. – 29.08.2012. N 197,

15. 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.

16. Пронских Н.И. Характеристики моделирования чрезвычайных ситуаций / Н.И.Пронских // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал №1 (4) – 2014. – 10–17 с.

17. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров / А.М.Гришин. – Томск: Изд-во Томского университета, 1981. – 277 с.

18. Перминов В.А. О возникновении и распространении лесных пожаров // Информационные технологии и математическое моделирование: Материалы V Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во Томского госуниверситета, 2006. Ч.2 –С.45-47.

19. 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.



20. Byram, G.M. The modeling of fire whirlwinds /G.M. Byram, R.E. Martin // Forest Science. – 1970. – Vol. 16. N 4. – P. 586–398.
21. Rothermel, R.C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fuels / R.C. Rothermel. – USDA Forest Service Research Paper INT-115, Ogden, 1972. – 40 P. (Intermountain Forest and Range Exp. Stn.).
22. Доррер, Г.А. Динамика лесных пожаров/ Г.А. Доррер; Ин-т вычислительного моделирования СО РАН, М-во образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Сиб. гос. Технологический ун-т – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 404 с.,
23. Нестеров, В.Г. Горимость леса и методы ее определения / В.Г. Нестеров. – Л.: Гослесбумиздат, 1949. – 74 с.
24. Гостинцев Ю.А. Аэродинамика среды при больших пожарах. Линейный пожар. Черноголовка: ИХВ АН СССР, 1977. - 51 с. (Препринт).
25. Конев, Э.В. Физические основы горения растительных материалов / Э.В. Конев. – Новосибирск: Наука, 1977. – 239 с.
26. 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
27. Коровин Г.Н. Методика расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров / Сборник научных трудов Л.: ЛенНИИЛХ, 1969. - В. XII. - С. 244—262.
28. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. / А. М. Гришин. – Новосибирск: Наука.Сиб.отделение, 199. – 408 с.
29. Патанкар С.В. Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
30. 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 университета, 2014. – 73 с.

31. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

32. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы»

33. СанПиН 2.2.4.1294-03 «Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений».

34. Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

35. Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки"

36. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

37. ГОСТ 12.1.006-84 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля

38. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.4.1191-03 "Электромагнитные поля в производственных условиях".

39. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий»

40. ГОСТ 12.2.033-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования»

41. Р 2.2.2006-05 Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда

42. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
43. ПУЭ «Правила устройства электроустановок. Издание 7»
44. Методика проведения работ по комплексной утилизации вторичных драгоценных металлов из отработанных средств вычислительной техники / Государственный Комитет РФ по телекоммуникациям / 1999 г.
45. Федеральный закон №123 от 4 июля 2008 г. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»
46. Постановление Правительства РФ от 25 апреля 2012 г. №390 «Правила противопожарного режима в Российской Федерации»
47. ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере (утв. Приказом Минсвязи РФ от 02.07.2001 N 162)
48. Безопасность жизнедеятельности: практикум / Ю.В. Бородин, М.В. Василевский, А.Г. Дашковский, О.Б. Назаренко, Ю.Ф. Свиридов, Н.А. Чулков, Ю.М. Федорчук. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. — 101 с.

# Приложение А

## Раздел 1

### Der Theoretische Teil

Студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1EM51	Иванова Маргарита Валерьевна		

Консультант кафедры ЭБЖ:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	Доктор физико-математических наук		

Консультант – лингвист кафедры ИЯ ИСГТ:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Плеханова Марина Викторовна	кандидат педагогических наук		

# EINFÜHRUNG

Es ist unmöglich, die Bedeutung der Wälder einzuschätzen. Sie geben nicht nur Stoffe zum Bauen, für die Energie-, Chemie- und Papierindustrie. Der Wald ist der Lebensort für viele Tierarten, der Wald ist ein Erholungsgebiet. Der Wald ist die Hauptquelle von Sauerstoff auf der Erde. Leider wurden die Wälder, seit langem zerstört. Sie wurden für wirtschaftliche Zwecke abgeholzt, sie sind aufgrund von natürlichen Prozesse verschwunden, durch menschliche Fahrlässigkeit verbrannt. Trotz der Schutzmaßnahmen, vernichtet man in der Russischen Föderation jährlich mehr als eine Million Hektar Wald.

Waldbrände sind ein wichtiger Bestandteil der natürlichen Vegetationsdynamik. Intensive Waldbrände führen zum Ersetzen von alternden Beständen aus Beständen unterschiedlichen Alters und Zusammensetzung. Häufige Brände mit geringerer Intensität können eine optimale Wallbrennstoffgesellschaft halten und das Risiko katastrophaler Brände reduzieren. Bei solchen Bränden haben einige Arten spezielle Überlebensstrategien entwickelt. Die Ponderosa-Kiefer, die Westliche Lärche und die Douglas-Tanne verfügen über eine besonders dicke Borke zum Schutz des Stamminnerens vor den hohen Feuertemperaturen. Einige Kiefernarten schützen ihre Samen in harten Zapfen, die sich erst bei extremer Hitze öffnen. Solche Eigenschaften von Pflanzen profitieren nicht nur vom Feuer, sie sind sogar darauf angewiesen.

Aber, der aktuelle Zustand der Wälder und der anthropogene Charakter vom Flächenbrand zeigen an, dass die negativen Aspekte viel mehr als positiv vertreten sind. Als ein Beispiel von solche negativen Aspekt kann festgestellte Abhängigkeit globaler Erwärmung von den massiven CO<sub>2</sub>-Emissionen von Waldbränden [2], die die Verrauchtheit der Städten, den mögliche Umstieg von Waldbränden auf die Gebäude in der Nähe der Waldgrenze auszeichnen. Insbesondere, existieren die Zwischenfälle von vollständige Verbrennung. Es gibt Fälle vom Ausbrennen ganzer Dörfer. [3]. Deswegen ist die Verfügbarkeit zuverlässiger Methoden für die Vorhersage der Brandgefahr, des potentiellen Brandverhaltens im

Untersuchungsgebiet und der Ausbreitung einzelner Feuer von zentraler Bedeutung in der Praxis des Feuermanagements.

Aus den obengenannten Ursachen ist das Problem vom Flächenbrand sehr aktuell. Außerdem, infolge der hohen Reichweite der Ausbreitung von Feuer das Gebiet entlang und der mögliche Durchquerung der Staatsgrenzen, wird dieses Problem auf internationale Ebene gebracht. Heute wird aber genügende Sorge auf physikalische Modellierung von Flächenbrand zugewandt.

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Ausarbeitung das mathematische Modell von Kronenfeuerausbreitung in der adjungierten Formulierung mit dem Brandschutzdurchriss.

Diese Modelle sind dazu geeignet, das Verhalten der Flächenbrände vorherzusagen, die Abhilfemaßnahmen zu erarbeiten falls die Brände auftreten. Die Felduntersuchungen sind teuer, haben Auswirkungen auf die Umwelt und können außer Kontrolle geraten und wechseln je nach der Stufung der Notfall. Es ist unmöglich die Felduntersuchungen zu machen wenn man zu viele Experimente mit unterschiedlichen Parametern durchzuführen sind. Deshalb werden mathematische Modelle, die diese Nachteile nicht haben, besser angewandt. Das bedingt die Aktualität der Arbeit und ihre praktische Bedeutung.

Das Forschungsobjekt sind die Flächenbrände. Der Forschungsgegenstand ist mathematische Modellierung der Entstehung und Ausbreitung von Kronenfeuer in der Anwesenheit und Abwesenheit von Brandschutzdurchriss und Brandschutzverdecken.

Die Berechnungen wurden mit Hilfe eines Modells, das auf dem Modell von A.M.Grischin [13] basiert, vorgenommen. Das Modell von A.M.Grischin ist das umfassendste, weil andere Modelle einige Parameter nicht berücksichtigen, und die Vereinfachungen gestellt wurden. Das Ergebnis der Berechnungen ist die Abhängigkeit von der Größe des Brandschutzdurchrisses von den Parametern des Waldes. Diese Ergebnisse wurden in wissenschaftlichen Konferenzen vorgestellt.

# **1. DER THEORETISCHE TEIL**

## **1.1. Literaturübersicht**

### **1.1.1. Waldübersicht**

Der Wald hat die große Bedeutung sowohl für Natur als auch für Menschenleben. Der Wald besteht aus den Holzarten, dem Unholz, der Grasvegetation und anderen Pflanzen, umgreift die Tiere und die Mikroorganismen; sie sind beziehungsreich und zusammenhängend.

### **1.1.2. Waldbrand und seine Form. Brandbekämpfung.**

Der Waldbrand ist eine spontane, unkontrollierte Ausbreitung von Feuer im Wald oder an Waldflächen. Ein Waldbrand kann in drei Phasen unterteilt werden: Meist entzünden sich zunächst das Gras und der trockene Unterwuchs. Es kommt zu einem Bodenfeuer, das noch leicht bekämpft werden kann.

Das Bodenfeuer übergreift entlang den Geschoß des Waldes: der Waldstreu, des Moos, des Gras, heruntergefallene Geäste. Es wird durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit in eine schnelle und stetige geteilt. Ein schnelles Bodenfeuer breitet sich mit bedeutenden Geschwindigkeiten (bis zu 300 m / h) und hängt von der Windgeschwindigkeit in der Bodenschicht ab. Dieser Brand kommt im Frühling an, wenn nur obener Waldstreu austreckt. Daher sieht das Brandbild gefleckt aus, denn feuchte Teile brennen nicht. Das stetiges Bodenfeuer verbreitet sich langsam (bis zu 180 m / h), aber die Bodenbedeckung und der Waldstreu verbrennen vollständig, deshalb das Brandbild ist durchgängig, keine Placken. Solcher Brand kann sich entwickeln: in dem Torfboden – im Untergrundfeuer, im jungen Wald – im Kronenfeuer.

Wenn es zu einem Lauffeuer auswächst, kann es besonders bei Nadelholzbeständen, auf die Baumwipfel überspringen. Das führt rasch zu einem Kronenfeuer und zu einer rasanten Ausbreitung der Flamme. Kronenfeuer lassen sich deutlich schwerer bekämpfen und wachsen sich leicht zur dritten Stufe, einem

Totalbrand aus. Das Kronenfeuer wird auch in eine schnelle und stetige geteilt. Es breitet sich auf die Kronen der Bäume aus und ist oft eine Fortsetzung des Bodenfeuers. Das Feuer steigt durch niederlassende Geäste und ungleichartige Bäume herauf. Die Geschwindigkeit des Kronenfeuers ist groß – von 1500 m/h bei dem stetigen Kronenfeuer, bis 5000 m / h bei dem schnellen Kronenfeuer.

Oft kann sich der Wald nicht mehr selbstständig von den Folgen des Brandes erholen. Nicht selten sind die verbrannten Flächen und damit das gesamte Ökosystem mit den darin lebenden Pflanzen und Tieren unwiederbringlich verloren.

Die Auswirkungen der Waldbrände auf die weltweite Artenvielfalt sind nach Ansicht des WWF gravierend: Sämtliche Ökoregionen, die für die Erhaltung der globalen Artenvielfalt entscheidend sind, sind auf 84 % ihrer Fläche durch Veränderungen in der Intensität und der Häufigkeit von Feuern gefährdet. Nur auf den verbleibenden 16 % bewegen sich die auftretenden Feuer noch innerhalb der ökologisch akzeptablen Grenzen. Feuerempfindliche Ökosysteme wie zum Beispiel die tropischen Feuchtregenwälder, in denen den Pflanzen und Tieren die Anpassung an natürliche Brände fehlt, sind sogar auf 93 % ihrer Fläche gefährdet. Die vorliegende Studie fasst die Ursachen und Auswirkungen von Waldbränden nach Regionen zusammen und benennt die gravierenden „Brennpunkte“ der Erde zusammen.

Die Bekämpfung unterscheidet sich je nach Brandart. Beim Bodenbrand hilft das Errichten von Brandschneisen. Dabei wird auf einem mehrere Meter breiten Streifen sämtliches brennbares Material entfernt oder kontrolliert abgebrannt, damit der Waldbrand sich dort nicht weiter ausbreiten kann. Jedoch kann es durch Funkenflug zu einem Überspringen der Brandschneise kommen.

Bei einem Kronenfeuer ist der Einsatz von Löschflugzeugen und Hubshraubern die effektivste Methode der Waldbrandbekämpfung. Allerdings kommt es dabei immer wieder zu Abstürzen, da die Piloten dicht über dem Feuer fliegen müssen. So stürzte 2002 in Bulgarien ein Helikopter bei der Bekämpfung



eines vorsätzlich gelegten Waldbrands ab. In Kalifornien starben drei Menschen beim Absturz eines Löschflugzeugs. In Italien kamen 2007 durch den Absturz eines Helikopters und eines Löschflugzeuges während der Waldbrandbekämpfung alle drei Piloten ums Leben. Trotz des Risikos und der hohen Kosten setzen staatliche Stellen ihre Mittel weitgehend für die technische Aufrüstung ein. Maßnahmen zur Vorbeugung und Verhinderung von Waldbränden werden dagegen vielerorts vernachlässigt, wie die Beispiele aus verschiedenen Waldbrandregionen im Folgenden zeigen.

### **1.1.3. Waldbrandsituation im Tomsker Gebiet.**

Tomsker Gebiet ist walddreich. Es besitzt 28,8 Millionen Hektar Waldfläche, das ist 91% aller Flächen, darunter Nadelwald beträgt 10,3 Millionen Hektar (53,7 % die Waldländereien). Die wertvollsten Bäume sind die Kiefer (29 %), die Fichten (2,5 %), die Tannen (3,2 %) und die Zeder (19 %).

Die Wälder werden in die Schutzwälder und die Ausbeutungswälder (94%) aufgeteilt.

Die Schutzwälder sind 6% (1728,7 tausend Hektar), darunter:

- In der Wasserschutzzone – 56,6 tausend Hektar,
- Den Weg und den Schienenweg entlang – 74,6 tausend Hektar,
- Die Grünzone – 69,4 tausend Hektar,
- Die Waldparkzone – 12 tausend Hektar.

Auch befinden sich 18 Staatsschutzgebiete im Tomsker Gebiet: 1 landesweites und 17 regionale Schutzgebiete.

Tomsker Gebiet wird durch die Großfeuergefährlichkeit gekennzeichnet. Die feuergefährlichsten Wälder sind der Kiefernwald und der Zedernwald, wegen des schnellen Trockens und des Waldbrennstoffes.

Katastrophenschutzministerium zufolge sind, die grundsätzlichen Ursachen des Waldbrandes:

- Unkontrollierbare Agrarbrandanschläge – 73 – 78 %
- Nichteinhaltung der Brandsicherheit – 14–19 %

— Naturgegebene Gründe – 7–13 %

Generell gilt: Weltweit haben nur etwa 4 % aller Waldbrände natürliche Ursachen wie beispielsweise durch Blitzeinschlag. In allen anderen Fällen ist der Mensch – sei es direkt oder indirekt, sei es fahrlässig oder vorsätzlich – verantwortlich für den Brand.

Etwa 74 % des Thermopunktes werden aus einer 5-kilometer Distanz zu Ortschaft eingetragen. Oft war dies der Grund von Bränden in Ortschaft und der Gartenanlage. Auch, steigt die Zahl des Thermopunktes jährlich an (Tabelle 1).

*Tabelle 1 – Vergleich der Zahl des Thermopunktes für 2015 und 2016*

Gesamtzahl des Thermopunktes		In 5-kilometer Zone		Zahl des Dürrgrasbrenns	
Januar - Juni 2015	2016	Januar - Juni 2015	2016	Januar - Juni 2015	2016
212	255	173	179	179	189

Die jahresdurchschnittliche Waldbrennbarkeit beträgt 100 – 110 Tage, vom Anfang Mai bis zum Mitte September. Die Höchstbrandzahl ist in Mai und in Juni.

Die Datenermittlung erfolgt im Kontrollzentrum für Krisensituation-Archiv (im Hauptverwaltung des Katastrophenschutzministeriums) und in der Datenbank von Informationsverarbeitungssystem für Distanzmonitoring föderale Agentur für Forstwirtschaft.

In Tabelle 2 wird die Information über die Anzahl von Waldbränden und ihren Flächen vom 2011 bis zu 2016 dargestellt.

*Tabelle 2 – Der Zahl-, die Fläche- und der Beweggrundangaben vom 2011 bis zu 2016*

Jahr	Zahle der Brände	Fläche			Beweggrund
		Summarich	Wald	Nicht-Wald	

2011	254	8724,9	7306,42	1418,5	Agrarbrandanschlag
2012	548	597205,2	255408	41796,7	Blitzeinschlag
2013	59	2223,4	2180,3	43,1	Blitzeinschlag
2014	155	4582,98	3564,66	1018,32	Agrarbrandanschlag
2015	136	2409,5	2137,9	271,5	Agrarbrandanschlag
2016 (für 13.06)	102	1107,98	1055,3	52,68	Agrarbrandanschlag

Es ist absehbar, dass die Grundursache für Waldbrände ist der Agrarbrandanschlag. Daneben sollten die Waldbrandgefahr und ein entsprechend angepasstes Verhalten im öffentlichen Bewusstsein durch Aufklärung und Erziehung verankert werden, um fahrlässige Brandstiftung zu vermeiden.

Betrachten wir die Verteilung der Brände nach Monat (Tabelle 3).

*Tabelle 3 – Die Waldbrandzahlangaben vom April 2011 bis zu Oktober 2016*

	2011	2012	2013	2014	2015	2016
April	30	23	0	17	3	18
Mai	110	111	8	46	53	70
Juni	85	151	5	20	32	56
Juli	8	170	39	34	45	0
August	1	64	7	34	0	0
September	18	29	0	3	3	0
Oktober	2	0	0	1	0	0

Tabelle 3 zeigt, dass am feuergefährlichste Monate Mai und Ende Juli – Anfang August sind. In erster Sachlage ist dies aufgrund des unkontrollierten Agrarbrandanschlages, in zweiter Sachlage – mit dem heißen Wetter und dem geringen Niederschläge verbunden.

Tabellen 4 und 5 zeigen die Daten über den großen Wandbrände, in der Jahren 2015 und 2016 im Tomsker Gebiet erfolgen haben, sowie die Informationen über die Wetterlage, die in diesen Bereich vor und während dem Brand aufgenommen haben.

*Tabelle 4 – Die Angaben über große (>50 Hektar) Waldbrände im Jahr 2015 und die Wetterlage zur selben Zeit.*

Datum	Landkreis	Lufttemperatur	Luftfeuchtigkeit	Windgeschwindigkeit
8.05	Tomsk, d. Gubino	19,3	17	1
23.06	Parabel, .d. Kurzhino	26,2	51	5
28.06	Moltschanowckij. d. Cujga	26,0	29	2
7.07	Kolpaschewckij, d. Sajkino	18,3	59	3
20.07	Parabel'ckij, d. Uct'-Gusik	21,9	41	6
21.07	Baktscharckij, d. Parbing	23,6	37	2
22.07	Werchneketckij, d. Katajga	25,4	34	2
24.07	Werchneketckij, d. Uct'-Gusik	25,4	42	3

*Tabelle 5 – Die Angaben über große (>50 Hektar) Waldbrände im Jahr 2016 und die Wetterlage zur selben Zeit.*

Datum	Landkreis	Lufttemperatur	Luftfeuchtigkeit	Windgeschwindigkeit
4.05	Baktscharckij, d. Wawilowo	14	26	4
26.05	Baktscharckij, Zentral'nyj	21	40	4
10.06	Kargacokckij, Tscharyschewo	29,1	24	1
12.06	Werchneketckij, Katajga	32,4	16	3
15.06	Werchneketckij, Ctepanowka	23,8	59	3
20.06	Werchneketckij, Ctepanowka	25,2	20	3
20.06	Moltschanowckij, Solotuschnoe	22,5	31	4
22.06	Werchneketckij, Belyj Jar	29,8	19	1
22.06	Perwomajckij, Vranzewo	27,4	25	2
24.06	Parabel'ckij, Narym	26,2	41	1
27.06	Werchneketckij, Katajga	28,6	33	4
29.06	Werchneketckij, Katajga	23,0	49	2

Diese Daten stimmen mit den Daten, die in Waldbrandsimulation anhand von Programm «barrier» erhalten sind überein. Die großen Waldbrände treten bei der geringen Luftfeuchtigkeit (weniger als 50 %), der bedeutenden Windgeschwindigkeit (der große Waldbrand entwickelt bei Kalme nicht) und der hohen Lufttemperatur auf.

## **1.2. Mathematische Modellierung für die Waldbrandvoraussage**

Trotz des steigenden Bedarfs den Notstand zu prognostizieren, bleibt diese eine der schweren Aufgaben. Vorrangig ist dies auf die Notstandeigenschaften – plötzliches Auftreten, schnelle Entwicklung, kettenförmiges Verhalten, unpünktliche und dürftige Daten. Deshalb verwendet man häufig mathematische Modelle.

Mathematisches Modell ist Gleichungssystem und Beziehungssystem, geometrische Begriffe, die die wichtigsten Eigenschaften und Merkmale von realen Prozessen anzeigen, reproduzieren oder imitieren, um Entstehung, Entwicklung und Folgen zu analysieren.

Die Form und die Zahl der Gleichungen richten sich nach dem Typ des Notstands. Zum Beispiel, Waldbrandmodelle basieren auf den Grundsetzen der Aerodynamik und der Hydrodynamik.

Natürlich kann das Modell alle Faktoren nicht berücksichtigen, deshalb zugreift man zu der Vereinfachungen. Zum Beispiel, abstellt man der Windrichtung entlang X-Axis nur, abstrahiert man von der flüssigen Phase in der Luft und so weiter.

Das Problem von unebenen Topographie, die beeinflusst auch das Branderhalten. Lösung kann der Einsatz von GIS-Technologie sein. Die Integration solcher Modelle mit der Datenbasis eines Geographischen Informationssystems ermöglicht eine optimale Unterstützung der umfassenden und integrativen Sichtweise des modernen Feuermanagements.

Der Vorbeugung von Bränden sollte oberste Priorität eingeräumt werden, wenn das Waldbrandrisiko in den genannten Regionen und die daraus resultierenden Schäden erheblich reduziert werden sollen. Dazu ist zunächst eine der jeweiligen Region angepasste Ursachenforschung und Evaluation der Kosten und Folgekosten von Waldbränden notwendig, die auf einer entsprechenden statistischen Datengrundlage fußen sollte. Erst auf dieser Basis können effektive und effiziente Strategien entwickelt werden, wie mit Bränden von Fall zu Fall umzugehen ist.

### **1.2.1. Die Waldbrandmodelle**

Überall, wo Prozesse in der Natur zu langwierig oder zu komplex sind, um sie durch Messung und Beobachtung erfassen und verstehen zu können, leistet die Modellierung einen wichtigen Beitrag. Diese Modelle sind dazu geeignet, das Verhalten der eigentlichen Flächenbrände vorherzusagen, die Vorkehrungen und die Abhilfemaßnahmen zu angewandt, wenn die Brände auftreten. Die Felduntersuchungen sind teuer, haben Auswirkungen auf die Umwelt und können außer Kontrolle geraten und wechseln je nach die Stufung des Notfalls. Noch, wenn man viele Experimente mit unterschiedlichen Parametern nötig macht, dann unmöglich das, die Felduntersuchungen zu verwerten. Deshalb werden mathematische Modelle, die diese Nachteile nicht haben, besser angewandt. Mittlerweile hat sich die Modellierung und Simulation Waldbrände als ein wertvolles Werkzeug für die praktische wissenschaftliche Arbeit und als wichtige Entscheidungshilfe im Naturschutz und im Umweltschutz etabliert. Man findet viele verschiedene Ansätze zur Modellierung eines Waldbrandes, die zum Beispiel auf zellulären Automaten, Fluidodynamik oder partiellen Differentialgleichungen basieren.

Der große Bedarf aus der Praxis nach Methoden der Simulation und der Prognose von Waldbränden führte vor allem in den USA, in Kanada, Australien und der ehemaligen UdSSR zu sehr großen Forschungsanstrengungen. Es entstand eine Vielzahl von Modellen für die verschiedensten Aspekte der Waldbrandproblematik. Beispiele sind die Brandgefahr, die Brandhäufigkeit, die Ausbreitungsrate und die Intensität von Lauffeuern, der Übergang und das Verhalten von Kronenfeuern, das Flugfeuer, die ökologischen Folgen von Bränden oder die Wirksamkeit von Bekämpfungsmethoden. Zudem mussten Methoden für die Modellierung von beeinflussenden Faktoren entwickelt beziehungsweise für die spezifischen Bedürfnisse der Waldbrandmodellierung angepasst werden. Dazu gehören beispielsweise Modelle für die Berechnung von Meteofaktoren wie, zB, Wind, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur an jedem Punkt im Gelände. Die wichtigsten

Problemstellungen, wozu diese Modelle geeignet sind, sind das Verhalten eines Brandes (insbesondere Ausbreitungsrate und Intensität) sowie die Brandgefahr in einem Gebiet (Основные задачи, которые должны решать модели – это поведение пожара (в частности, скорость распространения и интенсивность), а также риск возникновения в данной области). Die Brandgefahr ist außer von der Wahrscheinlichkeit eines Brandausbruchs auch vom Verhalten eines entstehenden Brandes abhängig, so dass die Modelle für die Brandgefahr meist Komponenten der Verhaltensmodellierung enthalten. Im Zusammenhang mit der Verwendung von Waldbrandmodellen in GIS ist besonders auch die räumliche Entwicklung eines Brandes von Interesse.

Für die Beurteilung der Schwere eines Brandes stellt die Ausbreitungsrate der Feuerfront neben der Feuerintensität den wichtigsten Parameter des Brandverhaltens dar. Deshalb wurden seit den 30er Jahren Anstrengungen unternommen, die Prozesse der Brandausbreitung zu verstehen und Modelle für die Ausbreitungsrate zu entwickeln.

Die Ausbreitung eines Feuers, auch durch ein idealisiertes, homogenes Waldbrennstoffs unter konstanten Bedingungen, ist ein sehr komplexer Prozess (Catchpole, 1994a): Atmosphärische Bedingungen sowie Waldbrennstoffeigenschaften beeinflussen die Verbrennungsrate des Waldbrennstoffs.

Das beeinflusst wiederum die Struktur der entstehenden Flamme. Die strahlungs- und konvektionsbedingte Erwärmung des nicht verbrannten Waldbrennstoffs durch die Flamme und die Verbrennungszone bestimmen die Ausbreitungsrate. Der konvektive Wärmetransport ist zudem von der Windgeschwindigkeit und der Luftturbulenz abhängig. Dieser noch relativ einfache Prozess wird durch mehrere Rückkopplungseffekte äußerst kompliziert. Dazu zählt man die Beeinflussung des Windfeldes durch das Feuer, aber auch der Einfluss der Ausbreitungsrate auf die Flammentiefe (bedingt durch die für gegebene



Waldbrennstoffeigenschaften konstante Verweilzeit des Feuers), die den thermischen Auftrieb und damit Flammenlänge und Windfeld beeinflussen.

Ein weiterer Mechanismus ist die Abhängigkeit der Waldbrennstofffeuchtigkeit von der Ausbreitungsrate, indem ein sich schneller näherndes Feuer das Brennmaterial weniger effizient austrocknen kann.

Einerseits sind die Modellentwickler mit einem sehr komplexen, nur unvollständig verstandenen Prozess konfrontiert. Andererseits besteht ein dringender Bedarf nach einfach verwendbaren, ausreichend effizienten und zuverlässigen Modellen. Die heute operationell verwendeten Modelle stellen deshalb pragmatische Kompromisse dar, die im vollen Bewusstsein ihrer Unvollständigkeit entwickelt wurden. Bei vorsichtiger Anwendung und sorgfältiger Interpretation können sie dennoch zu guten Ergebnissen führen.

Nach dem Ausmass, in welchem die physikalischen Prozesse der Brandausbreitung im Modell abzubilden versucht werden, lassen sich die bis heute entwickelten Modelle in rein empirische, semi-empirische und physikalische Ansätze unterscheiden. Für diese drei Gruppen werden im folgenden die wichtigsten Eigenschaften, ihre Vor- und Nachteile sowie Beispiele aufgeführt.

Gute Übersichten zum Thema finden sich in Catchpole (1994a), Weber (1991), Bradley und Clymer (1993) sowie Chandler et al. (1983).

### **1.2.2. Emprische Modelle**

Rein empirische Modelle beinhalten keine Beschreibung von physikalischen Prozessen, sondern entstammen der statistischen Auswertung einer großen Zahl von Testbränden. Die abhängigen variablen Ausbreitungsrate, Intensität usw. sollen in Funktion der unabhängigen Variablen Windgeschwindigkeit, Hangneigung, Feuchtigkeitsgehalt und Brandgutttyp ausgedrückt werden. Dabei können sowohl künstlich ausgelöste wie auch natürliche Brände verwendet werden. Die

Experimente werden in der Regel unter natürlichen Bedingungen im Feld durchgeführt.

Dabei können sowohl Boden- wie auch Kronenfeuer modelliert werden.

#### *Vorteile*

- Die komplexen Brandguteigenschaften (Zusammensetzung, horizontale und vertikale Diskontinuitäten usw.) sind im Modell implizit berücksichtigt.
- Da die Daten unter natürlichen Bedingungen gesammelt wurden, sind die Feuchtigkeits- und Windprofile korrekt.
- Es gibt keine Skalierungsprobleme.

#### *Nachteile*

- Das Modell ist nur unter Bedingungen anwendbar, die jenen der Testbrände zumindest ähnlich sind (dort aber sehr erfolgreich). Vor allem die Verwendung von (lokalen) Brandguttypen schränkt die Gültigkeit ein.
- Bei ungünstiger Wahl der Testbrände können die Resultate unbrauchbar werden (bei Korrelation der unabhängigen Variablen).
- Extrembedingungen sind schlecht abgedeckt.
- Die natürliche Variabilität der Windgeschwindigkeit während eines Testbrands erschwert die Auswertung.

#### *Beispiele*

- Südostaustralien: McArthur grassland and forest fire meters (McArthur, 1966, 1967)
- Alle Russischen Modelle bis 1980.

### 1.2.3. Waldbrandmodellierung

Das Problem der beschränkten Gültigkeit der empirischen Modelle führte zur Entwicklung der semi-empirischen oder Labor-Modelle. Diese verwenden physikalische Grundüberlegungen zur Energieerhaltung, um anhand messbarer Grössen die gesuchten Brandverhaltensparameter eines Lauffeuers zu berechnen.

Die semi-empirischen Modelle liefern allerdings keine physikalische Beschreibung der einzelnen Wärmetransportmechanismen, welche zu Wärmefluss beitragen, sondern der gesamte Wärmefluss wird anhand von Testbränden empirisch bestimmt (Weber, 1991). Im Gegensatz zu den empirischen Ansätzen werden die Testbrände unter kontrollierten Bedingungen im Labor durchgeführt. Mit den gefundenen, stationären Gleichungen wird die Brandausbreitung in einem Gleichgewichtszustand beschrieben.

#### *Vorteile*

- Grösserer Gültigkeitsbereich als empirische Modelle.
- Messbare Daten werden verwendet.

#### *Nachteile*

- Im Labor können natürliche Bedingungen nur unvollständig reproduziert werden (z.B. Feuchtigkeitsprofile, Windprofile).
- Nur verhältnismässig kleine Brände können simuliert werden.
- Auswirkungen der Versuchsanordnung sind schwer abzuschätzen (z.B. Dimension des Windkanals)

#### *Beispiel*

- Rothermel (1972), basierend auf Frandsen (1971), mit Erweiterungen u.a. durch Albin (1976), Grischin (1981) und Wilson (1990)

#### **1.2.4. Physikalische Modelle**

Ein vollständiges physikalisches Modell für die Feuerausbreitung sollte, basierend auf im voraus bekannten Meteo-, Gelände- und Brandgutdaten, die Verbrennungs- und die Wärmetransportprozesse sowie die Interaktionen zwischen den beiden modellieren. Dabei sollten nur allgemeingültige physikalische Grundprinzipien zur Anwendung kommen. Aufgrund der Komplexität des Feuerausbreitungsprozesses ist ein solches geschlossenes Modell noch nicht in Sicht. Stattdessen konzentrierten sich die meisten der bisher entwickelten physikalischen Modelle auf die Prozesse des Wärmetransports und betrachteten die Flammeneigenschaften als konstant (Catchpole, 1994a). Aus Komplexitätsgründen wird im allgemeinen das Verhalten von Lauffeuern modelliert. Die Flammenfront wird dann meist als rechtwinklige Fläche mit begrenzter Höhe, unendlicher Breite und konstanter Temperatur, das Brandgut als Anordnung von Volumenelementen mit homogenen Partikeln betrachtet. Mit einem Differentialgleichungsmodell wird darauf die Energiebilanz für ein Volumenelement des Brandguts vor der Flammenfront beschrieben, welche die Enthalpie des Brandguts in Funktion von Zeit und Position in Verbindung bringt mit dem Energieinput von der Flamme sowie mit den Energieverlusten an die Umwelt.

Mit einer zusätzlichen Enthalpie-Temperatur-Beziehung und mit geeigneten Initial- und Randbedingungen kann die Differentialgleichung dann für die Ausbreitungsrate gelöst werden (Weber, 1991). Das Ergebnis ist eine stationäre Gleichung für die Ausbreitungsrate der Flammenfront im Gleichgewichtszustand.

##### *Vorteile*

- Die Anwendung ist nur durch die Modellannahmen und nicht durch den Umfang der experimentellen Daten beschränkt.
- Auch bei fehlenden Daten zum Brandverhalten anwendbar.

##### *Nachteile*

- Bis jetzt keine vollständige physikalische Beschreibung möglich, empirische Untermodelle, die die Anwendbarkeit verringern, sind nötig.
- Die Heterogenität des Brandguts und die variablen Umweltbedingungen sind schwierig zu berücksichtigen.

### *Beispiele*

- Fons (1946), Emmons (1964), Hottel et al. (1971), Albini (1967), Van Wagner (1967), Thomas (1967, 1971), Anderson (1969), Pagni und Peterson (1973), Konev und Sukhinin (1977), De Mestre et al. (1989), Weber (1989), Albini (1986), Grishin et al. (1983), Catchpole und Catchpole (1994).

Das Modell von Grishin et al. (1983) ist bemerkenswert, indem es die wichtigsten physiochemischen Prozesse der Erwärmung, der Austrocknung, der Pyrolyse und der Verbrennung berücksichtigt. Durch numerische Analyse konnten Grishin et al. ihre zeitabhängigen Differentialgleichungen lösen, wobei neben der Ausbreitungsrate auch die Struktur der Flammenfront Teil der Lösung ist (Weber, 1991).

Also, die mathematische Modellierung von Waldbränden basiert auf der Werke von vielen bedeutenden Gelehrten, die das Problem aus verschiedenen Aspekte betrachtet haben. Bestehende Modelle können die verschiedenen Aufgaben gewältigen, je nach ihren Zielen.