



«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт неразрушающего контроля

Направление подготовки(специальность):20.04.01«Техносферная безопасность»

Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

Математическое моделирование воздействия разрывов и заслонов на распространение лесных пожаров

УДК 630:614.841.4.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ЕМ41	Зубарева Анастасия Евгеньевна		

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
Доцент	Петухов Олег Николаевич	Кандидат экономических наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	Кандидат технических наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код Результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<i>Общекультурные компетенции</i>
P1	Организовать свою работу ради достижения поставленных целей с использованием эмоциональных и волевых особенностей психологии личности, готовности к сотрудничеству, расовой, национальной, религиозной терпимости, умения погашать конфликты, способностью к социальной адаптации, коммуникативностью, толерантностью
P2	Эффективно работать индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать личную ответственность за результаты работы.
P3	Использовать основные программные средства, глобальные информационные ресурсы и владение современными средствами телекоммуникаций, для решения профессиональных задач
P4	Использовать профессионально-ориентированную риторику, владеть методами создания понятных текстов, способностью осуществлять социальное взаимодействие на одном из иностранных языков.
	<i>Общепрофессиональные компетенции</i>
P5	Применять глубокие знания в области техносферной безопасности в деятельности по организации защиты человека в чрезвычайных ситуациях, а также деятельности предприятий в чрезвычайных ситуациях
P6	Применять глубокие знания в области техносферной безопасности в деятельности по прогнозированию, измерению и профилактике негативных воздействий на человека и природную среду, а также деятельности по контролю технического состояния и применения используемых средств защиты.
P7	Организовывать и проводить установку, эксплуатацию и техническое обслуживание средств защиты, а также обоснованно выбирать известные устройства, системы и методы защиты человека и природной среды от опасностей.
P8	Использовать методы расчетов элементов технологического

	оборудования по критериям работоспособности и надежности, оценивать риск и определять меры по обеспечению безопасности разрабатываемой техники.
P9	Решать задачи профессиональной деятельности в составе научно-исследовательского коллектива в области анализа опасностей техносферы, исследования воздействия антропогенных факторов и стихийных явлений на население и промышленные объекты, разработки методов и средств защиты в чрезвычайных ситуациях.



«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт неразрушающего контроля

Направление подготовки(специальность):20.04.01«Техносферная безопасность»

Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

УТВЕРЖДАЮ:

Зав.кафедрой ЭБЖ

С.В.Романенко

(Подпись)

(Дата)

(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерская диссертация

Студенту:

Группа	ФИО
1ЕМ41	Зубарева Анастасия Евгеньевна

Тема работы:

Математическое моделирование воздействия разрывов и заслонов на распространение лесных пожаров

Утверждена приказом директора (дата, номер)

15.04.16 №2841/с

Срок сдачи студентом выполненной работы

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Литературные данные по проблематике лесных пожаров, их математическому моделированию, нормативно-техническая документация.
Перечень подлежащих исследованию вопросов	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
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кандидат экономических наук Петухов О.Н.
Производственная экологическая безопасность	Кандидат технических наук Романцов И. И.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Метод решения задачи.	

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
1ЕМ41	Зубарева Анастасия Евгеньевна		



«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт неразрушающего контроля

Направление подготовки(специальность):20.04.01«Техносферная безопасность»

Уровень образования: Магистратура

Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

Период выполнения (осенний/весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

Срок сдачи студентом выполняемой работы:

Дата контроля	Название раздела модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
5.02.2016	Введение	10
10.02.2016	1. Обзор литературы 1.1.Общие сведения о лесе.	10
15.02.2016	1.2.Общая характеристика лесов и статистика лесных пожаров на территории Томской области.	10
25.02.2016	1.3.Математическая модель.	10
5.03.2016	1.4. Метод решения задачи.	10
10.03.2016	2.Физическая и математическая постановка задачи.	10
20.03.2016	3. Результаты численных расчетов. 3.1. Расчеты по определению картин изотермы температуры при распространение верхового лесного пожара.	15
30.03.2016	3.2. Расчеты по определению картин изотермы температуры при распространение верхового лесного пожара с учетом противопожарных разрывов.	15
15.04.2016	3.3. Расчеты по определению картин изотермы температуры при распространение верхового лесного пожара с учетом противопожарных заслонов.	15
29.04.2016	Результаты решения задачи.	10
10.05.2016	3.4 Сравнение противопожарного разрыва и	10

	противопожарного заслона	
18.05.2016	4. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	10
27.05.2016	5. Раздел «Социальная ответственность»	10
27.05.2016	Заключение	10

Составил преподаватель:

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

СОГЛАСОВАНО:

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

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

Студенту:

Группа	ФИО		
1ЕМ41	Зубарева Анастасия Евгеньевна		
Институт	ИНК	Кафедра	ЭБЖ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Техносферная безопасность
Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:			
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; наблюдение.		
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов			
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования			
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:			
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведение НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Определение потенциального потребителя результатов исследования, 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		
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):			
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			
Дата выдачи задания по линейному графику			

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Петухов Олег Николаевич	Кандидат экономических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ЕМ41	Зубарева Анастасия Евгеньевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1ЕМ41	Зубарева Анастасия Евгеньевна

Институт	ИНК	Кафедра	ЭБЖ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	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"> - вредных проявлений факторов производственной среды (освещение, шум, микроклимат); - опасных проявлений факторов производственной среды (электрической и пожарной природы); - негативное воздействие на окружающую природную среду; - чрезвычайных ситуаций.
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); 	<ul style="list-style-type: none"> - приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); - предлагаемые средства защиты. - электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты).
--	---

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

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель кафедры ЭБЖ	Романцов Игорь Иванович	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ЕМ41	Зубарева Анастасия Евгеньевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 110 с., 34 рис., 30 табл., 19 источников.

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

Объектом исследования является 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 в сопряженной постановке с учетом противопожарных разрывов и заслонов.

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

В результате исследования процесс возникновения и распространение верхового лесного пожара описан в рамках сопряжённой математической постановки, т.е. учитывается взаимное влияние горения в пологе леса и горения над пологом леса. Изучено влияние метеоусловий и других факторов на скорость распространения пожара и выбросы продуктов горения в приземный слой атмосферы.

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 в 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.

Оглавление

Введение.....	14
1.Обзор литературы	15
1.1 Общие сведения о лесе.	15
1.2 Общая характеристика лесов и статистика лесных пожаров на территории Томской области	18
1.3 Математическая модель	28
1.4 Метод решения задачи	31
2 Физическая и математическая постановка задачи	48
3 Результаты численных расчетов.....	57
3.1 Результаты численных расчетов распространения верховых лесных пожаров	57
3.2 Результаты численных расчетов распространения верховых лесных пожаров с учетом противопожарных разрывов.....	60
3.3 Результаты численных расчетов распространения верховых лесных пожаров с учетом противопожарных заслонов	65
3.4 Сравнение противопожарного разрыва и противопожарного заслона	69
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	14
5 Социальная ответственность	89
Заключение	107
Список публикаций.....	108
Список используемых источников.....	109
Приложение АРаздел 1.4.The method of solving the problem	111

Введение

В защите и охране лесов от пожаров используются противопожарные разрывы и заслоны. Под противопожарным разрывом подразумевается полоса, свободная от лесной растительности. Противопожарный заслон представляет собой лесную полосу из деревьев негоримых лиственных пород. Эти полосы препятствуют распространению верховых лесных пожаров. Поэтому интересно сравнить эффективность различных противопожарных разрывов и заслонов с использованием математической модели верховых лесных пожаров.

Цель: Разработка математической модели распространения верховых лесных пожаров в сопряженной постановке с учетом противопожарных разрывов и заслонов.

Задачи:

Разработать постановку задачи о распространении верхового лесного пожара с учетом противопожарных разрывов и заслонов.

Выполнить математическое моделирование процессов распространения верховых лесных пожаров с помощью компьютерной программы.

Определить оптимальные размеры противопожарных разрывов и заслонов.

Провести анализ полученных результатов.

1.Обзор литературы

1.1 Общие сведения о лесе

Из всех растительных ресурсов Земли важное значение в природе и в жизни человека играет лес. Лес состоит из древесинных, кустарниковых и травянистых и других растений, включая животных и микроорганизмы, биологически взаимосвязанных в своем развитии и влияющих друг на друга и на внешнюю среду [1].

Первое определение леса было дано в начале XX века русским ученым, лесоводом Г. Ф. Морозовым, он говорил, что лес сообщество древесных растений. Древесные растения проявляют взаимное влияние в лесу, рождаются новые взаимные влияния, не свойственные одиночно стоящим деревьям. В лесу деревья влияют друг на друга а также на занятую ими почву и атмосферу [1].

Лес — это основной тип растительного покрова на земном шаре, который состоит их совокупности древесных, кустарниковых и травянистых растений. В него также включаются животные и микроорганизмы, которые биологически тесно связаны в своем развитии и влияют друг на друга и на окружающую среду. Лес является частью биосферы. Это элемент географического ландшафта, природный возобновляемый сырьевой ресурс, являющийся объектом хозяйственной деятельности человечества [2].

В улучшении окружающей среды огромную роль играет лес, в сохранении водных и земельных ресурсов,. Леса выполняют важнейшие сред-образующие функции: полезащитную, почвозащитную (противоэрозионную), климато-защитную и др. Кроме того леса выполняют роль в участие в процессе фотосинтеза, т.е. превращении костной матери в органическую и во многом определяя биохимические циклы.

Леса создают фитомассу, связывая поглощенный из воздуха диоксид углерода и выделяя чистый кислород. 60% фитомассы, создаваемый растениями суши, приходится на леса. Очень важно и то, что леса на длительное время фиксируют в древесине органическое вещество [3].

Леса выполняют защитно-санитарные, гигиенические, оздоровительные функции, водоохраные.

Главная роль лесов:

- поставляют кислород,
- влияние на водный режим
- снижение воздействий засухи, суховеев, сдерживание перемещения подвижных песков;
- защита почв от водной и ветровой эрозий, селей и оползней;
- препятствование разрушениям берегов рек и озер;
- поглощение и преобразование атмосферных химических загрязнений;
- благоприятное влияние на здоровье людей [3].

Лес используется как источник получения древесины, технического и минерального сырья и животных продуктов. Под воздействием лесов преобразуются атмосферные загрязнения. Наиболее важная окислительная способность характерна хвойным насаждениям, а также другим видам деревьев (липы, вербы, березы и др.). Леса обладают способностью выделять более трехсот различных ароматических соединений, эфирных масел, фитонцидов, которые убивают болезнетворных микробов. Например, в хвойных лесах отсутствуют патогенные микробы. Следует отметить, что радиационный фон в лесах в два раза ниже чем в городах [3].

Классификация лесов. Растительный состав лесов зависит от географического положения (широты, долготы, высоты над уровнем моря, удаленности от океана, влияния морских течений, перемещения воздушных масс и т.д.). Географическое положение оказывает влияние на тепловой и водный режим, что в свою очередь влияет на состав животного и растительного мира. Климат географических зон является основой для классификации лесов [3]:

- на севере Евразии и Северной Америки расположена зона хвойных лесов (или тайга). Эти же леса растут в высокогорных районах (горная тайга);

-в климатически умеренной зоне Евразии и Северной Америки располагаются лиственные леса, которые затем сменяются смешанными в притаежных территориях;

-в средней полосе земного шара растут не лиственные леса из жестколистных пород (в южной Европе, в Северной Америке, Калифорнии, Чили, Южной Америке, в Индокитае и Австралии);

- субтропики и тропики год делится на засушливый и дождливый сезоны, произрастают саванные леса и саванны с редкостной древесной растительностью;

- тропическая и экваториальная зона с равномерным сезонным распределением осадков покрыта влажными тропическими вечнозелеными лесами (дождевой лес) [3].

В России расположены самые большие по площади леса – сибирская тайга. Таежные леса начинаются в Европейской части России и, разрастаясь от верховьев Волги и Финского залива на Восток, покрывают Урал, Алтай, всю Западную и Восточную Сибирь, пробираясь в степные широты и захватывая Дальний Восток. Таежная зона занимает более 79% площади лесного фонда страны и простирается на 9 тысяч км. Тайга расположена в двух климатических поясах – субарктическом и умеренном, поэтому природные различия внутри нее довольно значительны. Главные породы темнохвойной тайги – кедр, ель, пихта, светлохвойной – лиственница, сосна. Кроме них растут береза и осина, которые появляются на месте выгоревших или вырубленных хвойных пород [4].

Темнохвойная тайга сумрачна. Кроны деревьев смыкаются, едва пропускают солнечные лучи, поэтому здесь нет подлеска – только мхи, папоротники. Сырой лесной воздух напоен ароматом хвои и смолы. В светлохвойной тайге царит лиственница – одно из самых выносливых деревьев, ее корневая система приспособлена даже к многолетней мерзлоте. Древесина лиственницы – прочнейший материал, который служит сотни лет.

Растительность здесь разнообразнее: под защитой деревьев в светлых тайгах растут кустарники ольховника, карликовых берез, различных ягод [4].

В России наибольшая в мире площадь лесов и объём лесных ресурсов. Леса занимают 7,7 млн кв. км., или 45% территории страны; запасы древесины оцениваются в 80 млрд куб.м. Это примерно 17% от всей мировой площади лесов и более 20% мировых запасов древесины. Однако экологическая ценность лесов гораздо выше любой экономической выгоды. Леса активно влияют на многие процессы, происходящие на Земле. Они поддерживают климатический баланс, регулируя содержание углекислого газа и кислорода в атмосфере, очищают воздух от химических загрязнений. Сибирская тайга производит кислород для всего Северного полушария нашей планеты. Леса накапливают влагу, определяя режимы рек и других водных объектов, защищают почву от эрозии, сохраняют биологическое разнообразие Земли, являясь домом для сотен животных. Леса – одна из важнейших частей биосферы планеты, они поддерживают здоровую, пригодную для жизни среду, и от их сохранения зависит благополучие человека [4].

1.2 Общая характеристика лесов и статистика лесных пожаров на территории Томской области

Томская область расположена в среднем течении р. Оби в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины на площади 314,4 тыс. км². Томская область граничит: на юге – с Кемеровской, Новосибирской областями; на юго-западе – с Омской областью; на западе, северо-западе и севере – с Ханты-Мансийским автономным округом; на северо-востоке и востоке – с Красноярским краем [5].

Основные закономерности формирования климата Томской области связаны с ее расположением в центральной части Западно-Сибирской равнины. Воздушные массы Атлантики, достигая таежной зоны, определяют формирование умеренно-континентального климата, более холодного и

влажного в северной части и теплого в южной. Равнинность территории не исключает проникновение воздушных масс из Средней Азии и Восточной Сибири, что усиливает его контрастность. Сложное взаимодействие воздушных потоков создает неустойчивую погоду во все сезоны года. Среднегодовая температура воздуха всей территории Томской области отрицательная, продолжительность безморозного периода от 90 до 110 дней. Годовое количество осадков имеет общую тенденцию к увеличению в северной части [5].

Общая площадь лесного фонда на территории Томской области составляет 28679,8 тыс. га, в том числе хвойными породами занято 10340,5 тыс. га. Общий запас древесины составляет 2852,8 млн.куб.м. Половина запасов древесины – это хвойные породы, из которых наиболее ценными являются сосна, ель, пихта, кедр. Лесные земли составляют 68,2%, покрытые лесом – 67,3% , в том числе искусственные насаждения – 1,1%. Не покрытые лесом земли занимают 0,9% площади лесного фонда, в том числе гари и погибшие насаждения – 0,3%, вырубki – 0,4%, редины, пустыри и прогалины – 0,2%. Не сомкнувшиеся лесные культуры и питомники составляют менее 0,1% площади лесного фонда. Нелесные земли занимают 31,8% площади. К используемым нелесным землям отнесены пашни, сенокосы и пастбища – 0,2%, дороги, просеки и усадьбы – 0,2%, воды рек и озер – 1%. Неиспользуемые земли представлены болотами – 30,2%, песками и оврагами – 0,2%. Хвойные насаждения составляют 53,7% покрытой лесом площади. Из них сосна – 29,0%, кедр – 19,0%, ель и пихта – 5,7 %. Общий запас древесины составляет 2852,8 млн. м³, в том числе хвойной – 1605,7 млн. м³. Продуктивность лесов области определяется годичным приростом древесины, который равен 32,8 млн. м³ или в пересчете на один гектар 1,7 м³. Средний запас древесины определяется в 148 м³/га, в хвойных насаждениях 155 м³/га. В Томской области леса по целевому назначению разделены на защитные и эксплуатационные. Резервные леса не выделены [5].

Эксплуатационные леса занимают 26959,8 тыс. га или 94% площади лесного фонда. Защитные леса занимают 1720 тыс. га, что составляет 6% площади лесного фонда. К защитным лесам, согласно статьи 102 Лесного кодекса, отнесены:

- запретные полосы, расположенные вдоль водных объектов, выделены на площади 782,5 тыс. га;

- нерестоохранные полосы лесов, защищающие нерестилища ценных промысловых рыб в Томской области, выделены на площади 345,7 тыс. га;

- защитные полосы лесов вдоль железных и автомобильных дорог общего пользования и автомобильных дорог, находящихся в собственности Томской области, выделены на площади 66,7 тыс. га;

- орехово-промысловые зоны выделены на площади 394,8 тыс. га, включают доступные для орехопромысла участки высокопродуктивных кедровых лесов;

- леса зеленых зон поселений в лесном фонде области выделены у 8 населенных пунктов на общей площади 80,6 тыс. га, из которых только 12,5 тыс. га отнесено к лесопарковой хозчасти [5].

Пожарная опасность в лесах Томской области определяется, прежде всего, природными особенностями территории – значительной долей хвойных лесов (53,7% покрытой лесом площади), развитым горимым напочвенным покровом и жарким сухим летом, особенно в первой его половине. Среднегодовая фактическая горимость лесов составляет 100-110 дней и длится с начала мая и до второй декады сентября. Наибольшее число пожаров происходит в июне и июле, на эти месяцы приходится соответственно 36,8% и 28,6% от среднего числа пожаров в год и 52,8% и 19,0% по выгоревшей площади. Май, август являются месяцами средней горимости. Наиболее короткий пожароопасный сезон наблюдается в бассейне р. Тым, наиболее продолжительный – в бассейне р. Кеть [5].

Лесорастительные условия и метеорологические факторы области

способствуют развитию в лесах преимущественно низовых пожаров. На землях лесного фонда Томской области на общей площади 1069,1 тыс. га находится 19 государственных природных заказников: 1 федерального (Томский заказник) и 18 регионального (областного) значения [5].

Лесные пожары уничтожают деревья и кустарники, заготовленную в лесу древесину. В результате пожаров снижаются защитные, водоохранные и другие полезные свойства леса, уничтожается фауна, сооружения, а в отдельных случаях и населенные пункты. Кроме того, лесной пожар представляет серьезную опасность для людей и сельскохозяйственных животных. Лесные пожары – горение растительности, стихийно распространяющееся по лесной территории [5].

В основном природные пожары возникают из-за естественных причин: разряд молнии, самовозгорание. Во многих случаях природные пожары случаются из-за нарушения населением требований пожарной безопасности. Примерно 60-70% природных пожаров возникает в радиусе 5 километров от населенных пунктов. В этой зоне чаще всего люди проводят время “на природе” [5].

Основные причины возникновения природных пожаров: неосторожное обращение с огнём (непотушенная сигарета, горящая спичка, тлеющий пыж после выстрела, масляные тряпки или ветошь, стеклянная бутылка, преломляющая лучи солнечного света, искры из глушителя транспортного средства, сжигание старой травы, стерни, мусора вблизи леса или торфяника). Одним из основных потенциальных источников природных пожаров является костер. В ряде случаев природные пожары становятся следствием умышленного поджога, техногенной аварии или катастрофы [5].

Пожарная опасность в лесах определяется следующими факторами:

- 1) способностью насаждений гореть (служить местом и материалом для возникновения лесных пожаров);
- 2) наличием источников огня (огнеопасных производств в лесу);

большой посещаемостью леса охотниками, пастухами, отдыхающими, сборщиками грибов и ягод и лекарственных растений; наличием железных дорог в лесу;

3) условиями тушения лесных пожаров (отдаленностью участков от населенных пунктов и других источников рабочей силы и средств пожаротушения) [5].

Наибольшей горимости подвержены хвойные насаждения — сосновые, еловые, пихтовые, кедровые и лиственничные с хвойным подростом и подлеском, с почвенным покровом из лишайников, мхов, подсохших травянистых растений и при наличии лесного хлама. Меньшей горимостью отмечаются лиственные леса — березняки, осинники. Пожарная опасность в лесах зависит также от времени года и метеорологических условий (температуры и сухости воздуха). Весной до появления зеленой растительности и осенью после ее высыхания наблюдаются более частые массовые лесные пожары. Летом большое значение в отношении возникновения лесных пожаров (повышение пожарной опасности), имеет продолжительность без дождевого периода: чем больше прошло дней после дождя, тем выше горимость (пожарная опасность) и наоборот [5].

Рассмотрим данные по количеству лесных пожаров в Томской области с 2009 по 2014 год.

Таблица 1.1 Количество лесных пожаров по годам

Год	количество пожаров
2009 год	195
2010 год	103
2011 год	254
2012 год	548
2013 год	59
2014 год	155

Построим график по приведенным данным.

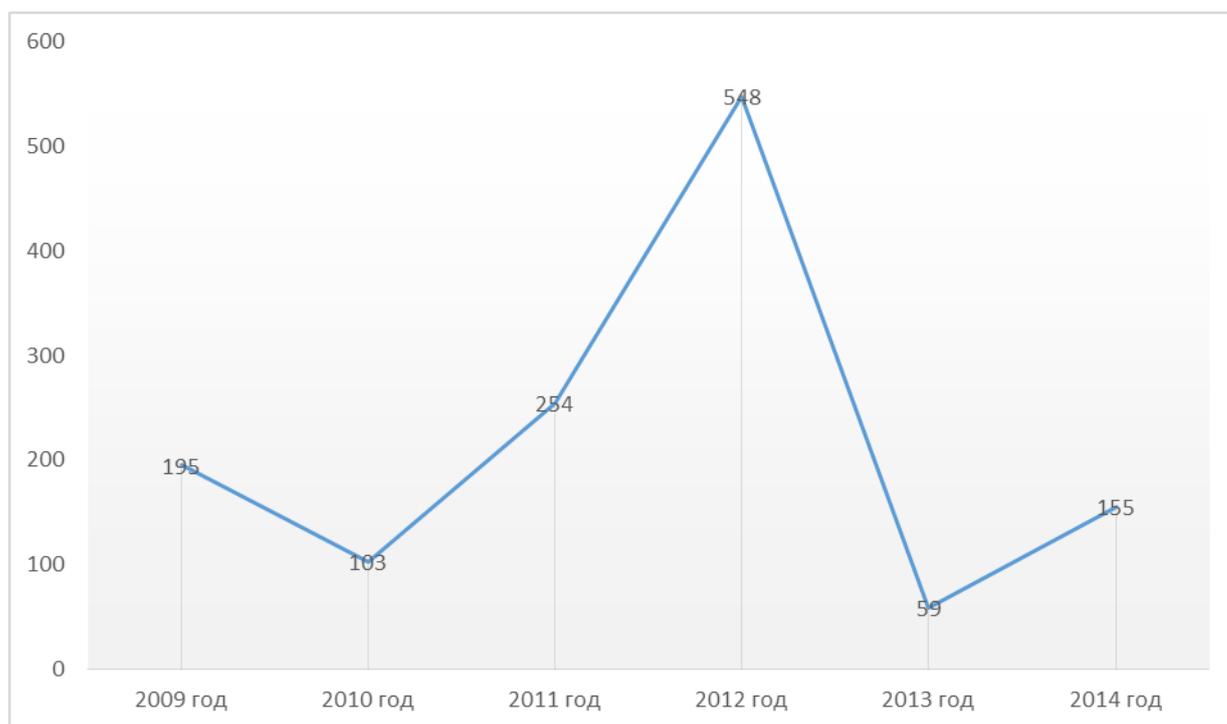


Рисунок 1.1 – Количество лесных пожаров по годам

По Рисунку видно 2012 был самый пожароопасный год из всех представленных, количество пожаров в 2012 году составляет 548, Общая площадь ликвидированных пожаров составляет 255418,6 га. Основными предпосылками возникновения чрезвычайной ситуации на территории районов Томской области явились:

- благоприятные для возникновения пожаров погодные условия (высокие дневные температуры (+23 C⁰ – +28 C⁰, местами до + 33C), длительное отсутствие осадков, ветер 3 – 8 м/с (с порывами до 23 м/с), высокий класс (4-5 й класс) пожарной опасности);
- недостаточный контроль за деятельностью местного населения со стороны органов местного самоуправления;
- недостаточное количество групп сельских поселений, созданных для контроля за лесопожарной обстановкой.

На территории Томской области в 2012 году были 4-5 классы пожарной опасности, наблюдались они в мае, июне, июле, августе сентябре, октябре

месяцах. Предполагаемый прогноз оправдался.

На территории области в связи с осложнением лесопожарной обстановки с мая по сентябрь 2012 года действовало постановление Губернатора Томской области №179а об особый противопожарный режим на территории всех районов Томской области и режим ЧС.

Теперь рассмотрим данные лесных пожаров по Томской области по месяцам.

Таблица 1.2 – Количество лесных пожаров по месяцам

	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год	Среднее
апрель	24	0	30	23	15	0	15,33333
май	107	57	110	111	48	8	73,5
июнь	32	16	85	151	20	5	51,5
июль	23	17	8	20	34	39	23,5
август	2	6	1	7	34	7	9,5
сентябрь	4	7	2	1	3	0	2,833333
октябрь	0	2	2	0	1	0	0,833333

По таблице 1.2 построим график лесных пожаров.

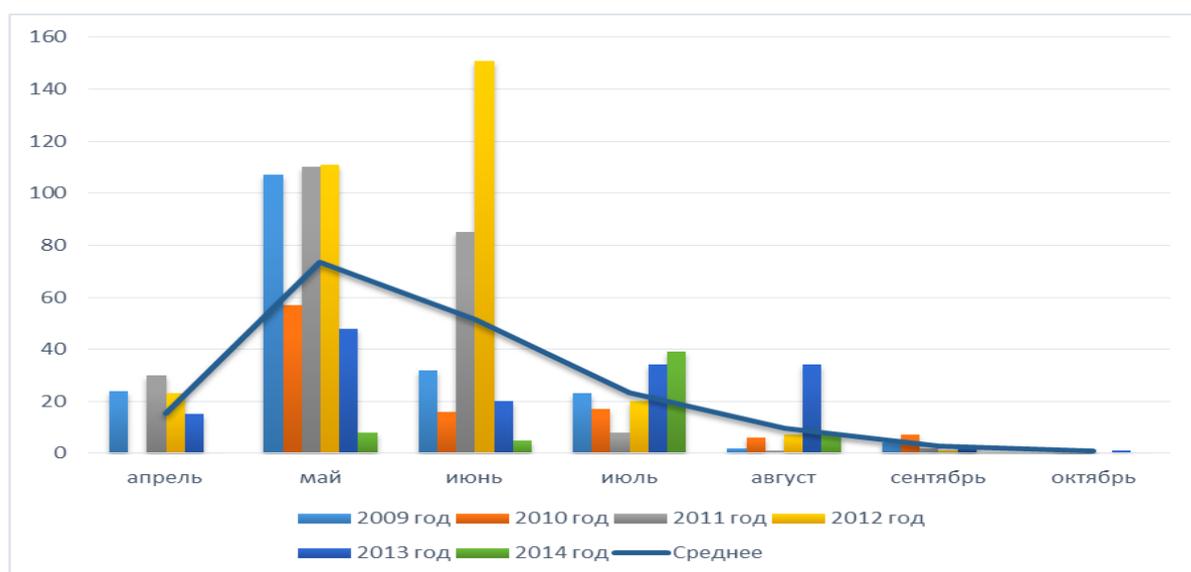


Рисунок 1.2 – Количество лесных пожаров по месяцам

По рисунку 1.2 видно, что наибольшее количество пожаров происходит в мае и первой половине июня, в этот период горят в основном южные районы области (Асиновский, Томский, Зырянский, Кожевниковский районы), что связано со значительным количеством площадей необрабатываемых сельскохозяйственных угодий, проведением неконтролируемых выжиганий сухих горючих материалов. В июле и в августе в основном горят северные районы (Парабельский, Колпашевский, Верхнекетский районы), большей частью горят хвойные леса и из-за человеческого фактора.

Лесные пожары делятся на такие основные виды:

- Низовые пожары, которые подразделяются на беглые и устойчивые,
- Верховые пожары, которые делятся на беглые, или ураганные и устойчивые,
- Подземные торфяные пожары [5].

При низовых пожарах горит напочвенный покров — лишайники, мхи, вереск, брусника, травянистые растения, лесная подстилка и хлам. Температура при горении растительного покрова достигает 100° , а при горении древесного хлама — 900° . Скорость движения низового огня по ветру $0,25—1$ км/час, а при сильном ветре скорость резко повышается и пожар становится еще более опасным. Быстро распространяющиеся низовые пожары называются беглыми, а медленно — устойчивыми. Дым при низовых пожарах обычно светло-серый [5].

При верховых пожарах горит не только напочвенный покров, но и кроны растущих деревьев. Огонь при этих пожарах движется быстрее, чем при низовых. В зависимости от скорости ветра скорость верхового пожара достигает $5—25$ км/час. Движение этого вида пожара сопровождается резким шумом; температура пламени достигает 900° . Верховые пожары, продвигающиеся с большой быстротой и ограничивающиеся лишь опаливанием крон деревьев, называются беглыми, или ураганными, а пожары, медленно продвигающиеся и охватывающие целиком деревья, называются

устойчивыми [5].

При подземных торфяных пожарах горят торф и перегной. Обычно на поверхности почвы огня не бывает. Скорость движения таких пожаров незначительная — несколько десятков или сотен метров в сутки [5].

Количество пожаров по фактору их возникновения по годам в Томской области приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Количество пожаров по фактору их возникновения по годам

	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год	Среднее
По вине местного населения	95	46	78	120	13	50	67
не выявлено	45	47	106	249	19	47	85,5
от гроз	14	0	47	148	27	43	46,5
В результате сельхозпалов	40	9	23	1	0	14	19,5

По данным таблицы 1.3 построим график по факторам возникновения лесных пожаров.

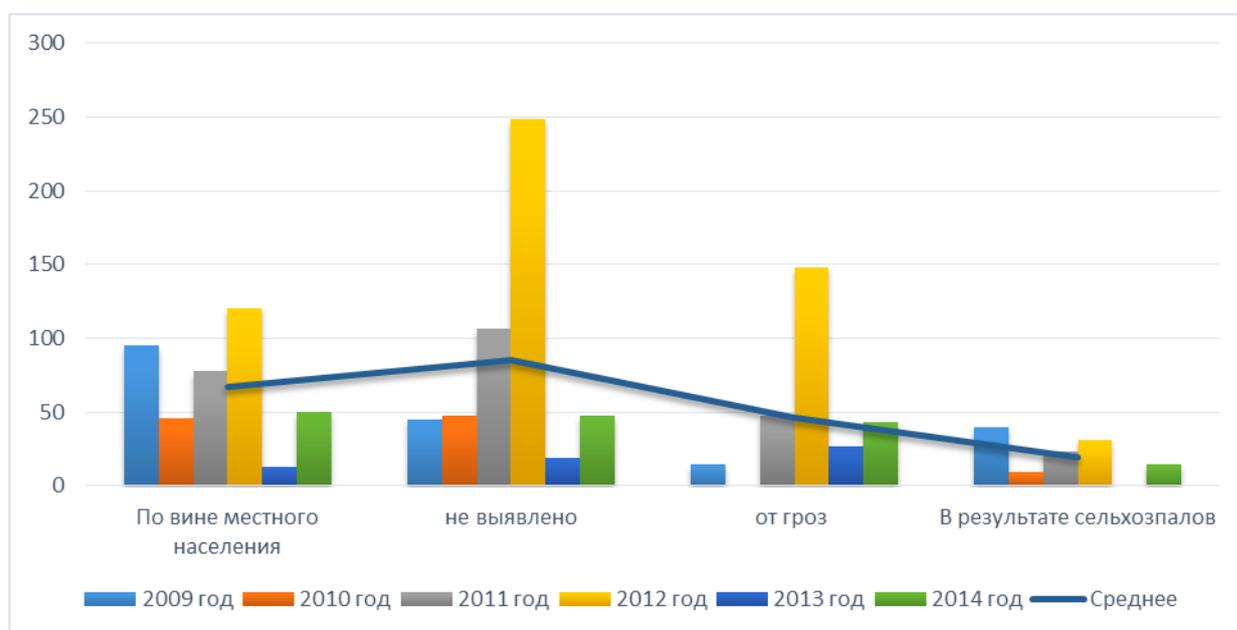


Рисунок 1.3 – Количество пожаров по фактору их возникновения по годам

По рисунку 1.3 можно сделать вывод, что самые распространённые факторы возникновения лесных пожаров является не выявленные и по вине местного населения. Не выявленные факторы возникновения — это факторы которые эксперты не смогли точно определить, но предполагают, что возникновение лесных пожаров произошло все-таки из-за влияние местного населения. Эти факторы нам рассматривать смысла нет, поэтому ниже приведены данные возникновения лесных пожаров по вине местного населения по районам.

Таблица 1.4 – Количество лесных пожаров по вине местного населения по районам

	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Александровский	1	0	0	5	0	1
Асиновский	4	0	3	5	0	1
Бакчарский	0	0	0	0	0	0
Верхнекетский	6	3	2	9	2	10
Зырянский	1	1	2	4	0	1
Каргасокский	5	2	1	8	2	0
Кожевниковский	10	4	8	3	0	5
Колпашевский	0	0	3	3	0	0
Кривошеинский	0	1	0	4	3	1
Молчановский	0	0	6	0	0	0
Парабельский	6	0	0	2	0	1
Первомайский	5	6	11	33	1	7
Тегульдетский	0	0	1	3	0	0
Томский	40	18	27	41	5	21
Чаинский	0	0	0	0	0	2
Шегарский	17	11	14	0	0	0

Из приведенных данных построили график по фактору по вине местного населения по районам Томской области.

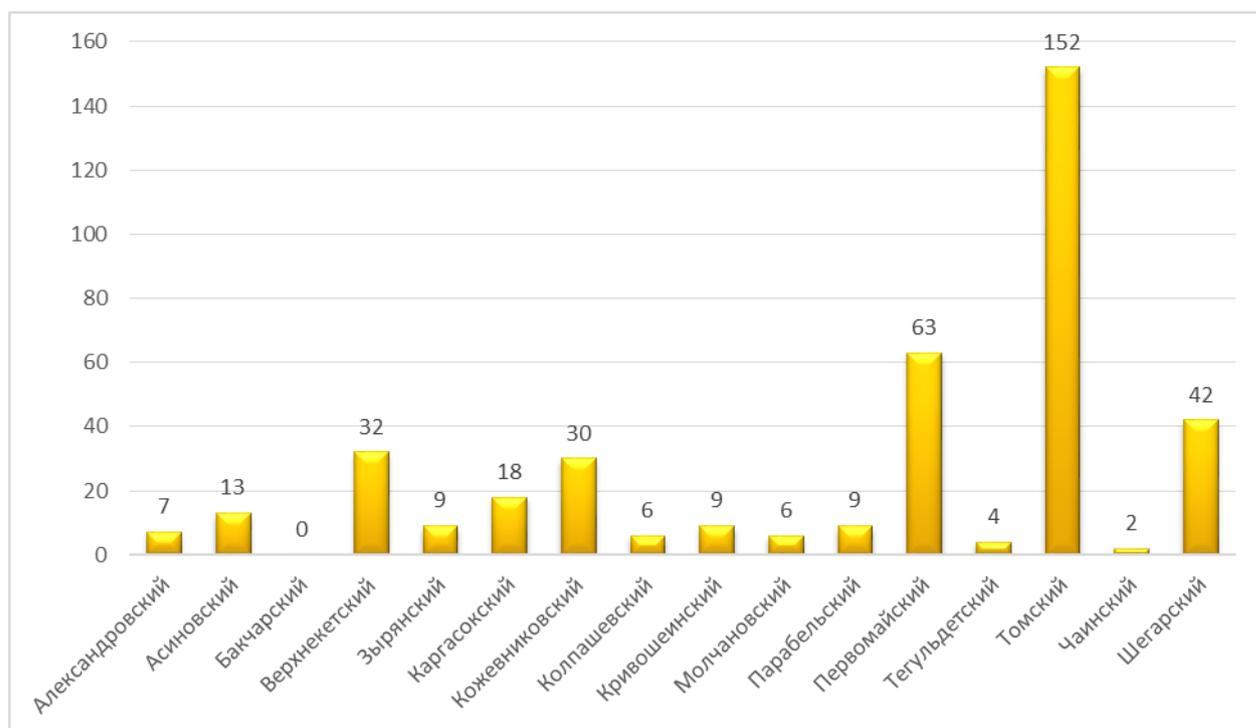


Рисунок 1.4 – Количество лесных пожаров по вине местного населения по районам

Из рисунка 1.4 видно, что больше всего лесных пожаров по вине местного населения в Томском районе, именно Томский район является самым плотно населенным районом в Томской области, его численность составляет 71 751 человек, для сравнения в Парабельском районе численность 12 366 человек, в Колпашевский 38 799 человек, в общем в Томской области численность составляет 1 074 453 человек. Это объясняет почему в нем больше все лесных пожаров. Так же фактор большого количество лесных пожаров является площади необрабатываемых сельскохозяйственных угодий, которые имеют большое значения в Томском районе.

1.3 Математическая модель

Во всем мире нас окружают сложные технические системы. На стадии проектирования или модернизации имеющейся технической системы решаются

задачи задания и расчета параметров и исследования проходящих в ней процессов. При решении поставленной задачи приходится проводить расчеты для различных значений параметров. В этом случае данную систему заменяют моделью. В широком смысле модель рассматривают, как объект выражающий наиболее значимые свойства объекта [6].

Математическая модель технической системы - совокупность математических объектов и отношений между ними, адекватно отражающая наиболее существенные свойства рассматриваемого объекта, изучаемые исследователем (инженером). Существуют различные способы представления модели [6] :

- инвариантная - выписываются соотношения модели с помощью математических выражений не связанные с методом решения уравнений используемых в модели;
- аналитическая - записываются модели в виде аналитического выражения решения заданных уравнений модели;
- алгоритмическая - представление модели и используемого численного метода решения в виде алгоритма;
- схемная (графическая) - запись модели с помощью графического языка (теория графов, эквивалентные схемы, диаграммы и т.п.);
- физическая;
- аналоговая.

Среди представленных выше форм наиболее совершенным и удобным является использование математического описания процессов - математическое моделирование. В понятие математическое моделирование также включается процесс решения задач с помощью компьютерной техники [7].

Процедура построения моделей, в общем случае, является неформализованной. Что касается выбора математических соотношений, связывающих используемые параметры и переменные, то решение принимает проектировщик, перед которым поставлена решаемая задача. Основные

операции расчета численных значений параметров модели, функциональных зависимостей, решаются с помощью выполнения компьютерной программы на ЭВМ, в которой закодирован алгоритм. Поэтому математическое моделирование компонентов исследуемой системы как правило выполняется специалистами различных технических областей, а затем верифицируют с помощью сравнения с данными экспериментальных исследований [7].

Функциональные модели получают с помощью теоретических и экспериментальных методов:

Теоретические методы основаны на выполнении физических закономерностей происходящих процессов, задании соответствующих этим закономерностям математическим описаниям, обоснованиях и предположениях, выполнениях необходимых выкладок и представлении результата к заданной форме записи модели [7].

Экспериментальные методы основаны на исследовании и фиксировании внешних проявлений объекта, которые отмечаются и изучаются во время процесса исследования рассматриваемых объектов либо при проведении заданных экспериментальных работ.

Многие операции моделирования носят эвристический характер, но несмотря на это моделирование имеет ряд положений и приемов, которые являются общими для построения моделей разных объектов:

- методы макро моделирования;
- математический метод планирования экспериментов;
- алгоритм формализуемых операций расчетов значений параметров и определение областей адекватности [7].

Повышение мощности современных компьютеров в совокупности с использованием пользователем различных ресурсов вычислительных многопроцессорных комплексов, использование диалогового режима во время решения задач и анализ результатов дают возможность существенно снизить время решения задач и получать результаты в режиме реального времени [7].

При построении математической модели необходимо:

- изучить свойства данного объекта;
- выделить его главные свойства и второстепенные;
- сделать допущения при описании объекта.

В модели описываются функциональные зависимости между исходными данными объекта и изучаемыми величинами. Для получения искомых величин выполняется последовательность действий, которая называется алгоритм. Алгоритм используется при программировании численного метода для составления компьютерной программы проведения вычислений. При построении математической модели (алгебраической или дифференциальной формы записи) используются соответствующие численные методы [7].

1.4 Метод решения задачи

Каждое из используемых в математической модели дифференциальных уравнений выражает определенный закон сохранения (массы, энергии, импульса). Соответствующие дифференциальные уравнения используют определенную физическую величину в качестве зависимой переменной и подразумевается, что должен выполняться баланс между различными факторами, которые влияют на значения переменной. Как правило зависимыми переменными в используемых дифференциальных уравнениях математической модели являются свойства, которые отнесены к единице массы. В качестве примеров могут служить массовая концентрация компонентов газовой фазы, скорость (т.е., количество движения единицы массы) и удельная энтальпия. Для всех зависимых переменных, используемых в математической модели, можно записать обобщенный закон сохранения, которому они подчиняются. Если обозначим зависимую переменную символом ϕ , то обобщенное дифференциальное уравнение будет иметь следующий вид [8]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \text{div} (\rho u\phi) = \text{div} (\Gamma \text{grad } \phi) + S, \quad (1.1)$$

где Γ коэффициент диффузии, и S является исходный член. Величины Γ и S зависит от смысла переменной ϕ . (На самом деле, должны были использоваться символы Γ_ϕ и S_ϕ это было бы, однако, привести к слишком много индексов в последующей работе.). В обобщенное дифференциальное уравнение входят четыре слагаемых: нестационарное, конвективное, диффузионное и источник. Для обозначения различных зависимых переменных служит функция ϕ (массовая концентрация химического компонента, энтальпия или температура, проекции на оси координат компонент вектора скорости, кинетическая энергия турбулентности, ее диссипация или масштаб длины турбулентности. Соответственно, для каждой из этих переменных, соответствующее значение должны быть приведены к коэффициенту диффузии Γ и источниковому члену S [8].

Функция плотности, которая входит в уравнение (1.1), обычно определяется из уравнения состояния и поэтому зависит от массовой концентрации компонентов газовой фазы (для многокомпонентной газовой среды) и температуры. Как и остальные переменные, компоненты вектора скорости также подчиняются обобщенному дифференциальному уравнению (1.1). Кроме того, поле скорости должно удовлетворять дополнительному уравнению, которое выражает закон сохранения массы или уравнению неразрывности и может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 . \quad (1.2)$$

Выше уравнения (1.1) и (1.2) записаны векторной форме. Эти уравнения можно также записать используя тензорную форму в декартовой системе координат в дифференциальном виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S , \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 , \quad (1.4)$$

здесь индекс j принимает значения: 1, 2 и 3, что соответствует трем пространственным координатам. Наличие двух одинаковых индексов в выражении означает суммирование, то есть наличие трех слагаемых с индексами 1,2 и 3, например

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_1} (\rho u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\rho u_2) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho u_3), \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right). \quad (1.6)$$

Таким образом используя дифференциальное уравнение (1.1) можно преобразовать этот обобщенный вид в конкретные уравнения с нестационарным, диффузионным и источниковым членами, так что уравнения запишутся в стандартном виде для соответствующей зависимой переменной. В каждом из этих уравнений в качестве выражения для Γ записывается коэффициент при выражении $\text{grad } \phi$ в диффузионном слагаемом, а все оставшиеся слагаемые в правой части можно обозначить S (источниковый член). Все используемые нами в математических моделях дифференциальные уравнения, которые описывают процессы тепло- и массообмена, гидродинамику течения и его турбулентный характер, рассматриваются как частные случаи обобщенного дифференциального уравнения обобщенной переменной ϕ . То есть данный подход приводит к тому, что нам достаточно разработать численное решение уравнения (1.1). Следовательно, при создании компьютерной программы, достаточно, разработать общий алгоритм операций решения уравнения вида (1.1), который можно будет применять для различных функций заменяя значение ϕ , при этом необходимо использовать соответствующие выражения слагаемых Γ и S , учитывая в расчетах соответствующие начальные и граничные условия. Таким образом, использование концепции обобщенного уравнения позволяет унифицировать решение поставленной задачи и разработать концепцию использования обобщенного численного метода и создать многоцелевые компьютерные

программы численного решения поставленных задач [8].

Дискретный аналог для заданного дифференциального уравнения будет представлять собой систему алгебраических уравнений, связывающих значения искомой функции ϕ в совокупности узловых точек. Такого вида уравнения могут быть получены из дифференциальных уравнений, описывающих поведение ϕ . Таким образом дискретный аналог описывает тот же физический процесс подобно соответствующему дифференциальному уравнению. Вхождение значений функции в дискретный аналог в различных узловых точках это следствие того, что выбранные профили носят кусочный характер. Значение ϕ в узловой точке оказывает влияние на распределение ϕ только в его непосредственной близости. По мере того как число точек сетки становится очень большим, решение дискретизации уравнений, как ожидается, приблизится к точному решению соответствующего дифференциального уравнения. Это следует из того, что, так как точки сетки получить ближе друг к другу, изменение ϕ между соседними точками сетки становится малым, а затем фактические детали профиля предположения становятся несущественны. Для данного дифференциального уравнения, возможно использовать уравнения дискретизации различного вида. Однако предполагается, что при наличии очень большого числа узловых точек дискретные аналоги различных типов, дают практически одно и то же решение. Различные виды решений возникают из-за отличий в допущениях для различных профилей и в методах, с помощью которых производится вывод [8].

Основная идея метода контрольного объема может быть легко физически интерпретирована. Рассматриваемая область решения задачи разбивается на непересекающиеся контрольные объемы так, что в каждом контрольном объеме содержится одна узловая точка. Каждое дифференциальное уравнение интегрируется по всем контрольным объемам. Для вычисления полученных интегралов используются кусочные профили, которые выражают изменения искомой функции ϕ между узловыми точками. В

результате интегрирования получим дискретный аналог для каждого дифференциального уравнения. Системы алгебраических уравнений связывают значения функций в узловых точках для каждой искомой переменной [8].

В результате получим дискретный аналог для каждой искомой переменной, которые выражают законы сохранения для каждой ϕ для конечного контрольного объема, так же, как дифференциальное уравнение выражает закон сохранения для бесконечно малого контрольного объема [8].

Важным свойством метода контрольного объема является то, что применение данного метода обеспечивает точное выполнение интегрального сохранения искомым величин: массы, количество движения и энергии на любой совокупности контрольных объемов и, соответственно, по всей расчетной области. Эта свойство выполняется для любого числа точек и не только в предельном случае, когда число точек сетки стремится к бесконечности. То есть, даже при решении на грубой сетке (несколько контрольных объемов) удовлетворяются точные интегральные балансы [8].

Результаты решения систем алгебраических уравнений относительно неизвестных в узловых точках можно рассматривать с двух сторон. В методах конечных элементов и в большинстве взвешенных остаточных методах, предполагаемая вариация искомой функции, состоящая из значений в узловых точках и интерполяционных функций (или профилей) между узловыми точками считается в качестве приближенного решения. Наоборот, в конечно-разностных методах в качестве решения принимается значения ϕ в узловых точках и не делается никаких явных правил о характере изменения искомой функции между этими точками. Это подобно ситуации, когда лабораторный эксперимент, когда распределения получаются в терминах измеренных значений в нескольких отдельных областях без заявления об изменении между данными точками. Данный подход используется в методе контрольного объема и решение ищется в виде значений функции в узловых точках. Использование интерполяционных формул или профилей используется только для оценки

требуемых интегральных выражений. После получения дискретных уравнений предположения о использованных профилях не рассматривается. Данный подход позволяет использовать различные профили для интегрирования всех членов дифференциальных уравнений. Для иллюстрации сказанного получим дискретный аналог дифференциального уравнения для простой ситуации [8].

Рассмотрим получение дискретного аналога для двумерных задач. Имея все компоненты, необходимые для получения уравнения дискретизации, соответствующего обобщенному дифференциальному уравнению, рассмотрим двумерный случай. Пусть контрольный объем представлен на рисунке 1.5. Пусть рассматривается задача получения суммарного теплового потока J_e . Предполагая, что он преобладает по всему контрольному объему с площадью поверхности $\Delta y \times 1$, можем записать дискретный аналог для двумерной задачи.

Подробности получения дискретного аналога. В одномерном случае показано, что a_p оказалось равным $a_E + a_w$ только тогда, когда удовлетворяется уравнение неразрывности. Таким образом, основное правило о сумме соседних коэффициентов могут удовлетворяться только тогда, когда мы учитываем при выводе уравнение неразрывности. Это утверждение иллюстрируется в [8].

Дифференциальное уравнение в двумерном случае можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = S, \quad (1.7)$$

здесь J_x , J_y обозначены суммарные (конвекция и диффузия) потоки, которые можно записать в виде:

$$J_x \equiv \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad (1.8)$$

$$J_y \equiv \rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad (1.9)$$

u , v обозначены компоненты скорости в направлениях x и y . В результате интегрирования уравнения по контрольному объему (Рис.1.5) получим

$$\frac{(\rho_P \phi_P - \rho_P^0 \phi_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + J_e - J_w + J_n - J_s = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y, \quad (1.10)$$

где линеаризация проведена обычным способом, а для нестационарного члена, ρ_p и ϕ_p считаются преобладающими по всему контрольному объему. Верхним индексом “o” обозначены значения на предыдущем шаге по времени:

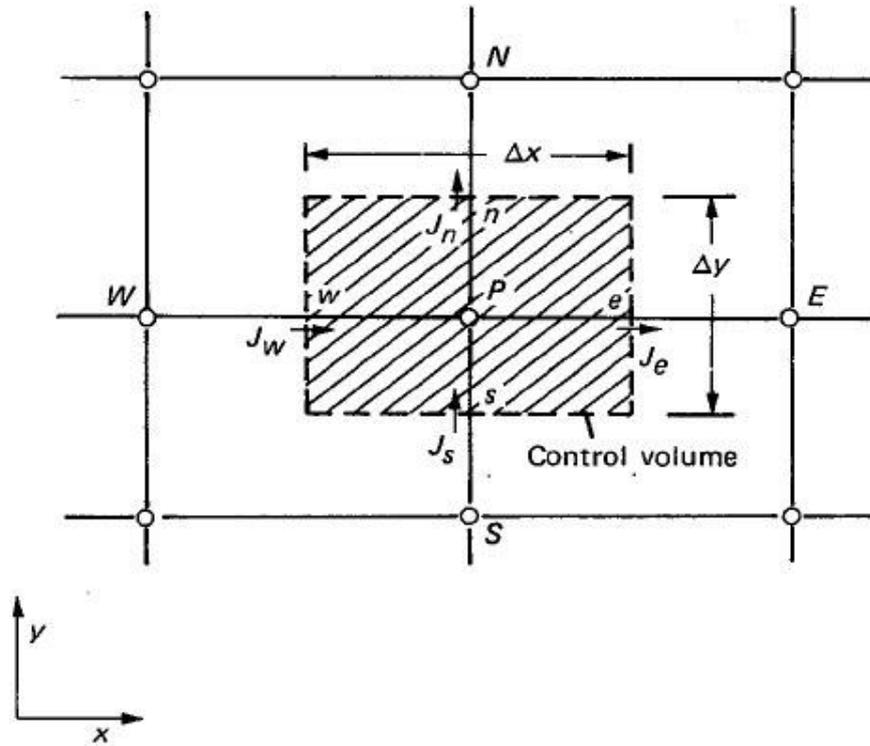


Рисунок 1.5 – Контрольный объем (заштрихованная область) для двухмерного случая

ρ_p^0 и ϕ_p^0 . Используется полностью неявный способ аппроксимации, то есть все другие величины (без верхних индексов) рассматриваются как новые значения. Символами J_e , J_n и J_s обозначены проинтегрированные по граням соответствующих контрольных объема суммарные потоки, то есть, J_e обозначает $\int J_x dy$ для грани, и так далее. Подобным образом проинтегрируем уравнение неразрывности по контрольному объему и получим:

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + F_e - F_w + F_n - F_s = 0, \quad (1.11)$$

где F_e , F_n и F_s - массовые расходы через грани контрольных объемов. Если ρu в точке e считается преобладающей по всей грани e контрольного объема, то

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y . \quad (1.12)$$

Подобным образом

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y , \quad (1.13)$$

$$F_n = (\rho v)_n \Delta x , \quad (1.14)$$

$$F_s = (\rho v)_s \Delta x . \quad (1.15)$$

Умножая уравнение (1.11) на ϕ_P и вычитая его из уравнения (1.10), получим

$$\begin{aligned} (\phi_P - \phi_P^0) \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} + (J_e - F_e \phi_P) - (J_w - F_w \phi_P) + (J_n - F_n \phi_P) \\ - (J_s - F_s \phi_P) = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y . \end{aligned} \quad (1.16)$$

Предположение о постоянстве ряда величин на гранях контрольных объемов позволяет применить методика, примененную при анализе одномерной задачи, к двумерному случаю. Для выражений следующих членов, таких как $J_e F_e \phi_P$ и $J_w - F_w \phi_P$ запишем:

$$J_e - F_e \phi_P = a_E (\phi_P - \phi_E) , \quad (1.17)$$

где

$$a_E = D_e A(|P_e|) + \llbracket -F_e, 0 \rrbracket , \quad (1.18)$$

здесь D_e и D_w , аналогично F_e и F_w , содержат площадь Δy граней e и w . Используя данные выражения для $J_n - F_n \phi_P$ и $J_s - F_s \phi_P$ получим в окончательном виде уравнение дискретизации. Из уравнения (1.17) следуют, что правило о сумме соседних коэффициентов будет выполняться [8].

При удовлетворении заданных полей скорости и плотности дискретному

аналогу уравнения неразрывности, приведенные выше вывод и вывод, основанный на (1.10), будут давать идентичные дискретные аналоги. Тем не менее, когда данное поле потока не удовлетворяет уравнению неразрывности, оба подхода дают различные уравнения и приводят к различным решениям. Будем использовать формулировку, в которой выполняется основное правило. В каком случае можно встретиться с полями течения, которые не удовлетворяющими уравнению неразрывности? Эта ситуация возникает тогда, когда поле потока не задано, но на самом деле итерационно рассчитывается, так же, как зависящий от температуры коэффициент теплопроводности в задаче проводимости. Перед тем как окончательное сходимость достигается, поле скорости на предварительных стадиях итерации могут не удовлетворять уравнению непрерывности. Двумерное уравнение дискретизация записывается в виде

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b, \quad (1.19)$$

Где

$$a_E = D_e A(|P_e|) + \llbracket -F_e, 0 \rrbracket, \quad (1.19a)$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + \llbracket -F_n, 0 \rrbracket, \quad (1.19b)$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + \llbracket F_s, 0 \rrbracket, \quad (1.19c)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t}, \quad (1.19d)$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y + a_P^0 \phi_P^0, \quad (1.19e)$$

$$a_P = a_E + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y. \quad (1.19f)$$

Здесь ϕ_P^0 и p_P^0 обозначаются известные значения в момент времени t , в то время как все остальные значения (ϕ_P , ϕ_E , ϕ_w , ϕ_s и так далее) являются неизвестными значениями в момент времени $t + \Delta t$. Массовые расходы F_e , F_w , F_n и F_s определены в уравнениях. (1.12). Соответствующие проводимости

представим в виде

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e}, \quad (1.20a)$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta y)_n}, \quad (1.20b)$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta y)_s}, \quad (1.20c)$$

и числа Пекле

$$P_e = \frac{F_e}{D_e} \quad P_n = \frac{F_n}{D_n} \quad P_s = \frac{F_s}{D_s}. \quad (1.21)$$

Функция $A(|P|)$, выбираются из таблицы для заданной схемы. Рекомендуется степенная схема для которой

$$A(|P|) = \llbracket 0, (1 - 0.1|P|)^5 \rrbracket. \quad (1.22)$$

Даже на этом этапе можно интерпретировать физический смысл различных коэффициентов в уравнении (1.19). Коэффициенты для функции в соседних точках a_E , a_w , a_N , и a_s учитывают влияние конвекции и диффузии и зависят от массового расхода F и проводимости D . Коэффициент в $a_p^0 \phi_p^0$ характеризуют величину ϕ для контрольного объема в момент времени t , отнесенную к шагу по времени. Остальные члены интерпретируются аналогичным образом [8].

В результате разработана процедура решения обобщенного дифференциального уравнения с переменной Φ при заданном поле скорости. Кроме некоторых частных случаев, определение поля скорости не представляется возможным; для его получения необходимо рассчитать составляющие компоненты скорости и распределение плотности по соответствующим уравнениям. Компоненты скорости удовлетворяют уравнениям количества движения, которые являются частными случаями обобщенного дифференциального уравнения для Φ (полагаем в этом уравнении

$\phi = u$, $\Gamma = \mu$ и т.д.). Таким образом, можно сделать вывод что разработан метод решения уравнений сохранения импульса для всех компонент скорости, тем самым будет получено поле скорости [8].

Решение уравнения количества движения оказывается труднее из-за нелинейности уравнений. Необходимо использовать опыт решения задачи теплопроводности. Например учет нелинейности в ходе решения с помощью итераций. Так, зависимость коэффициента в конвективном члене ρu от зависимой переменной u уравнения количества движения аналогична с этой точки зрения зависимости коэффициента теплопроводности k от температуры T . Начав решение с некоторого начального поля скорости, мы могли бы решить уравнения итерационным методом и получить искомые составляющие скорости. Особая трудность получения поля скорости связана с неизвестным полем давления. Градиент давления образует часть исходного термина для уравнения количества движения. К сожалению, в постановке задачи нет явного уравнения для определения давления. Когда поле правильное давление подставляется в уравнения количества движения, результирующее поле скоростей удовлетворяет уравнению непрерывности. Это косвенное указание, однако, не очень полезно для наших целей, если только не считать прямое решение всей системы уравнений, получаемой из дискретных аналогов уравнений количества движения и неразрывности. Так как мы предпочли итерационные методы решения дискретных аналогов даже для одной зависимой переменной, прямое решение для всего набора компонентов скорости и давления здесь не рассматриваются [8].

Трудности, описанные выше могут быть решены путем признания того, что мы не должны рассчитать все переменные для одних и тех же узловых точках. В случае компонентов скорости, существует методика размещения компонент скорости на сетках, которые отличаются от сетки, используемой для всех других переменных. Такое смещаются сетки для компонент скорости был впервые использован Харлоу и Welch (1965). В шахматной сетке, компоненты

скорости вычисляются для точек, лежащих на гранях контрольных объемов.

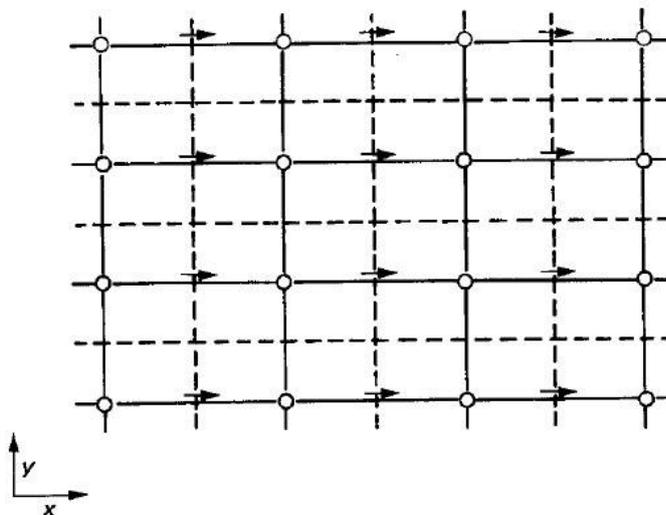


Рисунок 1.6 – Расположение u в шахматном порядке

Скорость u вычисляется по грани нормальной оси x . Расположение для u показаны на рисунке 1.7 короткими стрелками, а точками сетки (далее именуется основной сетке точек) показаны кружочками; пунктирные линии показывают грани контрольного объема. Следует отметить, что по отношению к узловым точкам основной сетки точки, в которых определяется u , смещены только в направлении оси x . Иными словами, расположение для u лежит на x -направление и соединяет две соседние основные точки сетки. Расположение u между точками сетки зависит от того, как контрольные объемы определяются. Узловая точка для u должна лежать на грани контрольного объема независимо от того, находится ли последняя посередине между узловыми точками или нет. Это легко увидеть, как в местах для компонент скорости v и w должны быть определены. На рисунке 1.7 представлена двумерная сетка.

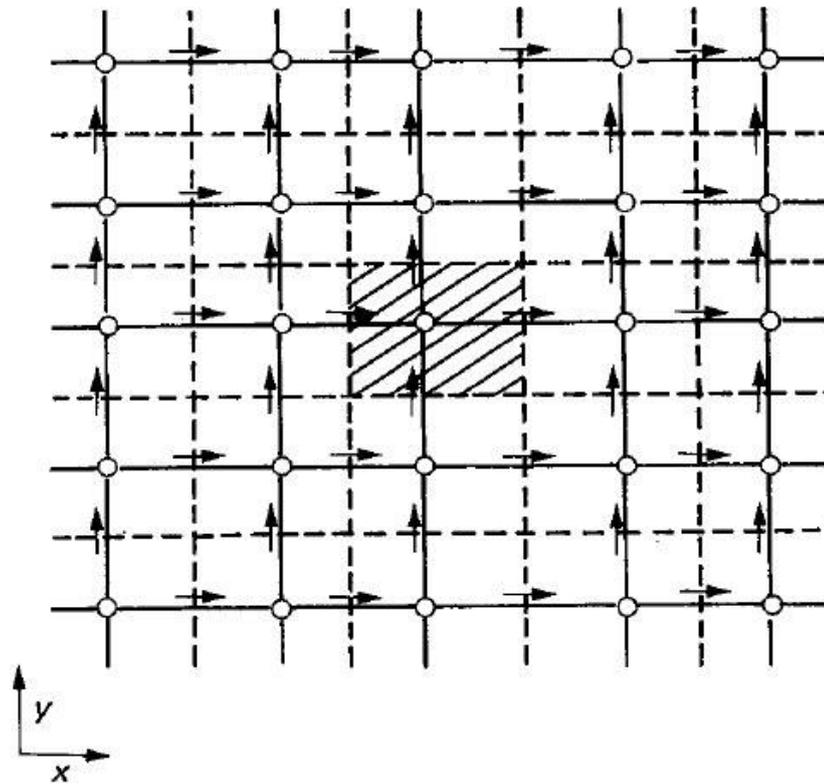


Рисунок 1.7 – Расположение u и v в шахматном порядке: обозначения те же, что и на рисунке 1.6, вертикальные стрелки — места определения v

Непосредственным следствием шахматном порядке сетки является то, что величина расхода массы через контрольные объемы могут быть вычислены без какой-либо интерполяции для соответствующих компонент скорости. Однако, эта функция, хотя и дает некоторые удобства в настройке общего уравнения дискретизации для ϕ не является важным преимуществом сетки в шахматном порядке. Важными преимуществами являются двойственными. Видно, что для типичного контрольного объема (заштрихованный участок на рисунке 1.7) дискретный аналог уравнения неразрывности содержит разности составляющих скоростей в соседних точках, а это приводит к тому, что волнистое поле скорости не будет удовлетворять уравнению неразрывности. В шахматном порядке используются сетки только потому, что поля скоростей будут удовлетворять уравнению неразрывности. Второе важное преимущество в шахматном порядке сетки является то, что разность давлений между двумя

соседними точками сетки теперь становится естественной движущей силой для компоненты скорости, лежащей между этими точками сетки [8].

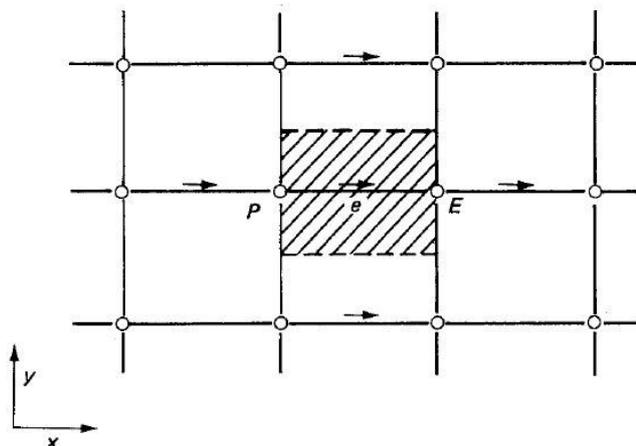


Рисунок 1.8 – Контрольный объем для u

В контрольном объеме нет ничего особенного. Его грани лежат между точкой e и соответствующими соседними точками. Однако он смещен по отношению к обычному контрольному объему, расположенному вокруг узловой точки P . Смещение объема произошло только в направлении оси x таким образом, что перпендикулярные этому направлению грани проходят через основные узловые точки P и E . Видно одно из главных достоинств шахматной сетки: разность $p_P - p_E$ можно использовать для расчета силы давления, действующей на контрольный объем для скорости u [8].

Для расчета коэффициента диффузии и массового расхода на гранях контрольного объема, показанного на рисунок 1.8, потребуется соответствующая интерполяция. Результирующий дискретный аналог можно записать в виде

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (p_P - p_E) A_e . \quad (1.23)$$

Член $(p_P - p_E) A_e$ представляет собой силу давления. Уравнения количества движения можно решить, если поле давления задано или каким-то образом найдено. Неверное использования поле давления, то поле скорости не будет удовлетворять уравнению неразрывности. Выразим такое поле скорости,

полученное с использованием приближенного поля давления p^* , через u^* , v^* .
 Это поле скорости находится в результате решения следующих уравнений:

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e, \quad (1.24)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n, \quad (1.25)$$

в этих уравнениях компоненты скорости и давление с верхними индексами. Далее мы обсудим способ расчета давления p^* . Шахматное поле скоростей, которое получилось постепенно будет удовлетворять уравнению неразрывности. Давайте предположить, что правильное давление получается из p^*

$$p = p^* + p''. \quad (1.26)$$

где p' это поправка давления. Далее выясним, изменения составляющих скорости в соответствии с изменением давления. Так же введем соответствующие поправки составляющих скорости:

$$u = u^* + u'; \quad v = v^* + v', \quad (1.27)$$

вычитая (1.24) из (1.23) получаем

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + (p_P' - p_E') A_e. \quad (1.28)$$

результат

$$a_e u_e' = (p_P' - p_E') A_e. \quad (1.29)$$

или

$$u_e' = d_e (p_P' - p_E'), \quad (1.30)$$

где

$$d_e \equiv \frac{A_e}{a_e}. \quad (1.31)$$

Уравнение (1.30) это поправочная формула для скорости. Его можно записать в виде

$$u_e = u_e^* + d_e (p_P' + p_E'). \quad (1.32)$$

Отсюда видно, какой должна быть поправка к значению скорости u , определяемая поправками давления, чтобы получилось значение U_e [8].

Так же запишем поправочные формулы для других составляющих скорости:

$$v_n = v_n^* + d_n(p'_P - p'_N), \quad (1.33)$$

итак, мы провели предварительный анализ перед выводом уравнения для сеточных значений p' , сам вывод уравнений приведен ниже.

Из уравнения неразрывности получим уравнение для поправки давления. Предположим, что плотность ρ непосредственно не зависит от давления.

Уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0. \quad (1.34)$$

Проинтегрируем это уравнение по выделенному объему, показанному на рисунке 1.9 [8].

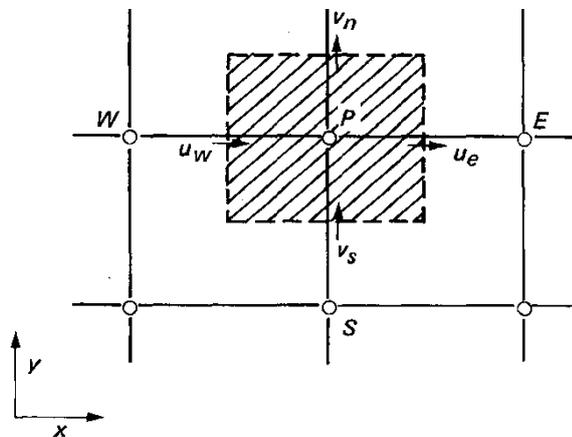


Рисунок 1.9 – Контрольный объем для уравнения неразрывности. Обозначения те же, что и на рисунке 1.8

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_s] \Delta y \\ & + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta x = 0. \end{aligned} \quad (1.35)$$

Если теперь вместо всех составляющих скорости подставить их

выражения из поправочных формул для скорости [таких, как (1.32)-(1.34)], то после группировки получим следующее уравнение для сеточных значений p' :

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S, \quad (1.36)$$

где

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y, \quad (1.37a)$$

$$a_N = \rho_n d_n \Delta x, \quad (1.37b)$$

$$a_S = \rho_s d_s \Delta x, \quad (1.37c)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S, \quad (1.37d)$$

$$b = \frac{(\rho_P^0 - \rho_P) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x. \quad (1.37e)$$

Процедура, разработанная для расчета поля течения, получила название SIMPLE, что означает полунявный метод для связывающих давление и скорость уравнений. Обсудим смысл этого названия несколько позднее. Данная процедура описывалась в Патанкар и Spalding (1972).

Последовательность операций. Далее перечислены основные операции в порядке их выполнения [8].

1. Задание поля давления p^* .
2. Определение уравнений движения, таких, как уравнения (1.4)-(1.5), для выявления u^* , v^* .
3. Определение уравнения для p' .
4. Вычисление p из уравнения (1.26) путем добавления p' к p^* .
5. Вычисление u , v с учетом соответствующих значений со звездочкой и с помощью формул для поправки скорости (1.29)-(1.30).
6. Вычисление дискретных аналогов для других ϕ (таких, как температура, концентрация и турбулентные характеристики), если они влияют на поле течения через физические свойства жидкости источниковые члены и т.

д. (если какое-то определенное ϕ не влияет на поле течения, лучше рассчитать его после получения сходимости решения для поля течения).

7. Представление скорректированного давления p как нового p^* и повторение всей процедуры до тех пор, пока не будет получено сходящееся решение [8].

При численных расчетах вместо уравнения (1.26) применяется

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (1.38)$$

Где α_p устанавливается равным приблизительно 0.8. Таким образом, расчеты приводят к сходимости, удовлетворяющей полю скорости [8].

2 Физическая и математическая постановка задачи

В данной работе на основе экспериментальных данных [9] дается упрощение общей физической модели и ее дальнейшее развитие с целью математического описания распространения плоского фронта верхового лесного пожара. Опираясь на физические представления, формулируется основная система уравнений, в рамках которой считается, что перенос энергии от фронта пожара осуществляется турбулентной конвекцией и излучением.

При помощи приема осреднения основной системы уравнений по высоте полого леса получена упрощенная сопряженная постановка задачи о распространении верхового пожара в пологе леса. С помощью данной постановки, используя значения коэффициентов тепло- и массообмена и предположение об изобаричности рассматриваемого процесса, получена система одномерных уравнений для определения скорости распространения и структуры фронта верхового лесного пожара. Результаты численного решения этой системы показывают, что скорость распространения верхового пожара увеличивается с ростом скорости ветра, эффективного коэффициента турбулентной вязкости, объемной доли сухого органического вещества в пологе леса и массовой доли горючих газов в газообразных продуктах пиролиза. В то же время с ростом влагосодержания лесных горючих

материалов (ЛГМ) скорость распространения падает, и при некотором критическом влагосодержании горение прекращается. Исследовалась структура фронта верхового пожара. Установлено, что объемные доли сухого органического вещества и воды в жидко-капельном состоянии изменяются при пожаре настолько быстро, что можно говорить о бесконечно тонких фронтах высушивания и пиролиза [9].

Пусть в протяженном в горизонтальном направлении лесном массиве имеется очаг верхового лесного пожара.

Считается, что:

1) течение является развитым турбулентным и молекулярным переносом пренебрегаем;

2) функция плотности газовой фазы не зависит от давления из-за малой скорости течения по сравнению со скоростью звука;

3) полог лесного массива считается недеформируемой пористой средой.

С учетом сделанных допущений считаем, полог леса можно моделировать однородной, двухтемпературной, многофазной, пористой, реагирующей средой. Рассмотрим так называемый продуваемый лесной массив, в котором объемной долей конденсированной фазы, состоящей из сухого органического вещества, воды в жидко - капельном состоянии и золы, пренебрегаем по сравнению с объемной долей газовой фазы, включающей в себя компоненты воздуха и газообразные продукты пиролиза и горения. Для описания переноса энергии излучением используется диффузионное приближение. Считаем, что среда находится локально-термодинамическом равновесии. Турбулентный конвективный перенос, обусловленный действием ветра и силы тяжести, описывается с помощью уравнений Рейнольдса. Задана скорость ветра над пологом леса. Заданы параметры лесного массива [9].

Необходимо описать процесс возникновения и развития верхового лесного пожара. Тогда для описания конвективного переноса, обусловленного действием силы тяжести, используем уравнение Рейнольдса, а для переноса

энергии излучением - диффузионное приближение. Пусть в начальный момент времени центр очага низового лесного пожара расположен при $x_1=0$ на высоте уровня шероховатости. Ось x_2 направлена вверх, а x_1 параллельно земной поверхности вправо (Рисунок 2.1).

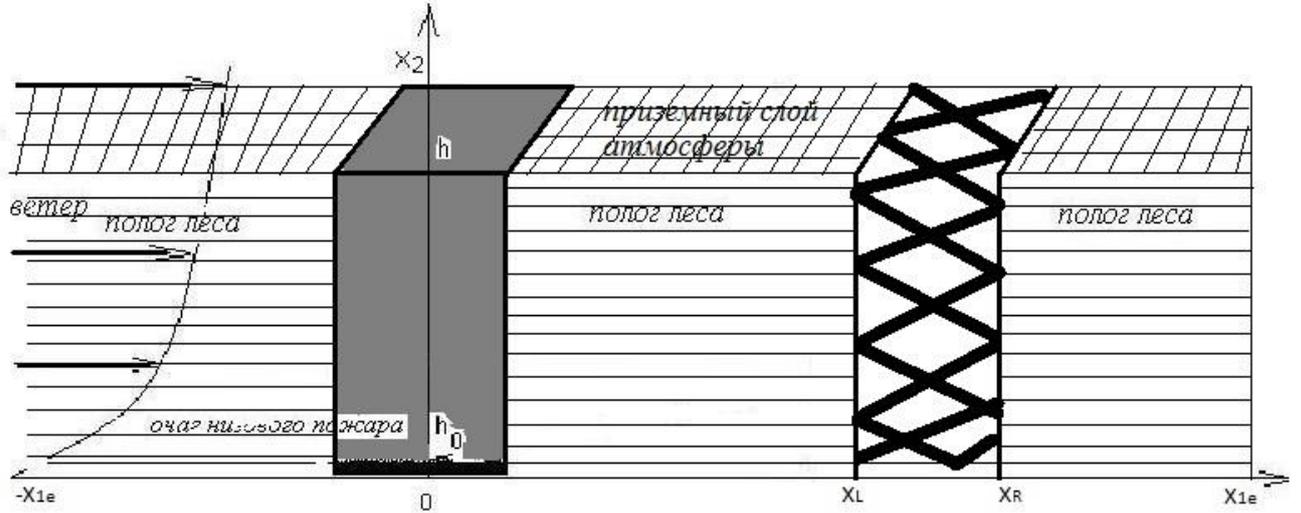


Рисунок 2.1 – Схема возникновения и развития верхового лесного пожара

Рассматриваемая задача сводится к решению следующей системы уравнений для приземного слоя атмосферы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = \dot{m}, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, 2; \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v'_i v'_j}) - \rho s c_d v_i |\vec{v}| - \rho g_i - \dot{m} v_i; \quad (2.2)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho c_p \overline{v'_j T'}) + q_5 R_5 - \alpha_v (T - T_s) + k_g (c U_R - 4\sigma T^4); \quad (2.3)$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v'_j c'_\alpha}) + R_{5\alpha}, \quad \alpha = 1, 2, 3; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_j} \right) - k c U_R + 4k_g \sigma T^4 = 0, \quad k = k_g \quad (2.5)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_\alpha = 1, \quad p_e = \rho R T \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad \vec{v} = (v_1, v_2), \quad \vec{g} = (0, g), \quad (2.6)$$

начальные и граничные условия для систем уравнений имеют следующий вид:

$$t = 0: v_i = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e} \quad (2.7)$$

$$x_1 = -x_{1e}: v_1 = V_e, v_2 = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + cU_R/2 = 0; \quad (2.8)$$

$$x_1 = x_{1e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + cU_R/2 = 0; \quad (2.9)$$

$$x_2 = 0: v_1 = 0, (\rho v_2)_0 = h_0 \dot{m}_0, T = \begin{cases} T_e + (T_0 - T_e) \exp(-((x_1 - x_{10})/\Delta)^2) t/t_0, & t \leq t_0 \\ T_e + (T_0 - T_e) \exp(-((x_1 - x_f)/\Delta)^2), & t > t_0 \end{cases}, \quad (2.10)$$

$$x_f = \omega(t - t_0),$$

$$-\rho D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} + \rho v_2 c_\alpha = h_0 \bar{R}_{5\alpha}, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} = \frac{k_0 h_0}{2} (4\sigma T_s^4 - cU_R);$$

$$x_2 = x_{2e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + cU_R/2 = 0; \quad (2.11)$$

Здесь x_1 и x_2 - координаты, x_2 - отсчитывается от верхней границы полога леса, а x_1 от очага горения; v_1, v_2 - компоненты проекции вектора скорости на соответствующие оси; R_5 и $R_{5\alpha}$ - горения летучих продуктов пиролиза и образования α - компонентов газодисперсной фазы; c_p, ρ - теплоемкости и плотность газовой фазы; T - температура газовой фазы; c_α - массовые концентрации ($\alpha=1$ - кислород, 2 - CO, 3 - инертные компоненты воздуха); P - давление; U_R - плотность энергии излучения; σ - постоянная Стефана-Больцмана; k_g коэффициент поглощения для газодисперсной фазы; q_5, E_5, k_5 - тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакции горения летучих продуктов пиролиза; M_α, M - молекулярные веса компонентов газовой фазы и воздушной смеси; c - скорость света; α_c, ν - коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; g - ускорение свободного падения. Индексами "o" и "e" обозначены значения функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно. Верхний индекс " ' " относится к пульсационной составляющей данной величины. Система уравнений описывает процессы переноса в области над

пологом леса. Термодинамические, теплофизические и другие величины соответствуют ЛГМ в сосновом лесу равны $E_5/R=11500$ 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/м³, $c_{2e} = 0$, $p_e = 10$ н/м², $T_e = 300$ К, $c_{1e} = 0.23$ [9].

Входящие в уравнения слагаемые, описывающие турбулентную конвекцию нуждаются в замыкании. Компоненты тензора турбулентных напряжений $\overline{\rho v'_i v'_j}$ и турбулентные потоки тепла и массы $\overline{\rho v'_j c_p T'}$, $\overline{\rho v'_j c'_\alpha}$ записываются через градиенты среднего течения согласно

$$-\overline{\rho v'_i v'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij}, \quad -\overline{\rho v'_j c_p T'} = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad -\overline{\rho v'_j c'_\alpha} = \rho D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j}, \quad (2.12)$$

$$\lambda_t = \mu_t c_p / Pr_t, \quad \rho D_t = \mu_t / Sc_t; \quad \mu_t = c_\mu \rho K^2 / \varepsilon, \quad (2.13)$$

Здесь K - кинетическая энергия турбулентности, v_i и v'_i - компоненты средней скорости и пульсационной составляющей скорости в проекции на ось x_i ; μ_t , λ_t , D_t - коэффициенты турбулентной динамической вязкости, теплопроводности и диффузии; Pr_t , Sc_t - числа Прандтля и Шмидта для турбулентного течения; δ_{ij} - символы Кронекера; $\mu_t = c_\mu \rho K^2 / \varepsilon$, где ε - скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, c_μ - константа. Так как определение коэффициента турбулентной динамической вязкости связано с трудностями, представляет интерес, приближенный способ замыкания, основанный на формуле пути смешения Прандтля. Это означает равновесное приближение для уравнения кинетической энергии турбулентности. Подробности этого подхода изложены в работе [9].

Коэффициент турбулентной динамической вязкости в плоском двумерном случае определялся по формуле

$$\mu_t = \rho l^2 \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1} \right)^2 - \frac{2}{3} \left[\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right]^2 - \frac{g}{T Pr_t} \frac{\partial \theta}{\partial x_2} \right\}^{1/2}, \quad (2.14)$$

где $\theta = T - T_e$.

Для длины пути смешения использовалась следующая формула [9].

$$l = x_2 k_i / (1 + 2.5 x_2 \sqrt{c_d s / h}), \quad (2.14a)$$

где $k_i=0.4$ - постоянная Кармана, h -размер полога леса.

Так как горизонтальные размеры лесного массива во много раз превосходят вертикальные размеры - высоту лесного массива, общая трехмерная система дифференциальных уравнений, описывающая процессы тепломассопереноса в лесном массиве, может быть проинтегрирована по вертикальной координате x_3 . Осреднение исходных характеристик по высоте полога леса проведено с целью упрощения постановки задачи. Приводя основную систему уравнений, по аналогии с [9], к дивергентному виду, проинтегрируем, ее по высоте от нижней границы полога леса до верхней. Здесь h будем обозначать высоту, по которой проводится осреднение. Кроме того, будем считать, что:

$$\int_0^h \phi dx_3 = \bar{\phi} h, \quad (2.14b)$$

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

Данная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} = \dot{m} - (\dot{c}^- - \dot{c}^+) / h, \quad j = 1, 2; \quad (2.15)$$

$$\rho \frac{dv_1}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_1} (-\rho \bar{v}_1' \bar{v}_1') - \rho s c_d v_1 |\bar{v}| - \rho g_1 - \dot{m} v_1 + (\tau_1^- - \tau_1^+) / h; \quad (2.16)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_1} (-\rho c_p v' \bar{T}') - q_5 R_5 - \alpha_v (T - T_s) + (q_T^- - q_T^+) / h + k_g (c U_R - 4 \sigma T^4); \quad (2.17)$$

$$\rho \frac{dc_a}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_1} (-\rho \bar{v}_1' \bar{c}'_a) + R_{5a} - \dot{m} c_a + (J_a^- - J_a^+) / h, a = 1, 5; \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} \right) - k c U_R + 4 k_s \sigma T^4 + 4 k_s \sigma T^4 + (q_R^- - q_R^+) / h = 0, k = k_g + k_s; \quad (2.19)$$

$$\sum_1^4 \rho_1 c_{p1} \varphi_1 \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (cU_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s); \quad (2.20)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad (2.21)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_\alpha = 1, p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad (2.22)$$

$$\dot{m} = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3 + R_{33} + R_{34}, \quad (2.23)$$

скорости реакций пиролиза, испарения влаги, горения кокса, и летучих продуктов пиролиза записываются в виде:

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right), R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_s^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right), \quad (2.24)$$

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

Начальные и граничные условия :

$$t = 0: v_i = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, T_s = T_e, \varphi_k = \varphi_{ke}; \quad (2.25)$$

$$x_1 = -x_{1e}: v_1 = V_e, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (2.26)$$

$$x_1 = x_{1e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (2.27)$$

$$x_2 = -x_{2e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (2.28)$$

$$x_2 = x_{2e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + \frac{cU_R}{2} = 0. \quad (2.29)$$

Очаг зажигания на напочвенном покрове задаются в зависимости от времени с помощью следующего выражения:

$$T = T_s = \begin{cases} T_e + \frac{t}{t_0}(T_0 - T_e), t \leq t_0 \\ T_e + (T_0 - T_e) \exp\left[-k\left(\frac{t}{t_0} - 1\right)\right], t > t_0 \end{cases} \quad (2.30)$$

В представленной выше системе уравнений, начальных и граничных условиях 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 α – компонентов газодисперсной фазы; t_0 – время формирования очага горения, c_{pi} , ρ_i , φ_i – удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли i – ой фазы (1 – сухое органическое вещество, 2 – вода в жидко-капельном состоянии, 3 – конденсированные продукты пиролиза, 4 – минеральная часть, 5 – газовая фаза); T , T_s – температура газовой и конденсированной фаз; c_α – массовые концентрации ($\alpha=1$ – кислород, 2 – горючие продукты пиролиза, 3 – инертные компоненты воздуха); p – давление; U_R – плотность энергии излучения; σ – постоянная Стефана-Больцмана; k – коэффициент ослабления излучения; k_g , k_s – коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз; α_V – коэффициент обмена фаз, q_i , E_i , k_i – тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза; s_σ – удельная поверхность элемента лесных горючих материалов; M_α , 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_i – проекции скорости на оси x_i ; α_c , v – коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; \dot{m} – массовая скорость образования газодисперсной фазы; v_{3*} – характерная скорость вдува из очага лесного пожара; α_4 , α_6 – эмпирические константы; g – ускорение свободного падения. Индексы "0" и "e"

относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно. Верхний индекс " + " относится к пульсационной составляющей данной величины [9].

На границе раздела сред полог леса - приземный слой атмосферы должны выполняться следующие условия:

$$\rho v_2 |_{x_2=h} = \rho v_2 |_{x_2=h+}; -\rho v_1' v_2' |_{x_2=h-} = \rho v_1' v_2' |_{x_2=h+} \quad (2.31)$$

$$v_1 |_{x_2=h} = v_1 |_{x_2=h+}; v_2 |_{x_2=h} = v_2 |_{x_2=h+}; \quad (2.32)$$

$$-\rho v_2' c_a' |_{x_2=h-} = \rho v_2' c_a' |_{x_2=h+}; c_a |_{x_2=h-} = c_a |_{x_2=h+} \quad (2.33)$$

$$-\rho c_p v_2' T' |_{x_2=h-} = \rho c_p v_2' T' |_{x_2=h+}; T |_{x_2=h-} = T |_{x_2=h+} \quad (2.34)$$

$$\frac{c}{3x} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} \Big|_{x_2=h-} = Q_R^+ - q_R^- \quad (2.35)$$

В работе приводятся результаты математического моделирования распространения верхового лесного пожара. Для численного интегрирования исходной системы уравнений используется метод контрольного объёма.

Расчётную область разбиваем на некоторое число не пересекающихся контрольных объёмов. Затем исходную систему уравнений интегрируем по каждому контрольному объёму.

Система уравнений (2.15) - (2.21) редуцирована к дискретной форме с помощью метода контрольного объёма. Сеточные уравнения, возникающие в процессе дискретизации, разрешались с помощью метода *SIP*. Алгоритм решения приведенной задачи включает в себя расщепление по физическим процессам, то есть вначале рассчитывалась гидродинамическая картина, а затем решались уравнения химической кинетики и учитывались химические источники для скалярных функций. При этом шаг по времени для интегрирования системы обыкновенных уравнений выбирался автоматически. Согласование полей скорости и давления осуществлялось в рамках алгоритма SIMPLE [8].

3 Результаты численных расчетов

3.1 Результаты численных расчетов распространения верховых лесных пожаров

На основе изложенной математической модели проводились численные расчеты по определению картины процесса возникновения верхового лесного пожара в результате зажигания полога леса от заданного очага горения. В результате численного интегрирования получены изотермы температур. Для визуализации полученных результатов и построения графиков используем программу MATLAB.

Ниже приведены графики распределения линий равного уровня (изолиний) температуры. На рисунках 3.1 -3.5 представлены распределения температур.

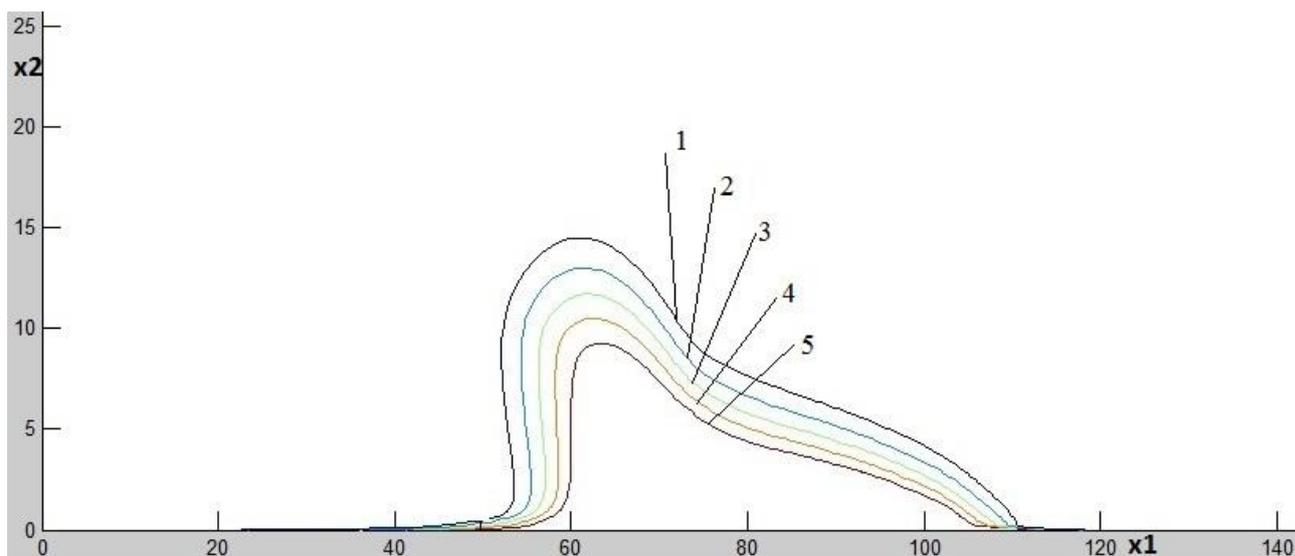


Рисунок 3.1 – Распределение изотерм при $V=3$ м/с., $t=10,8$ с.

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$.

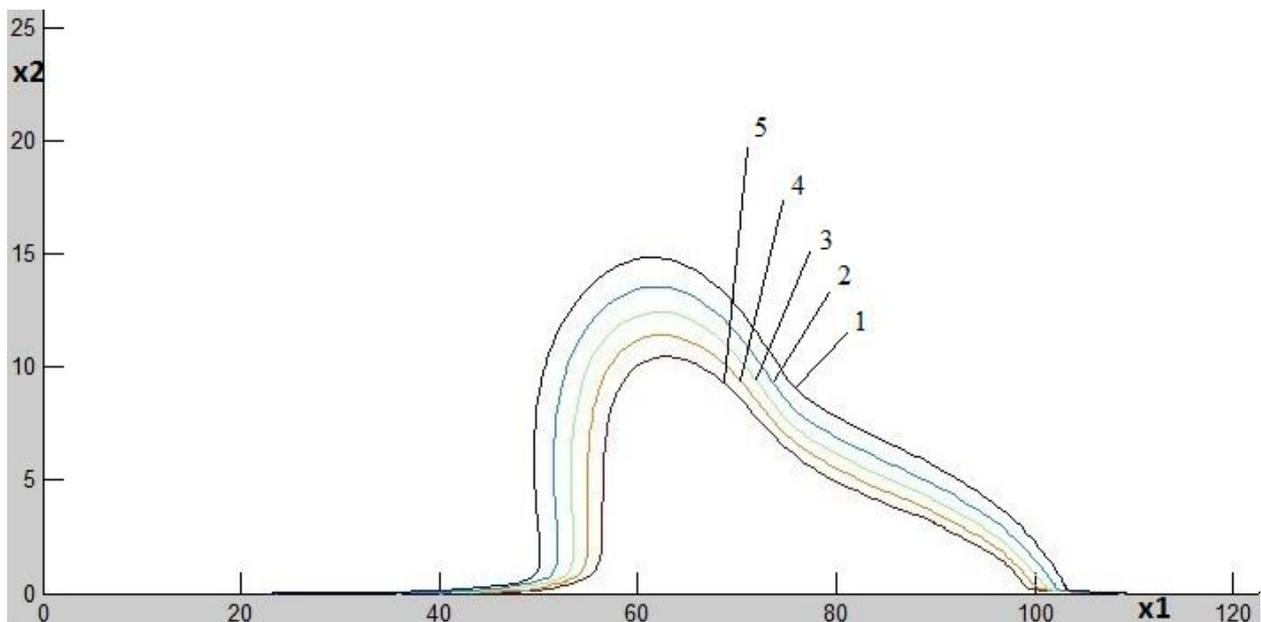


Рисунок 3.2 – Распределение изотерм при $V=4$ м/с., $t=9,9$ с.

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5-3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300\text{K}$.

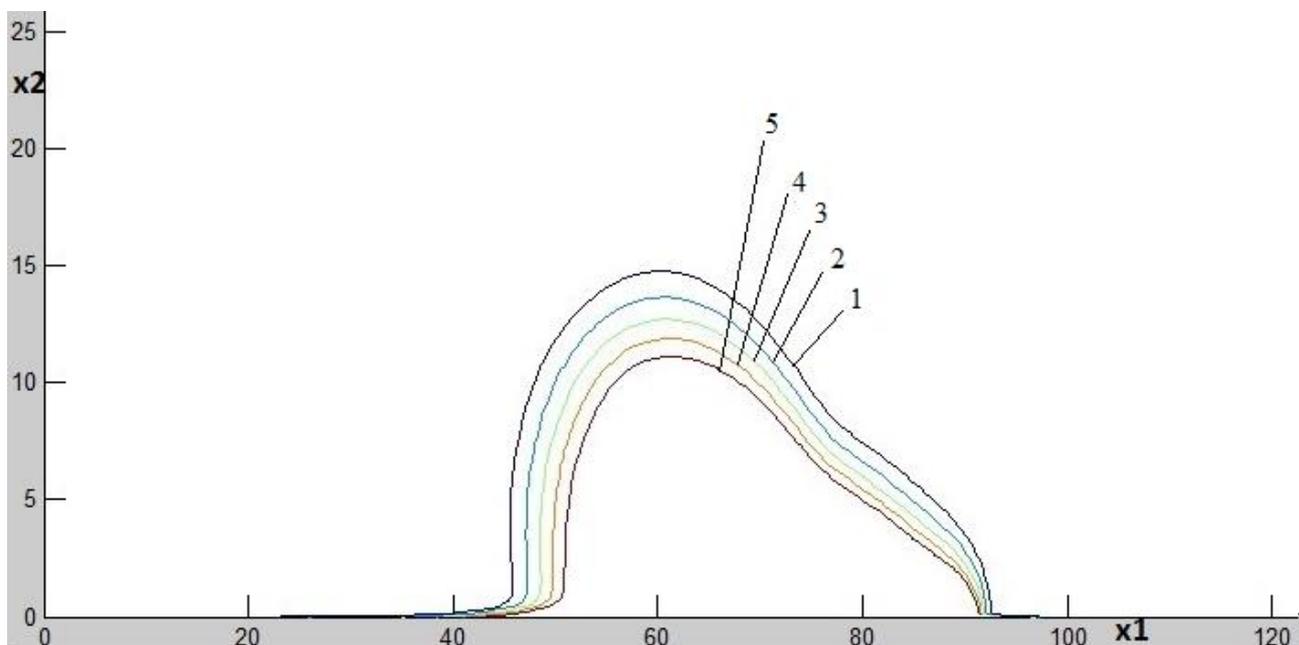


Рисунок 3.3 – Распределение изотерм при $V=5$ м/с., $t=8,9$ с.

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5-3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом

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

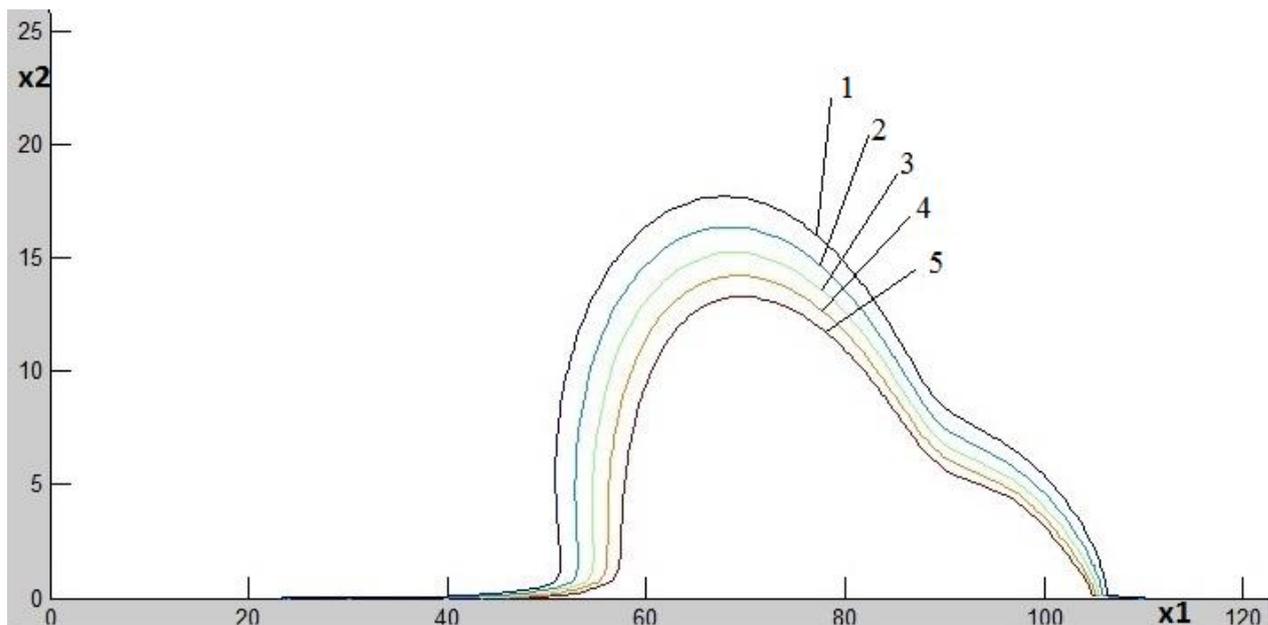


Рисунок 3.4 – Распределение изотерм при $V=6$ м/с., $t=8,9$ с.

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K.$

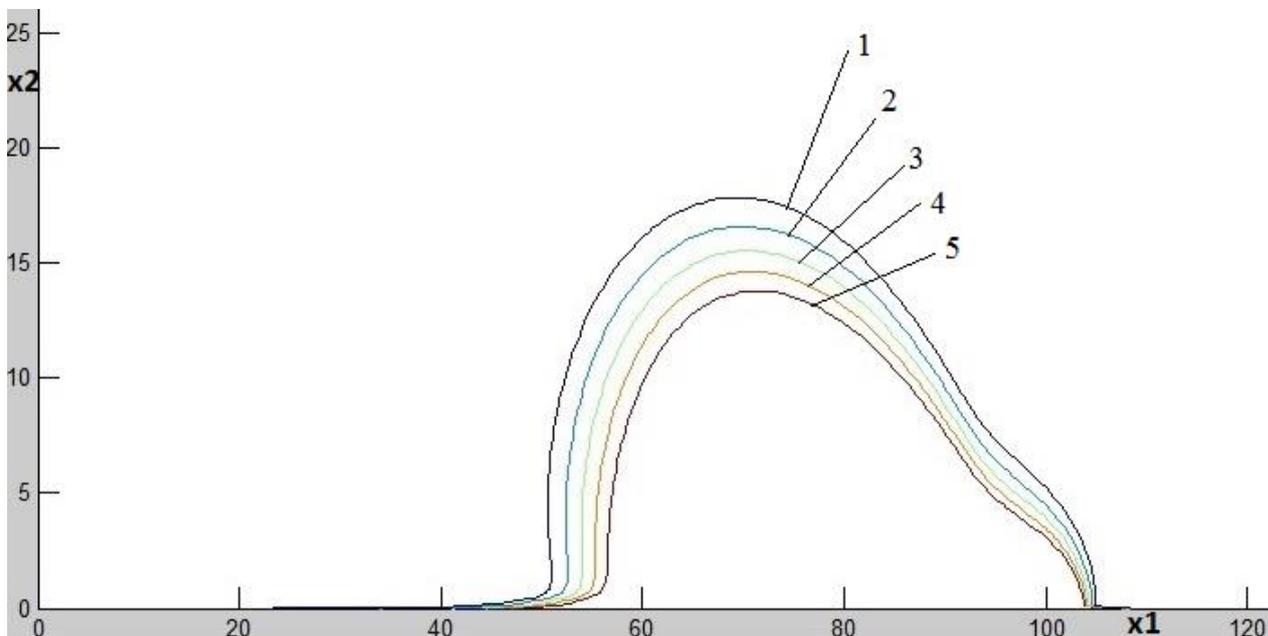


Рисунок 3.5 – Распределение изотерм при $V=7$ м/с., $t=8,9$ с.

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом

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

По рисункам можно сделать вывод, что с увеличением скорости ветра изменяется наклон изотерм.

На основе полученных данных следует, что с течением времени возрастают температуры газовой и твердой фаз, происходит уменьшение массовой концентрации кислорода и изменение количества горючих продуктов пиролиза и объемных долей фаз на нижней границе полого леса вблизи очага горения. В результате воздействия очага повышенной температуры в его окрестности происходит прогрев полого леса, испарение влаги и разложение сухого ЛГМ. В результате этого в пологе леса выделяются летучие горючие продукты пиролиза. Во все время процесса температура газовой фазы выше температуры твердой фазы.

3.2 Результаты численных расчетов распространения верховых лесных пожаров с учетом противопожарных разрывов

На рисунках 3.6-3.8 приведены результаты расчетов для противопожарных разрывов, вид с боку. Представлены распределения температуры при скорости ветра 3 м/с и ширине разрыва 15 метров (рисунок 3.6), при скорости ветра 5 м/с и ширине разрыва 30 метров (рисунок 3.7), и при скорости ветра 7 м/с и ширине разрыва 40 метров (рисунок 3.8). Разрыв расположен на расстоянии 50 метров от начала координат.

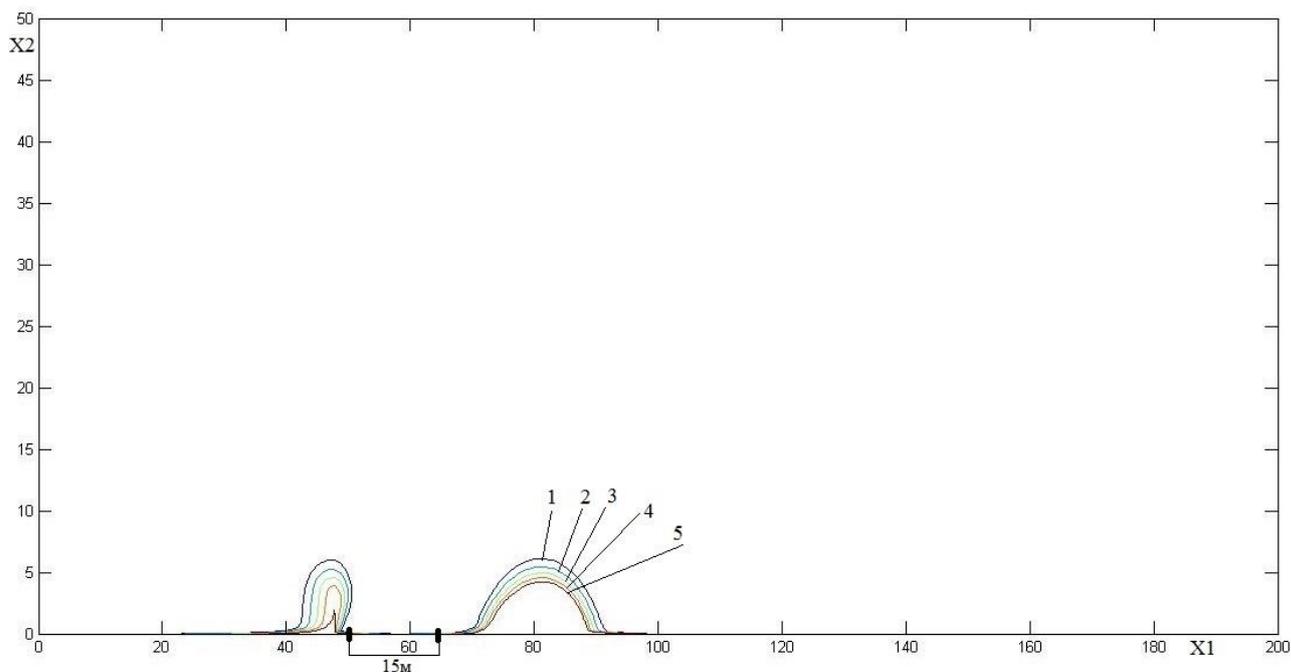


Рисунок 3.6 – Распространение температуры при скорости ветра 3 м/с и ширине разрыва 15 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300\text{K}$.

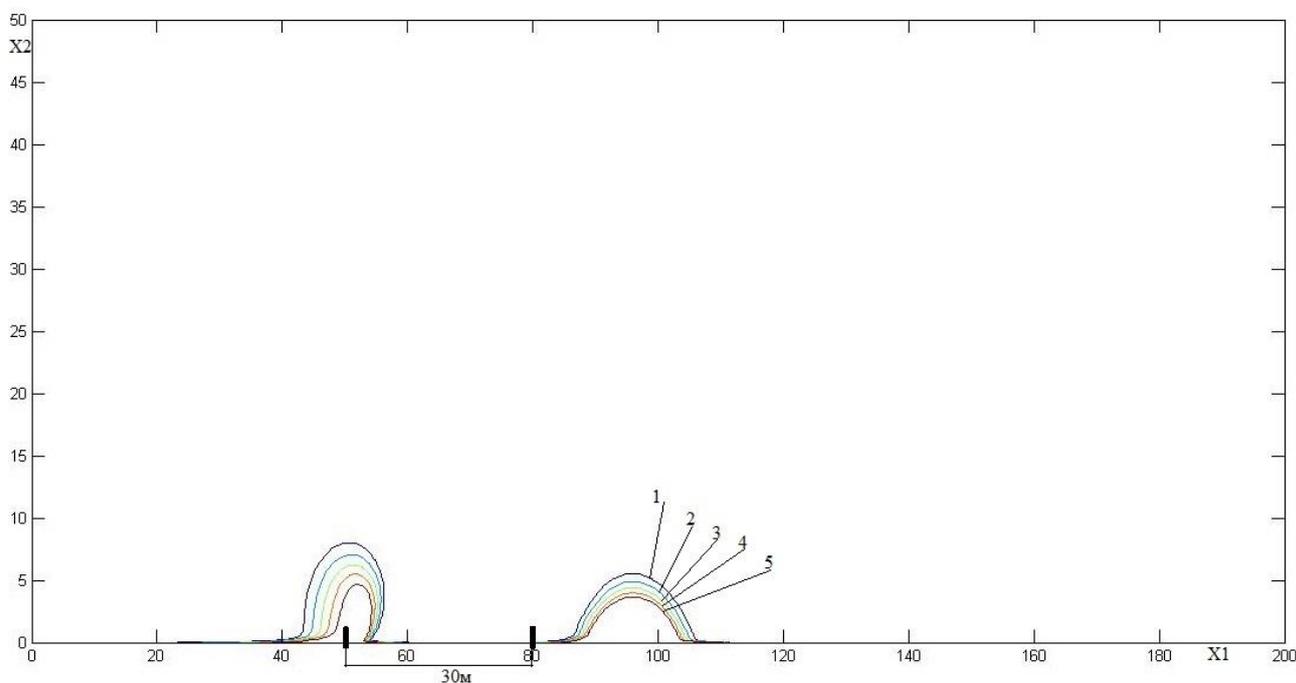


Рисунок 3.7 – Распространение температуры при скорости ветра 5 м/с и ширине разрыва 30 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$.

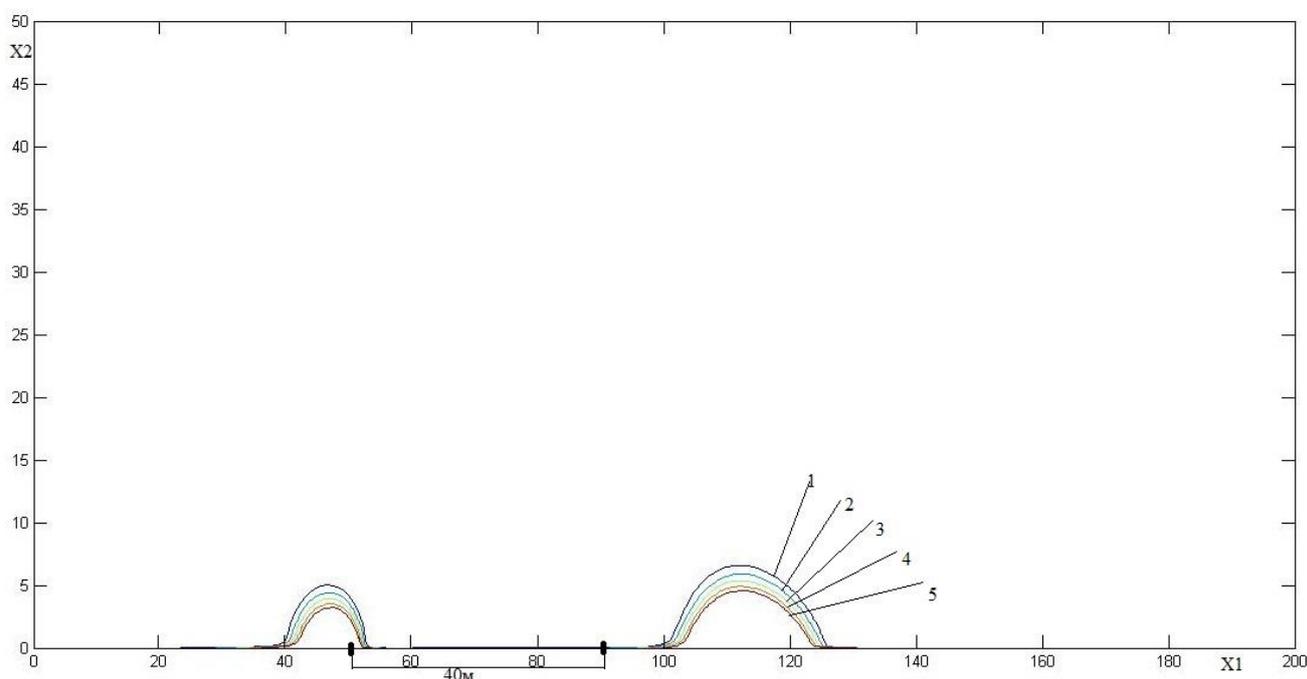


Рисунок 3.8 – Распространение температуры при скорости ветра 7 м/с и ширине разрыва 40 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$.

На основании распределения температуры по рисункам можно сделать вывод, что фронт верхового лесного пожара преодолевает данный разрыв.

На Рисунках 3.9-3.11 представлены распределения температуры при скорости ветра 3 м/с и ширине разрыва 20 метров (рисунки 3.9), при скорости ветра 5 м/с и ширине разрыва 33 метров (рисунки 3.10) и при скорости ветра 7 м/с и ширине разрыва 45 метров (рисунки 3.11), разрыв расположен на расстоянии 50 метров от начала координат.

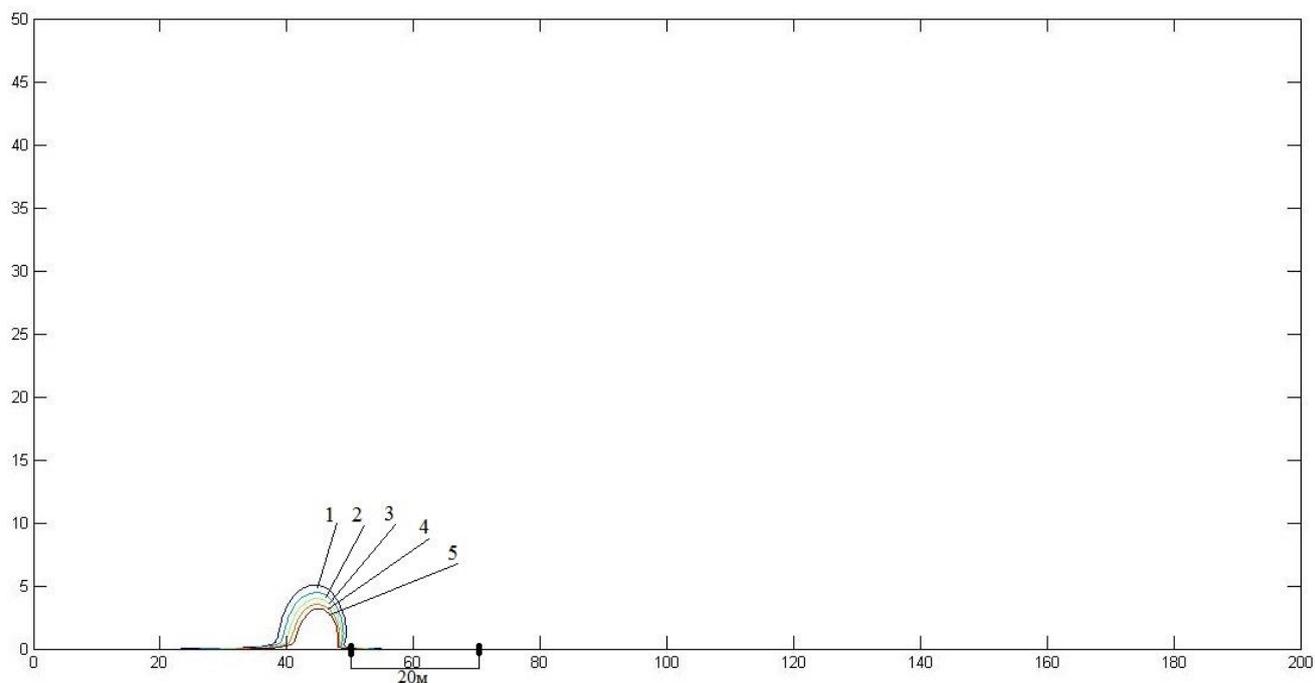


Рисунок 3.9 – Распространение температуры при скорости ветра 3 м/с и ширине разрыва 20 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T / T_e, T_e = 300\text{K}$.

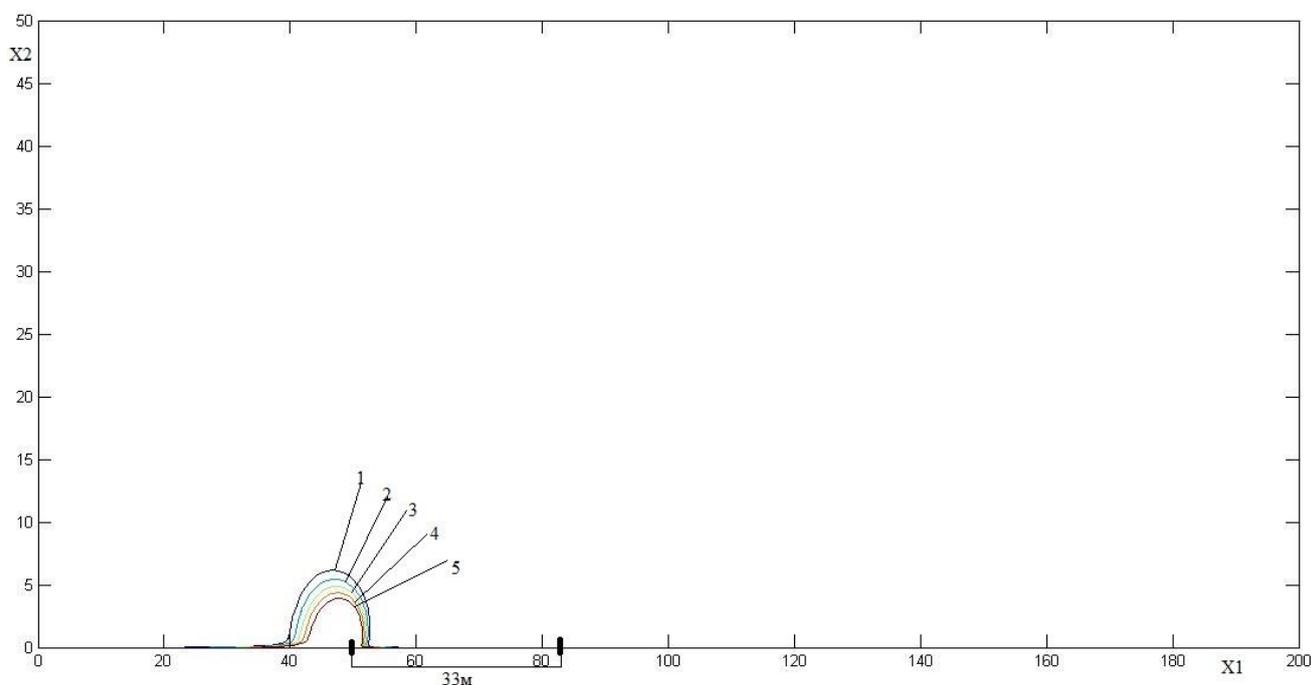


Рисунок 3.10 – Распространение температуры при скорости ветра 5 м/с и ширине разрыва 33 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$.

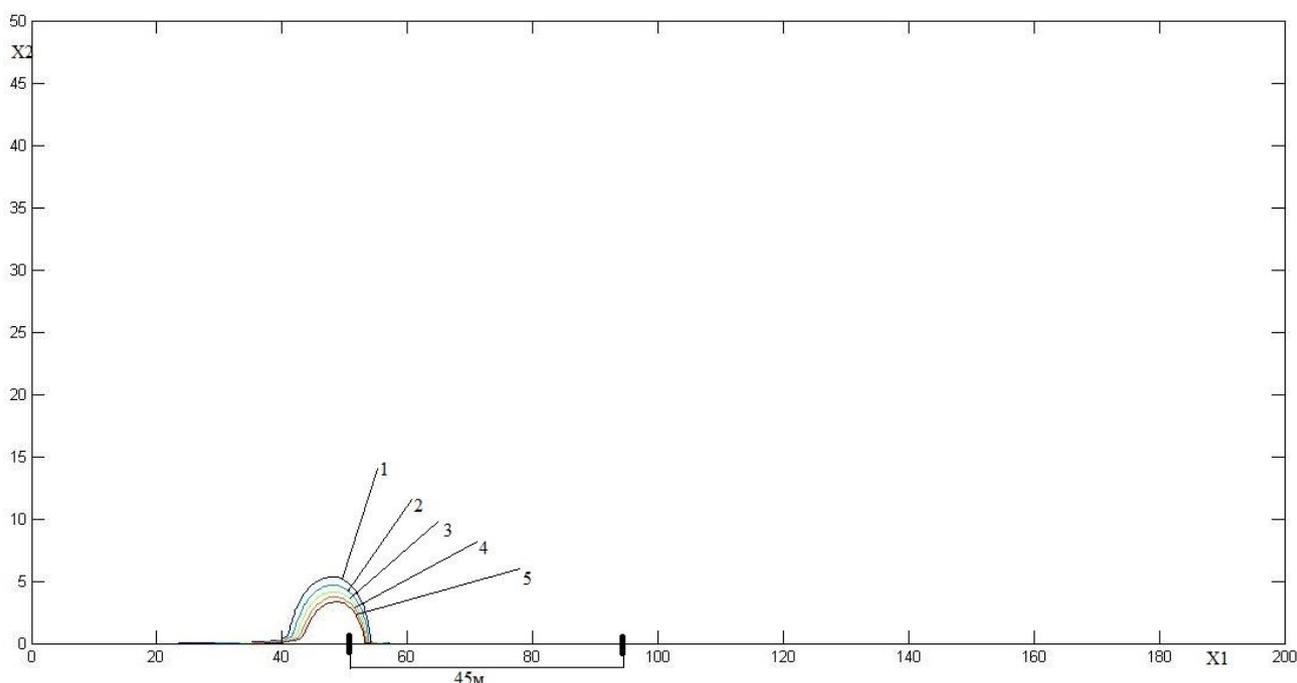


Рисунок 3.11 – Распространение температуры при скорости ветра 7 м/с и ширине разрыва 45 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$.

Из рисунков можно сделать вывод, что фронт верхового лесного пожара не преодолевает данный разрыв, температура после разрыва ниже температуры горения. После разрыва ширина фронта пожара несколько снижается, но затем происходит дальнейшее расширение и продвижение фронта горения. При увеличении ширины противопожарного разрыва верховой пожар не переходит через разрыв. Из представленного распределения изотерм следует, что горение прекратилось.

3.3 Результаты численных расчетов распространения верховых лесных пожаров с учетом противопожарных заслонов

На рисунках 3.12-3.14 приведены результаты расчетов для противопожарных заслонов, вид сверху. Представлены распределения температуры при скорости ветра 3 м/с и ширине разрыва 13 метров (рисунок 3.12), при скорости ветра 5 м/с и ширине разрыва 19 метров (рисунок 3.13), и при скорости ветра 7 м/с и ширине разрыва 25 метров (рисунок 3.14). Заслон расположен на расстоянии 50 метров от начала координат.

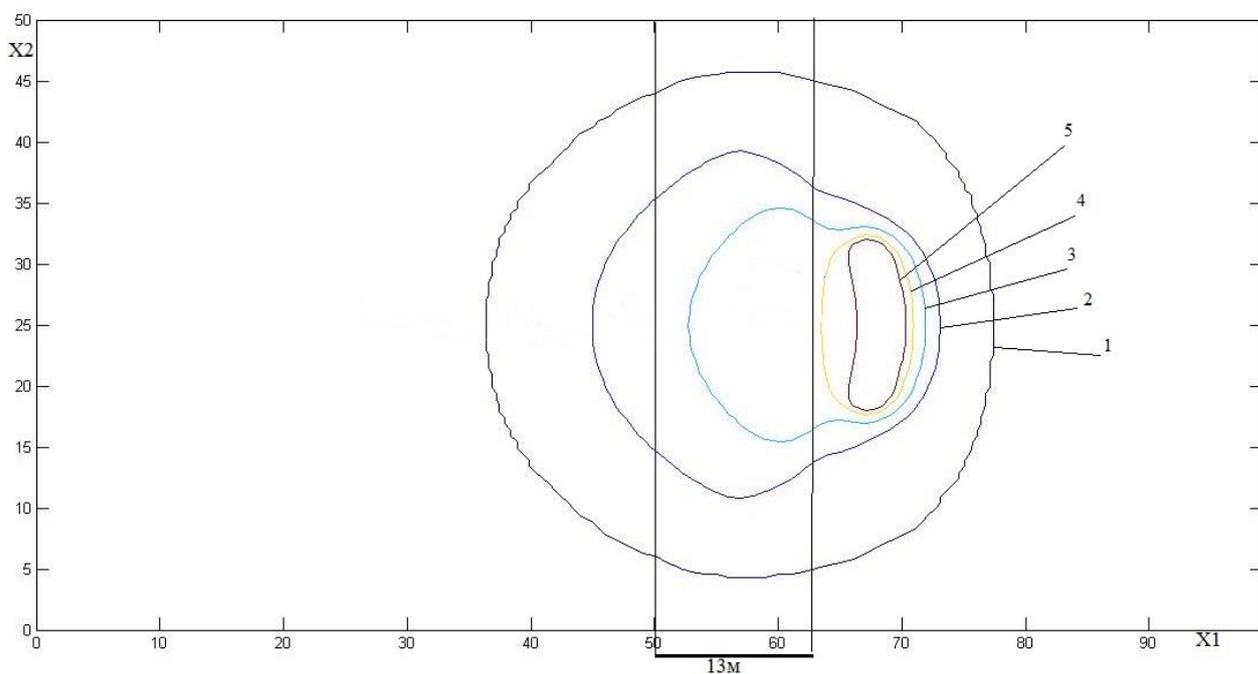


Рисунок 3.12 – Распространение температуры при скорости ветра 3 м/с и ширине разрыва 13 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$.

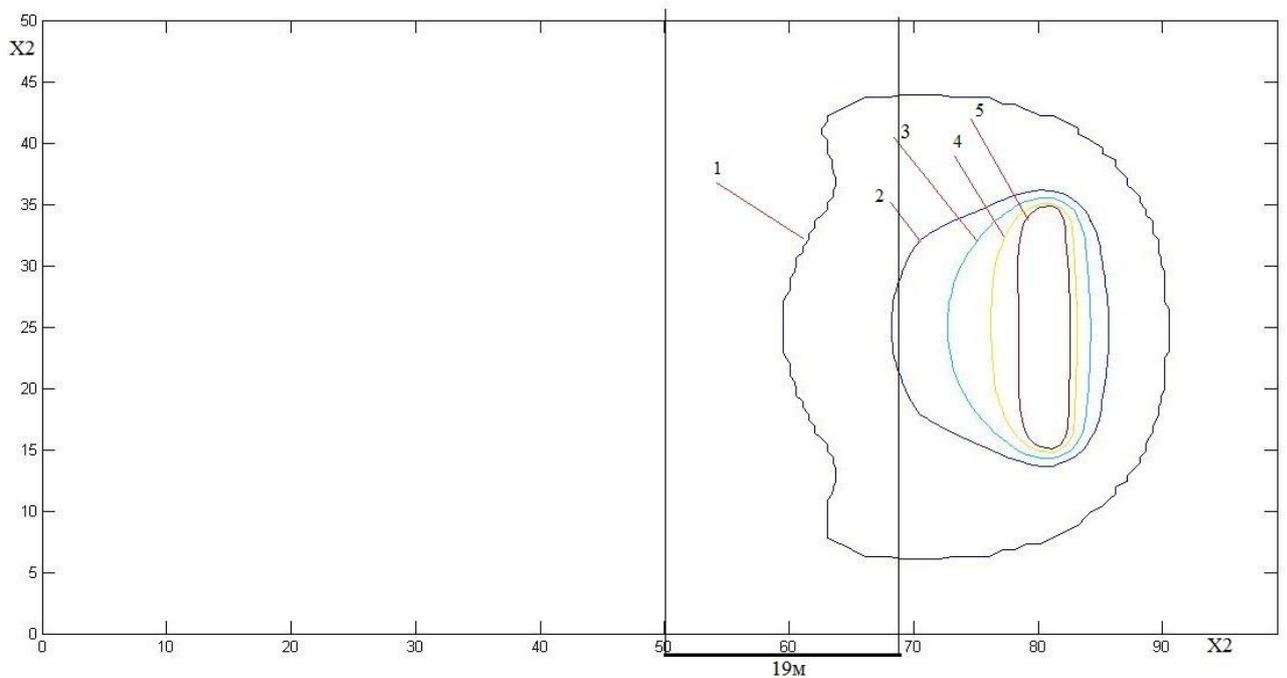


Рисунок 3.13 – Распространение температуры при скорости ветра 5 м/с и ширине разрыва 19 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300\text{K}$.

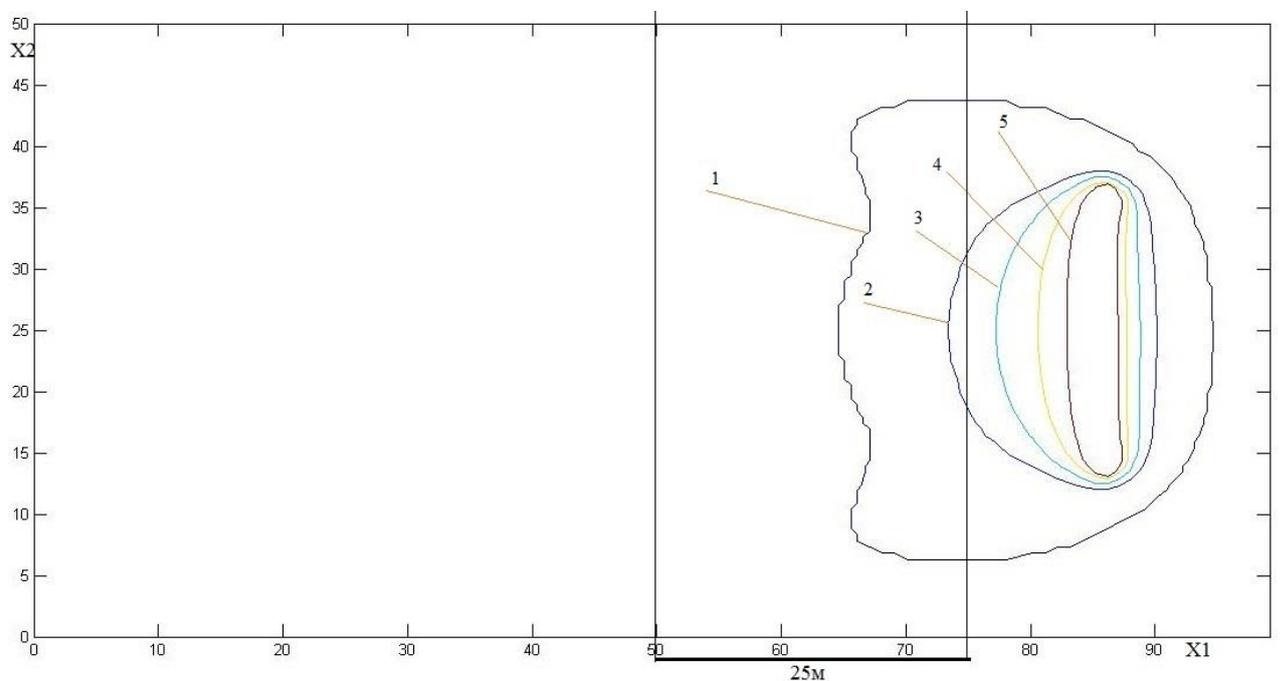


Рисунок 3.14 – Распространение температуры при скорости ветра 7 м/с и ширине разрыва 25 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300\text{K}$.

На основании распределения температуры по рисункам можно сделать вывод, что фронт верхового лесного пожара преодолевает данный заслон.

Далее на рисунках представлены распределения температуры при скорости ветра 3 м/с и ширине разрыва 13 метров (рисунки 3.15), при скорости ветра 5 м/с (3.16) и ширине разрыва 19 метров и при скорости ветра 7 м/с (3.17) и ширине разрыва 26 метров. Заслон расположен на расстоянии 50 метров от начала координат.

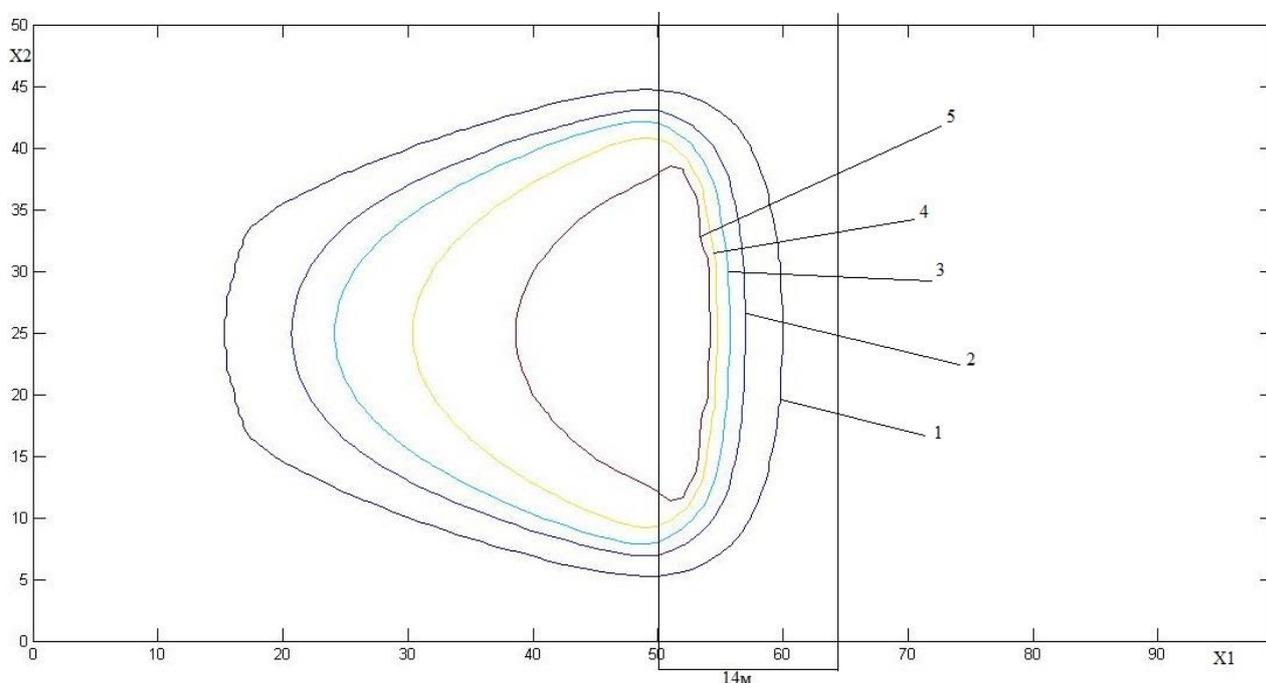


Рисунок 3.15 – Распространение температуры при скорости ветра 3 м/с и ширине разрыва 14 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300\text{K}$.

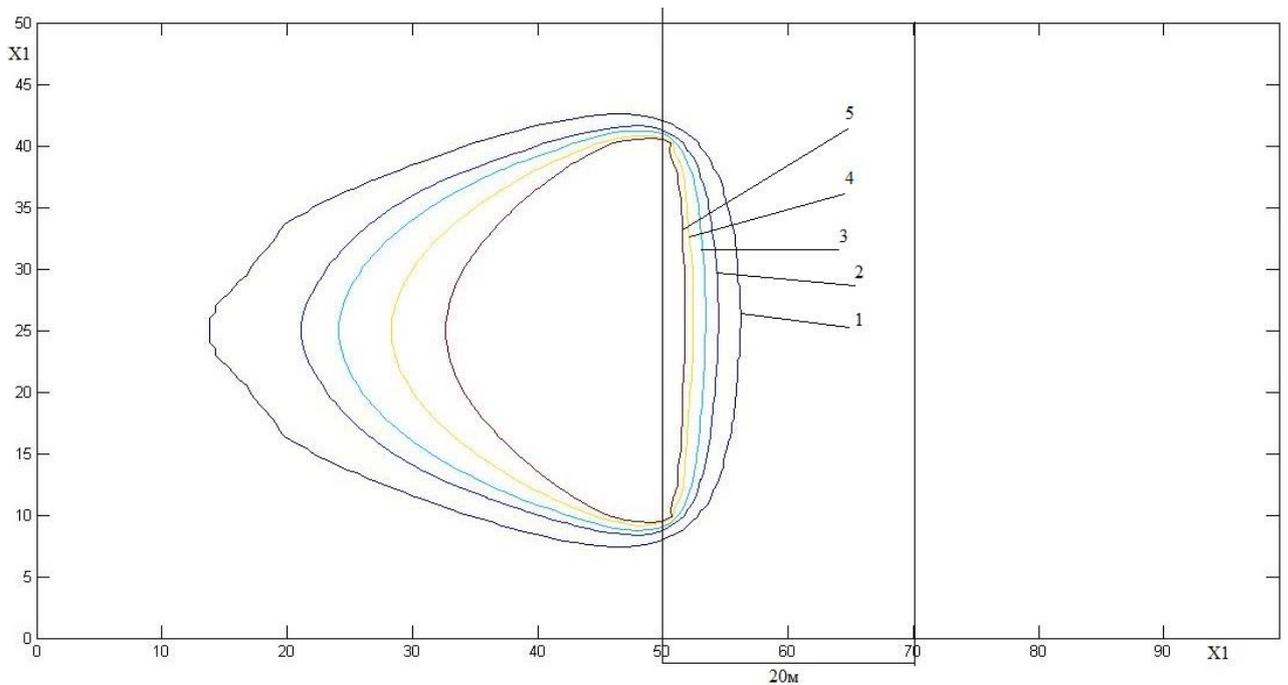


Рисунок 3.16 – Распространение температуры при скорости ветра 5 м/с и ширине разрыва 20 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300\text{K}$.

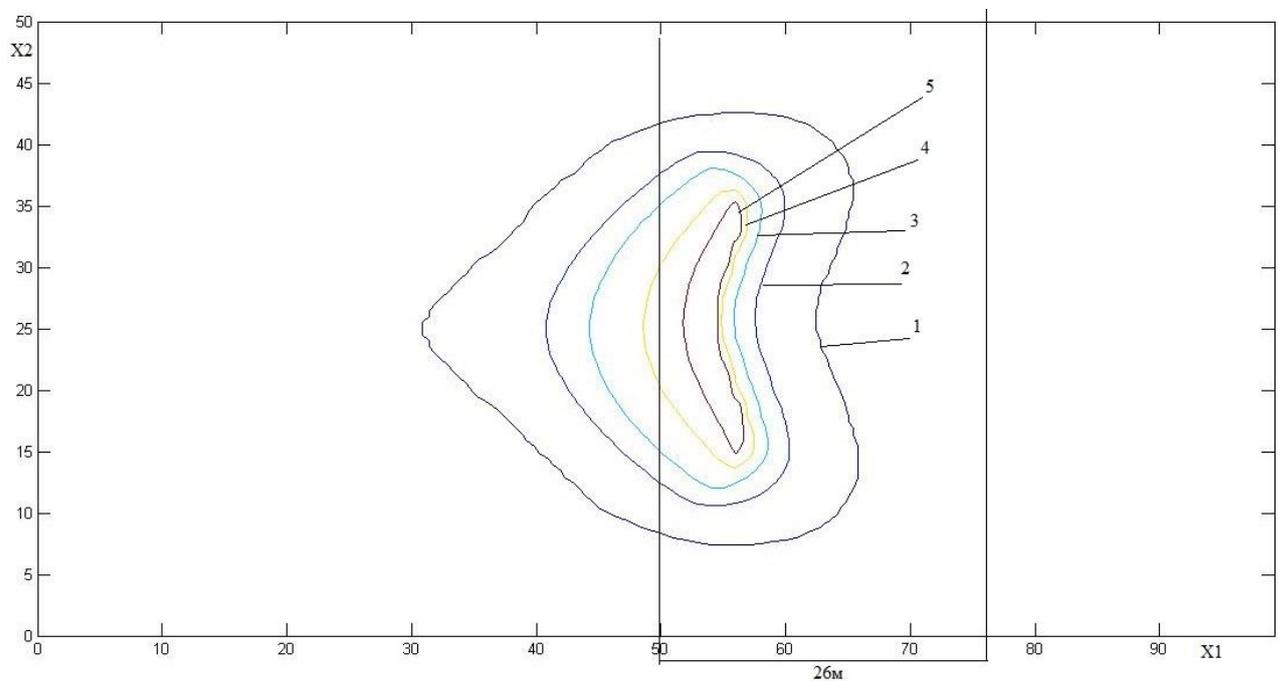


Рисунок 3.17 – Распространение температуры при скорости ветра 7 м/с и ширине разрыва 26 метров

Числами 1- 5; 2-4,5; 3 - 4; 4 - 3,5; 5- 3 обозначены значения изотерм безразмерной температуры, которая определяется следующим образом $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$.

По рисунком видно, что после заслона значение температуры ниже температуры горения, следовательно процесс горения прекращается. Это означает, что верховой лесной пожар не проходит противопожарный заслон. На основании данных результатов можно сделать вывод, что при увеличении противопожарного заслона верховой лесной пожар прекращается при заданных условиях.

3.4 Сравнение противопожарного разрыва и противопожарного заслона

В результате расчетов получена зависимость размеров противопожарного разрыва и противопожарного заслона от скорости ветра.

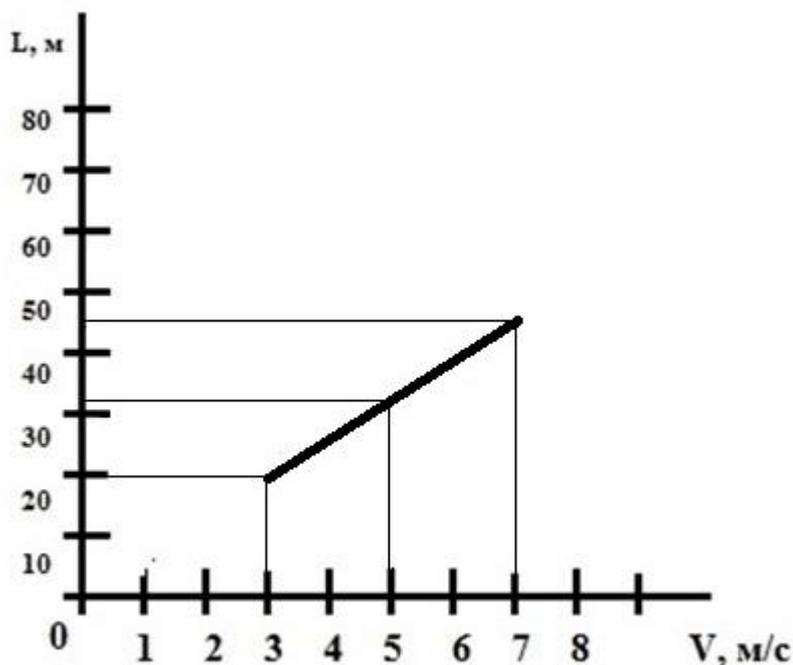


Рисунок 3.18 - Зависимость размера противопожарного разрыва от скорости ветра

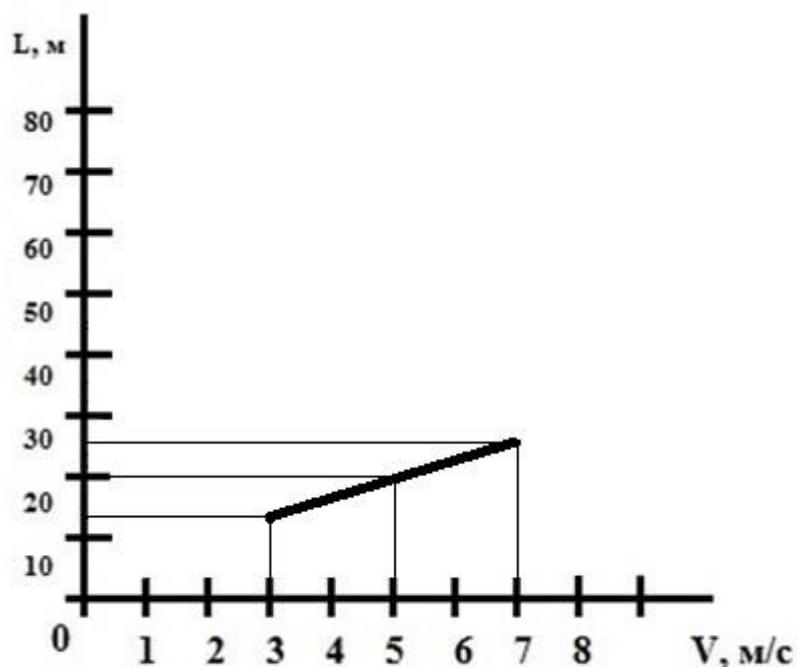


Рисунок 3.19 - Зависимость размера противопожарного заслона от скорости ветра

По рисункам можно сделать вывод, что при равных условиях противопожарный заслон меньше чем противопожарный разрыв, это связано с высоким влагосодержанием противопожарного заслона. При профилактике можно чередовать противопожарные заслоны и разрывы. Данный подход является более эффективным для предотвращения распространения верховых лесных пожаров.

Таким образом, применение данной математической модели позволяет оценить скорость распространения верховых лесных пожаров в зависимости от характеристик лесного массива и метеорологических условий. Кроме того, с помощью представленной модели можно определять размеры противопожарных разрывов и противопожарных заслонов для профилактических мероприятий по предотвращению распространения верховых лесных пожаров.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Магистерская работа по теме «Математическое моделирование верховых лесных пожаров с учетом противопожарных разрывов и заслонов». Заинтересованными лицами в полученных данных будут являться МЧС РФ.

Суть работы заключается в разработке методики оценки условий распространения лесных пожаров с учетом противопожарных разрывов.

Сегментировать рынок услуг по работе с компьютерной программой можно по следующим критериям: зоны пожара, где размещается организация и визуальное представление результатов математического моделирования (таблица. 4.1).

Таблица 4.1 – Сегментирование рынка

		Полог леса	Над пологом леса
Визуальное представление результатов математического моделирования	Формулы	1,2	1
	Графическое отображение	1,2	1
	Таблицы чисел	1,2	1

1. Математическая программа рассчитывающая противопожарные разрывы;
2. BREAK.

Результат сегментирования показал, что уровень конкуренции низок. Математическая программа рассчитывающая противопожарные разрывы, как видно из сегментирования, единственная программа, которая может моделировать верховые лесные пожары над полог леса.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}
1	2	3	4	6	7
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1.Удобство эксплуатации	0,1	5	4	0,5	0,4
2.Автоматический расчет уравнений программой	0,2	5	2	1	0,4
3.Качество интеллектуального интерфейса	0,1	5	4	0,5	0,4
4. Надежность	0,1	5	3	0,5	0,3
5.Визуальное представление результатов	0,2	5	3	1	0,6
Экономические критерии оценки эффективности					
1 цена	0,05	5	5	0,25	0,25
2 Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	0,5	0,5
3 Конкурентноспособность работы	0,15	5	3	0,75	0,45
Итого	1	35	20	5	2,35

Где сокращения: Бф- Математическая программа рассчитывающая противопожарные разрывы; Бк1 – BREAK.

Анализ конкурентных технических решений определили по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (4.1.1)$$

где: K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

Итогом данного анализа является то, что метод предложенный в дипломе эффективнее, чем методы конкурентов. Конкурентное преимущество в том, что: в математической программе рассчитывающей противопожарные разрывы моделирует 2D модель и результат представляется в картинках; программа все нужные уравнения считает автоматически; простота использования.

4.1.3 SWOT – анализ

Таблица 4.3 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	<p>С1. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С2. Наличие опытного руководителя</p> <p>С3. Наличие современного программного продукта</p> <p>С4. Актуальность проекта</p>	<p>Сл1. Развитие новых технологий</p> <p>Сл2. Ограниченная область применения</p> <p>Сл3. Отсутствие квалифицированного персонала.</p> <p>Сл4. Ограниченные финансовые возможности</p>
<p>В1. Повышение уровня локализации пожаров</p> <p>В2. Возможность создания партнерских отношений с рядом ведущих вузов.</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В4. Возможность создания эффективного метода ликвидации пожара.</p>	<p>- Возможно, создать партнерские отношения с рядом ведущих вузов для улучшения эффективного метода л;</p> <p>- При наличии вышеперечисленных достоинств мы имеем большой потенциал повышения уровня локализации пожаров.</p>	<p>- В дальнейшем снижение цены на математическую программу рассчитывающую противопожарные разрывы;</p>

Продолжение таблицы 4.3 – Матрица SWOT

У1. Появление новых технологий У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У3. Введение дополнительных государственных требований и сертификации программы. У4. Неумение персонала пользоваться продуктом	- За счет появления новых технологий цена на программу уменьшится; - Повышение квалификации персонала т.к. тема актуальна и есть современное оборудование.	- расширение области применения за счет развития новых технологий. - Испытание в работе/доказательство наибольшей эффективности метода, чем у конкурентов;
--	---	---

Интерактивные матрицы проекта представлены в таблицах 4, 5, 6, 7.

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица возможностей и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности		С1	С2	С3	С4
Проекта	В1	-	+	+	-
	В2	+	+	+	+
	В3	-	+	+	+
	В4	+	+	+	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и возможности: В1С1С2С3С4С5, В2С1С2С3С4, В3С2С3С4, В4С1С2С3С4С5.

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица возможностей и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта					
Возможности		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Проекта	В1	+	-	+	-
	В2	-	-	+	+
	В3	+	-	-	-
	В4	+	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и возможности: В1С1С3, В2Сл3Сл4, В3В4Сл1.

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица угроз и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта					
Угрозы Проекта		С1	С2	С3	С4
	У1	-	-	+	-
	У2	-	-	0	-
	У3	-	-	-	-
	У4	-	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и угроз: У1С3.

Таблица 4.7 – Интерактивная матрица угроз и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	+	0	-	+
	У2	+	+	-	-
	У3	-	-	-	-
	У4	-	-	+	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и угроз: У1Сл1Сл4, У2С1С2, У4С3.

4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

В рамках данного раздела проведены альтернативные научные исследования в разделе 2. «Постановка задачи» ВКР.

Таблица 4.8 - Морфологическая матрица

	1	2	3	4
А. Визуализация результатов	график	формулы	2D модель	отсутствует
Б. Описание процесса	формулы	таблицы	блок схема	Отсутствуют
В. Описание поражающих факторов, количество	1	2	3	>3
Г. Длительность расчета программой, мин	5	20	40	60
Д. Интерфейс	русский	английский	французский	англо-русский
Е. Модели математического моделирования	интегральная	зонная	полевая	

Возможные варианты решения технической задачи:

- 1) А1Б1В3Г1Д4Е1 – В первом случае, программа производит расчет только при малых скоростях ветра. В данной программе используется интегральный модель математического моделирования и расчет занимает мало времени. Представление результатов происходит с помощью графика.
- 2) А1Б1В4Г2Д1Е2 – Во втором случае, программа производит расчет также при малых скоростях ветра. В данной программе используется зонная модель математического моделирования и расчет занимает чуть больше времени, чем в первом случае. Представление результатов происходит с помощью графика.
- 3) А3Б1В4Г3Д2Е3 - В третьем случае, программа производит расчет при больших скоростях ветра. В данной программе используется полевая

модель математического моделирования и расчет занимает достаточно много времени. Представление результатов – 2D модель.

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 4.9 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Анализ актуальности темы	
Выбор направления исследования	3	Поиск и изучение материала по теме	Студент
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель, студент
	5	Календарное планирование работ	
Теоретические исследования	6	Изучение литературы по теме	Студент
	7	Подбор нормативных документов	
	8	Изучение компьютерной программы	
Практические исследования	9	Моделирование распространение верховых пожара	Студент
	10	Моделирование противопожарных разрывав	
	11	Изучение результатов	
	12	Проведение расчетов по теме	
Оценка полученных результатов	13	Анализ результатов	студент
	14	Вывод по цели	Научный руководитель, студент

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (4.3.1)$$

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4.3.2)$$

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

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

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

4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

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

$$T_{ki} = T_{pi} \times k_{кал}, \quad (4.3.3)$$

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:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.3.4)$$

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

$T_{\text{вых}} = 104$ – количество выходных дней в году;

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

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48.$$

Все рассчитанные значения вносим в таблицу (таблица 4.10).

После заполнения таблицы 10 строим календарный план-график (табл. 4.11). График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 4.10 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ									Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}			Длительность работ в календарных днях T_{ki}		
	t_{min} , чел-дни			t_{max} , чел-дни			$t_{ожi}$, чел-дни				Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3							
Составление и утверждение темы проекта	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руководитель	2	2	2	3	3	3
Анализ актуальности темы	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Рук.-студ.	1	1	1	2	2	2
Поиск и изучение материала по теме	1	1	1	5	5	5	2,6	2,6	2,6	Студ.-рук.	1	1	1	2	2	2
Выбор направления исследований	1	2	2	3	4	4	1,4	2,8	2,8	Руководитель	1	2	2	2	3	3
Календарное планирование работ	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руководитель	2	2	2	3	3	3
Изучение литературы по теме	7	7	7	14	14	14	9,8	9,8	9,8	Студент	10	10	10	15	15	15
Подбор нормативных документов	5	6	6	8	9	9	6,2	7,2	7,2	Студ.-рук.	3	4	4	5	6	6
Изучение ПО	3	5	5	5	7	7	3,8	5,8	5,8	Студент	4	6	6	6	9	9
Моделирование распространение верховых пожара	1	2	3	3	4	5	1,8	2,8	3,8	Студент	2	3	4	3	5	6
Моделирование противопожарных разрывав	1	2	3	3	4	5	1,8	2,8	3,8	Студент	2	3	4	3	5	6
Изучение результатов	1	2	2	2	3	3	1,4	3	3	Студент	2	3	3	3	5	5
Проведение расчетов по теме	5	6	6	8	9	9	6,2	7,2	7,2	Студент	7	8	8	10	11	11
Анализ результатов	1	1	1	4	4	4	2,2	2,2	2,2	Студент	2	2	2	3	3	3
Вывод по цели	1	1	1	4	4	4	2,2	2,2	2,2	Студ.-рук.	3	3	3	4	4	4

Таблица 4.11 – Календарный план-график проведения ВКР по теме

№ Работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ										
				Март			апрель			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	3											
2	Анализ актуальности темы	Рук.-студ.	2		 									
3	Поиск и изучение материала по теме	Студ.-рук.	2			 								
4	Выбор направления исследований	Руководитель	2											
5	Календарное планирование работ	Руководитель	3											
6	Изучение литературы по теме	Студент	15											
7	Подбор нормативных документов	Студ.-рук.	5						 					
9	Моделирование распространение верховых пожара	Студент	3											
10	Моделирование противопожарных разрывав	Студент												
11	Изучение результатов	Студент	3											
12	Проведение расчетов по теме	Студент	10											
13	Анализ результатов	Студент	3											
14	Вывод по цели	Студ.-рук.	4											 

 – студент;  – руководитель.

4.3.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).

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

4.3.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи}, \quad (4.3.5)$$

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

$N_{расхи}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов.

Таблица 4.12 – Материальный затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы, (Z _м), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Бумага	лист	150	100	130	2	2	2	345	230	169
Картридж для	шт.	1	1	1	1000	1000	1000	1150	1150	1150
Интернет	М/бит (пакет)	1	1	1	350	350	350	402,5	402,5	402,5
Ручка	шт.	1	1	1	20	20	20	23	23	23
Дополнительная литература	шт.	2	1	1	400	350	330	920	402,5	379,5

Продолжение таблицы 4.12 – Материальный затраты

Тетрадь	шт.	1	1	1	10	10	10	11,5	11,5	11,5
Компьютер	шт	1	1	1	30000	30000	30000	34501	34501	34501
Итого								37353	36720,	36636,

4.3.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме.

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены.

Таблица 4.13 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	Математическая программа рассчитывающая противопожарные разрывы	1	1	1	200	150	170	230	172,5	195,5
Итого:								230	172,5	195,5

4.3.3.3 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от

тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл. 4.13.

Таблица 4.14 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудо-емкость, чел.-дн.			Заработная плата, приходящаяся на один чел.-			Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.		
			Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	2	2	2	3,6			8	8	8
2.	Анализ актуальности темы	Рук.-студ.	1	1	1	4,4			5	5	5
3.	Поиск и изучение материала по теме	Студ.-рук.	1	1	1	4,4			5	5	5
4.	Выбор направления исследований	Руководитель	1	2	2	3,6			4	8	8
5.	Календарное планирование работ	Руководитель	2	2	2	3,6			8	8	8
6.	Изучение литературы по теме	Студент	10	10	10	0,8			8,9	8,9	8,9
7.	Подбор нормативных документов	Студ.-рук.	3	4	4	4,4			14,8	19,7	19,7
8.	Изучение ПО	Студент	4	6	6	0,8			3,6	5,4	5,4
9.	Моделирование распространение верховых пожара	Студент	2	3	4	0,8			1,8	2,7	3,6
10.	Моделирование противопожарных разрывав	Студент	3	3	4	0,8			2,7	2,7	3,6
11.	Изучение результатов	Студент	2	3	3	0,8			1,8	2,7	2,7
12.	Проведение расчетов по теме	Студент	7	8	8	0,8			6,3	7,2	7,2
13.	Анализ результатов	Студент	2	2	2	4,4			9,8	9,8	9,8
14.	Вывод по цели	Студ.-рук.	3	3	3	0,8			2,7	2,7	2,7
Итого:									82,4	86,9	88,7

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

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.3.6)$$

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

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

Максимальная основная заработная плата руководителя (доктора наук) равна примерно 48000 рублей, а студента 31700 рублей.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (4.3.7)$$

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

Таким образом, заработная плата руководителя равна 53760 рублей, студента – 35504 рублей.

4.3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.3.8)$$

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1

ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Таблица 4.15 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб			Дополнительная заработная плата, руб		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель проекта	48000	57000	57000	5760	6840	6840
Студент-дипломник	31700	27200	28100	3804	3264	3372
Коэффициент отчислений	0,271					
Итого						
Исполнение 1	24190,5 руб.					
Исполнение 2	25556,4 руб.					
Исполнение 3	25829,5 руб.					

4.3.4.5 Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{накл} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{нр}, \quad (4.3.9)$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Таким образом, наибольшие накладные расходы при первом исполнении равны: $Z_{накл} = 357807,5 \cdot 0,16 = 57249,2$ руб.

3.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Таблица 4.16 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
1. Материальные затраты НТИ	37353	36720,5	36636,5	Пункт 3.3.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	207000	115000	138000	Пункт 3.3.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	79700	84200	85100	Пункт 3.3.3

Продолжение таблицы 4.16 – Расчет бюджета затрат НТИ

4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	9564	10104	10212	Пункт 3.3.3
5. Отчисления во внебюджетные фонды	24190,5	25556,4	25829,5	Пункт 3.3.4
6. Накладные расходы	57249,2	43452,9	47324,5	16 % от суммы ст. 1-5
7. Бюджет затрат НТИ	415056,7	315033,8	343102,5	Сумма ст. 1- 6

4.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (4.4.1)$$

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

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

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

$$I_{финр}^{исп1} = \frac{415056,7}{415056,7} = 1; I_{финр}^{исп2} = \frac{315033,8}{415056,7} = 0,76; I_{финр}^{исп3} = \frac{343102,5}{415056,7} = 0,83.$$

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

$$I_{pi} = \sum a^i \cdot b^i, \quad (4.4.2)$$

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

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

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

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 4.17).

Таблица 4.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования / Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Визуализация результатов	0,2	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации	0,2	5	2	3
3. Интерфейс	0,15	4	4	4
4. Длительность расчетов	0,20	4	5	5
5. Автоматический расчет уравнений	0,15	5	3	4
6. Расчет противопожарных разрывов	0,1	5	1	2
ИТОГО	1	4,65	3,15	3,8

$$I_{p-исп1} = 5 \times 0,2 + 5 \times 0,2 + 4 \times 0,15 + 4 \times 0,2 + 5 \times 0,15 + 5 \times 0,1 = 4,65;$$

$$I_{p-исп2} = 3 \times 0,2 + 2 \times 0,2 + 4 \times 0,15 + 5 \times 0,2 + 3 \times 0,15 + 1 \times 0,1 = 3,15;$$

$$I_{p-исп3} = 4 \times 0,2 + 3 \times 0,2 + 4 \times 0,15 + 5 \times 0,2 + 4 \times 0,15 + 2 \times 0,1 = 3,8.$$

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

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}}, \quad (4.4.3)$$

$$I_{исп1} = \frac{4,65}{1} = 4,65; \quad I_{исп2} = \frac{3,15}{0,76} = 4,14; \quad I_{исп3} = \frac{3,8}{0,83} = 4,57.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.4.18) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп\ i}}{I_{исп\ max}} \quad (4.4.4)$$

Таблица 4.18 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,76	0,83
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	3,15	3,8
3	Интегральный показатель эффективности	4,65	4,14	4,57
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,89	0,98

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

5 Социальная ответственность

Введение

Моя магистерская работа связана с математическим моделированием, в основном, с работой за персональным компьютером (ПК), который находится в аудитории № 120 корпуса № 8 ТПУ.

Для рабочих мест, оборудованных компьютерами (ПЭВМ или ПК), разработаны государственные Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы (далее - Санитарные правила), которые являются основным

документом при эксплуатации ПЭВМ. Точное название этого документа - "СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ". Он утвержден Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 03.06.2003 N 118. Санитарные правила действуют на всей территории Российской Федерации и должны применяться как индивидуальными предпринимателями, так и юридическими лицами, которые эксплуатируют ПЭВМ.

5.1 Вредные и опасные факторы при работе с компьютером

Основные требования Санитарных правил направлены на предотвращение или уменьшение вредных и опасных факторов для людей при работе с компьютерами.

Таблица 5.1 – Требования к ПЭВМ

Нормативные требования	Фактические значения
<p>Конструкция ПЭВМ должна обеспечивать возможность поворота корпуса в горизонтальной и вертикальной плоскости с фиксацией в заданном положении для обеспечения фронтального наблюдения экрана ВДТ. Дизайн ПЭВМ должен предусматривать окраску корпуса в спокойные мягкие тона с диффузным рассеиванием света. Корпус ПЭВМ, клавиатура и другие блоки и устройства ПЭВМ должны иметь матовую поверхность с коэффициентом отражения 0,4 - 0,6 и не иметь блестящих деталей, способных создавать блики.</p>	<p>Конструкция ПЭВМ обеспечена возможностью поворота корпуса, окраска корпуса светло серого цвета и имеет матовую поверхность.</p>

Продолжение таблицы 5.1 – Требования к ПЭВМ

<p>Помещения для эксплуатации ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, преимущественно должны быть ориентированы на север и северо-восток.</p> <p>Оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков и др.</p>	<p>Имеет естественное и искусственное освещение. Окна выходят на северо-восток. Оконные проемы оборудованы жалюзи.</p>
<p>Искусственное освещение в помещениях с ПК должно быть равномерным. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана и должно быть не более 300 лк, а освещенность поверхности стола в зоне рабочего документа должна быть 300 - 500 лк. При искусственном освещении в качестве источника света рекомендуется применять люминесцентные лампы типа ЛБ или компактные люминесцентные лампы (КЛЛ). Допускается применение металлогалогенных ламп.</p> <p>В светильниках местного освещения можно применять обычные лампы накаливания, в том числе галогенные. Для помещений, где используются ПК, можно применять и светильники с зеркальными</p>	<p>В аудитории для искусственного освещения помещения с персональными компьютерами используются светильники прямого света, преимущественно отраженного света типа ЛПОЗ4.</p>

Продолжение таблицы 5.1 – Требования к ПЭВМ

<p>параболическими решетками, которые укомплектованы электронными пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА). Применение светильников без рассеивателей и экранирующих решеток не допускается.</p>	
<p>Помещения для занятий оборудуются одноместными столами, предназначенными для работы с ПЭВМ.</p>	<p>Аудитория оборудована одноместными столами.</p>
<p>Конструкция одноместного стола для работы с ПЭВМ должна предусматривать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - две отдельные поверхности: одна горизонтальная для размещения ПЭВМ с плавной регулировкой по высоте в пределах 520 - 760 мм и вторая - для клавиатуры с плавной регулировкой по высоте и углу наклона от 0 до 15 градусов с надежной фиксацией в оптимальном рабочем положении (12 - 15 градусов); - (ширина обеих поверхностей должна быть одинаковой) и глубину не менее 550 мм; - опору поверхностей для ПЭВМ или ВДТ и для клавиатуры на стояк, в котором должны находиться провода электропитания и кабель локальной сети. <p>Основание стояка следует совмещать с подставкой для ног;</p> <ul style="list-style-type: none"> - отсутствие ящиков; 	<p>Имеются две отдельные поверхности, ширина поверхностей для ВДТ и клавиатуры составляет 750 мм, имеется опора поверхности для ПЭВМ.</p>

Продолжение таблицы 5.1 – Требования к ПЭВМ

увеличение ширины поверхностей до 1200 мм при оснащении рабочего места принтером.	
Высота края стола, обращенного к работающему с ПЭВМ, и высота пространства для ног и рабочий стул должны соответствовать росту обучающихся в обуви.	В наличии высокий стол и регулирующий стул, используется регулируемая по высоте подставка для ног.
Линия взора должна быть перпендикулярна центру экрана и оптимальное ее отклонение от перпендикуляра, проходящего через центр экрана в вертикальной плоскости, не должно превышать +-5 градусов, допустимое +-10 градусов.	Линия взора +3.

Основные требования Санитарных правил направлены на предотвращение или уменьшение вредных и опасных факторов для людей при работе с компьютерами, которые можно разделить на следующие виды:

- электромагнитные и электростатические поля;
- негативное воздействие на зрение, возникающее при восприятии и отображении информации с экрана дисплея;
- недостаточность или неравномерность освещения рабочего места;
- избыточный шум и вибрация;
- несоответствие параметров микроклимата на рабочих местах (температура, относительная влажность, скорость движения воздуха) действующим санитарным нормам;
- несоответствие рабочего места антропометрическим данным работника на ПЭВМ;
- монотонность труда.

Все эти факторы вызывают у работника повышенную утомляемость, расстройство памяти, головную боль, трофические заболевания, заболевания глаз, нарушения сна, боль в запястьях и пальцах, заболевания позвоночника, центральной нервной, сердечно-сосудистой и дыхательной систем, внутренних органов и др.

Если в помещении с компьютерами имеются источники вредных производственных факторов, то рабочие места пользователей ПК должны располагаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом. Рабочие места, оснащенные компьютерами, при выполнении творческой работы должны быть изолированы перегородками высотой 1,5 - 2,0 м. Экран монитора должен располагаться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм.

Работы с ПЭВМ организуются в зависимости от вида и категории трудовой деятельности, для этого производятся исследования физических факторов рабочей среды.

Нормативные документы

Таблица 5.2 – Сведения о нормативной документации (НД) на методы измерения и нормирования

Измеряемый физический фактор среды	Наименование испытаний, параметров, характеристик, показателей	Перечень НД, регламентирующих параметры, характеристики, показатели	Перечень НД на методы испытаний и исследований
Освещение	КЕО, коэффициент пульсации, освещенность рабочей поверхности, освещенность экрана ПЭВМ	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»	ГОСТ Р 54944-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения освещенности» ГОСТ Р 54945-2012 «Здания и сооружения.

Продолжение таблицы 5.2 – Сведения о нормативной документации (НД) на методы измерения и нормирования

		СП 52.13330.2011 Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* "Естественное и искусственное освещение"	Методы измерения коэффициента пульсации освещенности»
Микроклимат	Температура воздуха, влажность, скорость движения воздуха	СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»	СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» МУК 4.3.2756-10 «Методические указания по измерению и оценке микроклимата производственных помещений»
Аэроионный состав воздуха	Концентрация аэроионов, p^- , p^+ в 1 см^3 воздуха; коэффициент униполярности	СанПиН 2.2.4.1294-03 "Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений"	МУК 4.3.1675-03 «Общие требования к проведению контроля аэроионного состава воздуха»
Параметры электромагнитных полей от ПЭВМ	Напряженность электростатического поля; напряженность переменного электрического поля; плотность магнитного потока	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации

			работы»
--	--	--	---------

Результаты измерений параметров освещения помещений:

Таблица 5.3 – Результаты искусственного освещения

	Фактические значения	Нормативные значения
Освещенность рабочей поверхности, лк	431	300-500
Коэффициент пульсации, %	26	<5
Освещенность поверхности экрана, лк	198	<300

Заключение: фактические параметры световой среды соответствуют нормируемым величинам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 " Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" кроме коэффициента пульсации.

Таблица 5.4 – Результаты естественного освещения

	Фактические значения	Нормативные значения
КЕО, %	1,9	1

Заключение: фактический параметр световой среды, а именно естественная освещенность соответствует нормируемым величинам СП 52.13330.2011 Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* "Естественное и искусственное освещение".

Таблица 5.5 – Результаты измерения микроклимата помещений (рабочих мест)

	Высота от пола, м.	Фактические значения	Нормативные значения
Температура окружающего воздуха, С	0,1	22,5	21-28
	1,0	22,5	21-28
Относительная влажность		61	15-75

воздуха, %			
------------	--	--	--

Продолжение таблицы 5.5 – Результаты измерения микроклимата помещений (рабочих мест)

Скорость движения воздуха, м/с	0,1	Менее 0,1	0,1
	1,0	Менее 0,1	0,1

Заключение: фактические параметры микроклимата по температурному режиму, относительной влажности воздуха и скорости движения воздуха соответствуют нормируемым величинам СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

Таблица 5.6 – Результаты измерений аэроионного состава воздуха

		Фактические значения	Нормативные значения
Концентрация аэроионов в 1 см ³ воздуха, p (ион/см ³)	p ⁻	805	600 < p ⁻ ≤ 50000
	p ⁺	468	400 ≤ p ⁺ < 50000
Коэффициент униполярности, У		0,58	0,4 ≤ У < 1,0

Заключение: измеренные уровни содержания аэроионов в воздухе соответствуют санитарно-гигиеническим нормам по СанПиН 2.2.4.1294-03 "Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений".

Таблица 5.7 – Результаты измерений электромагнитных полей на рабочих местах пользователей ПЭВМ

	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц			Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц		
	0,5м	1м	1,5м	0,5м	1м	1,5м
Напряженность переменного электрического поля, В/м	ПДУ 25			ПДУ 2,5		
	15	17	20	менее 0,8	менее 0,8	менее 0,8
Плотность магнитного потока, нТл	ПДУ 250			ПДУ 25		
	менее 80	менее 80	менее 80	менее 8	менее 8	менее 8
Напряженность электростатического поля, кВ/м	ПДУ 15					
	0,5м		1м		1,5м	
	0,25		0,32		0,20	

Заключение: фактические параметры по напряженности переменного электрического поля, напряженности электростатического поля и по показателю плотности магнитного потока соответствуют нормируемым величинам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

Все фактические параметры соответствуют нормируемым величинам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 " Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы".

В зависимости от категории трудовой деятельности и уровня нагрузки за рабочую смену при работе с ПЭВМ устанавливается суммарное время

регламентированных перерывов. В таблице приведено рекомендуемое время регламентированных перерывов.

Таблица 5.8 – Суммарное время регламентированных перерывов в зависимости от продолжительности работы, вида и категории трудовой деятельности с ПЭВМ

Категория работы с ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ			Суммарное время регламентированных перерывов, мин	
	группа А, кол-во знаков	группа Б, кол-во знаков	группа В, ч	При 8-часовой смене	при 12-часовой смене
I	до 20000	до 15000	до 2	50	80
II	до 40000	до 30000	до 4	70	110
III	до 60000	до 40000	до 6	90	140

Моя деятельность относится к категории В и уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ до 6 часов, то категория работы с ПЭВМ – III.

При работе с ПЭВМ у работников возникает усталость от:

- электромагнитное излучение (в ой или иной степени оно есть);
- напряженность зрения;
- шум;
- стрессы (эмоциональное воздействие);
- гиподинамия (сидячее положение) и другие.

Для снижения утомления пользователя рабочую смену организуют путем чередования работы на ПК с другой работой. Если нет возможности чередования видов трудовой деятельности, то рекомендуется через каждые 45 - 60 минут работы устраивать перерывы по 10 - 15 минут. Продолжительность непрерывной работы на компьютере без регламентированных перерывов не

должна превышать 1 часа.

В ночную смену (то есть с 22.00 до 6.00 часов) независимо от категории и вида трудовой деятельности продолжительность регламентированных перерывов должна увеличиваться на 30%.

Электробезопасность.

На рабочем месте пользователя размещены дисплей, клавиатура и системный блок. При включении дисплея на электронно-лучевой трубке создается высокое напряжение в несколько киловольт. Поэтому запрещается прикасаться к тыльной стороне дисплея, вытирать пыль с компьютера при его включенном состоянии, работать на компьютере во влажной одежде и влажными руками.

Перед началом работы следует убедиться в отсутствии свешивающихся со стола или висящих под столом проводов электропитания, в целостности вилки и провода электропитания, в отсутствии видимых повреждений аппаратуры и рабочей мебели, в отсутствии повреждений и наличии заземления приэкранного фильтра.

Даже незначительное на первый взгляд поражение электрическим током является опасным для организма человека, так как последствия при поражении электрическим током на такие орган как легкие, сердце, нервная система, проявляются не сразу, а спустя некоторое время.

Первая помощь при поражении электрическим током

1. Обеспечь свою безопасность. Надень сухие перчатки (резиновые, шерстяные, кожаные и т.п.), резиновые сапоги. По возможности отключи источник тока. При подходе к пострадавшему по земле иди мелкими, не более 10 см, шагами.

2. Сбрось с пострадавшего провод сухим токонепроводящим предметом (палка, пластик). Оттащи пострадавшего за одежду не менее чем на 10 метров от места касания проводом земли или от оборудования, находящегося под напряжением.

Вызови (самостоятельно или с помощью окружающих) «скорую помощь».

3. Определи наличие пульса на сонной артерии, реакции зрачков на свет, самостоятельного дыхания.

4. При отсутствии признаков жизни проведи сердечно-легочную реанимацию.

5. При восстановлении самостоятельного дыхания и сердцебиения придай пострадавшему устойчивое боковое положение.

6. Если пострадавший пришел в сознание, укрой и согрей его. Следи за его состоянием до прибытия медицинского персонала, может наступить повторная остановка сердца.

5.2 Экологическая безопасность.

Успешная деятельность предприятия во многом зависит сегодня от того, насколько современное оборудование на предприятии. Не вполне очевидно, но чем современнее ваше оборудование, сканеры, мониторы и прочее оборудование, тем быстрее выполняются необходимые процессы. Именно вследствие этого электроника и электронное оборудование и заменяются руководством компании при первой возможности. Обязательно необходимо знать, что устаревшую электронику нельзя отправить на свалку. Платить имущественный налог за неработающую оргтехнику крайне неправильно, по этой причине ее нужно подвергнуть списанию. Существует организация, оказывающая услуги утилизации оргтехники. Причинять вред окружающей среде мы не вправе, поэтому выбрасывать техногенный мусор неприемлемо. Оргтехника включает в свой состав такие химические элементы, которые при определенных условиях грозят за счет своих свойств причинить окружающей среде непоправимый вред. Правда, пока оргтехника пребывает в условиях, пригодных для ее хранения, вреда для природы нет. Только при взаимодействии с влагой, солнечным светом и прочими природными факторами

приводит к тому, что происходит серьезнейшее отравление почвы формальдегидами, соединениями тяжелых металлов, кадмием, мышьяком. Ведь это обязательно будет чревато тяжким ущербом для окружающей среды. Кроме этого процедура утилизации важна потому, что при производстве техники часто бывают задействованы драгоценные металлы и драгоценные камни. Драгметаллы, даже находясь в составе оборудования, не должны быть отправлены, иначе их обладателю угрожает наказание за незаконные операции с драгоценными металлами. Владелец компании, допустивший эти нарушения закона, будет наказан штрафом размер, которого довольно внушителен. Современная переработка пластика, из которого состоит множество частей оборудования, - это также одна из самых важных процедур. Проводить процедуру утилизации компании, не имеющие лицензии, не должны. Утилизация и переработка требуют обязательного соблюдения правил, поэтому вести такую деятельность могут только предприятия, которые имеют все нужные документы.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

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

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

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

возгорания и указывающий места расположения пожарной техники.



Рисунок 5.1 - План эвакуации из аудитории 120 корпуса №8 ТПУ

Пожары в вычислительных центрах представляют особую опасность, так как сопряжены с большими материальными потерями. Характерная особенность вычислительных центров — небольшие площади помещений. Как известно, пожар может возникнуть при взаимодействии горючих веществ, окислителя и источников зажигания. В помещениях ВЦ присутствуют все три основных фактора, необходимые для возникновения пожара. Для большинства помещений ВЦ установлена категория пожарной опасности В.

Безопасность в чрезвычайных ситуациях природного и социального характера

Наиболее распространенными источниками возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера являются пожары. Пожарную безопасность см. выше.

К потенциально-опасным объектам относится пивоваренный завод г. Томска, расположенного по адресу Московский тракт, 46, авария на котором с

выбросом аммиака может привести к попаданию корпуса №8 ТПУ в зону химического заражения.

Аммиак - бесцветный газ с резким запахом «нашатырного спирта». Аммиак легче воздуха. Острое отравление аммиаком приводит к поражению дыхательных путей и глаз. Признаки отравления аммиаком - насморк, кашель, удушье, слезотечение, рвотное сердцебиение.

Услышав предупреждающий сигнал оповещения «Внимание всем!» (звук сирен) необходимо:

- включить радио, телевизор и прослушать речевое сообщение о случившемся происшествии и порядке действий, довести информацию до соседей;

- надеть противогаз (при его наличии). Для защиты органов дыхания можно использовать ватно-марлевую повязку или подручные изделия из ткани, смоченные в воде, 2-5% растворе пищевой соды (для защиты от хлора), 2% растворе лимонной или уксусной кислоты (для защиты от аммиака).

- плотно закрыть двери окна, вентиляционные отверстия и дымоходы, имеющиеся в них щели заклеить бумагой или скотчем;

- внимательно следить за дальнейшими сообщениями органов уполномоченных на решение вопросов ГО и ЧС.

Оказавшись на зараженной местности:

- быстро выходить из зоны заражения в сторону, перпендикулярную направлению ветра, закрывая органы дыхания подручными средствами (шарфом, тканью), смоченными в воде;

- по возможности оказать необходимую помощь детям, престарелым людям, инвалидам;

- после выхода из зоны заражения обратиться в медицинские учреждения для определения степени поражения и проведения лечебных или профилактических мероприятий.

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения

безопасности

К сожалению, в современной жизни преобладает сидячий образ работы. В течение одного дня среднестатистический офисный сотрудник сидит по 13 часов, а в итоге 80000 часов за все время профессиональной карьеры. Большое количество офисных сотрудников сидят ненадлежащим образом, то есть без любого контакта со спинкой, с подогнутыми ногами или без возможности удобно поставить ноги на пол. На табуретке или обычном стуле без вреда для здоровья можно провести не более 15 минут в день. Из-за отсутствия удобного сиденья со временем появляются дискомфорт, неприятные ощущения из-за долгого неподвижного положения, которые, в последствие, перерастают в более серьезные заболевания, поэтому работодатель обеспечил работника эргономическим креслом. Офисное эргономическое кресло имеет элементы управления, позволяющие легко регулировать высоту и наклон сиденья, также имеет регулировку спинки по высоте и углу наклона. Важно, чтобы сотрудник мог выполнять эти регулировки, находясь в положении сидя. Конструкция стула должна соответствовать выполнению любых задач.

Особое внимание стоит обратить на цветовые решения офисов. Цвет — один из важнейших источников информации. Он напоминая символическими и эмоциональными качествами и сильно влияет на психическое и физиологическое состояние человека. Аудитория покрашена в холодные цвета, они расширяют пространство, помогает сосредоточенности и самоуглубленности.

В аудитории за сохранность и правильное пользование ПЭВМ наблюдает ответственный человек, так же на рабочих местах имеются инструкции.

Современная методика оценки условия труда (Министерство труда и социальной защиты российской федерации приказ от 24 января 2014 г. 33н «об утверждении методики проведения специальной оценки условий труда, классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы

отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению») исключил из вредных производственных факторов коэффициент пульсации наличия естественного освещения и электромагнитное излучение от персональных ПЭВМ. Прохождение медицинского осмотра для сотрудников на рабочих местах которых отсутствуют вредные факторы или влияние вредных факторов не превышает нормы не обязательно, однако все сотрудники Томского политехнического университета, чья трудовая деятельность связана с работой на ПЭВМ обязаны проходить медицинский осмотр согласно приказа Минздравсоцразвития РФ от 12 апреля 2011 г. N 302н.

При работе с ПЭВМ у работников возникает усталость от:

- электромагнитное излучение (в ой или иной степени оно есть);
- напряженность зрения;
- шум;
- стрессы (эмоциональное воздействие);
- гиподинамия (сидячее положение) и другие.

Для снижения утомления пользователя рабочую смену организуют путем чередования работы на ПК с другой работой. Если нет возможности чередования видов трудовой деятельности, то рекомендуется через каждые 45 - 60 минут работы устраивать перерывы по 10 - 15 минут. Продолжительность непрерывной работы на компьютере без регламентированных перерывов не должна превышать 1 часа.

В ночную смену (то есть с 22.00 до 6.00 часов) независимо от категории и вида трудовой деятельности продолжительность регламентированных перерывов должна увеличиваться на 30%.

Заключение

Разработана сопряжённая математическая модель распространения верховых лесных пожаров с учетом противопожарных разрывов и заслонов.

Выполнено математическое моделирование процессов распространения верховых лесных пожаров с помощью компьютерной программы. В результате численных расчетов получены распределения полей температуры и концентрации компонентов газовой фазы. Применение данной математической модели позволяет оценить скорость распространения верховых лесных пожаров в зависимости от характеристик лесного массива и метеорологических условий.

С помощью представленной модели определены оптимальные размеры противопожарных разрывов и заслонов. Данные результаты могут быть использованы для профилактических мероприятий по предотвращению распространения верховых лесных пожаров.

Список публикаций

1. Зубарева А.Е., Перминов В.А. Анализ статистических данных по лесным пожарам в Томской области// Вестник науки Сибири - 2014 - №1 (11) .

2. Зубарева А.Е., Перминов В.А. Анализ основных причин лесных пожаров в Томской области с 2009 по 2014 год// Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции -2015.

3. Зубарева А.Е., Перминов В.А. Математическое моделирование распространение лесного пожара с учетом создания противопожарных разрывов// Сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность» - 2014.

4. Зубарева А.Е., Влияние скорости ветра на размер противопожарных разрывов//Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность» - 2015.

Список используемых источников

1. Ходаков В.Е., Жарикова М.В. Лесные пожары: методы исследования/ 2007.
2. Попов П.П. Лес и наука о лесе// Лесоведение. - Тюмень: Изд. ТГУ, 1998. – Вып. 6
3. Биофайл Научно-информационный// Название сайта: URL: <http://biofile.ru/bio/8805.html>
4. Сороколетова Е. Самый большой лес на земле/ Информационный архив Русского географического общества// Название сайта: URL: <http://old.rgo.ru/otkroj-rossiyu/kniga-rekordov/samyj-bolshoj-les-na-zemle/>
5. Зубарева А.Е., Перминов В.А. Анализ статистических данных по лесным пожарам в Томской области// Вестник науки Сибири - 2012 - №1 (11) .
6. Математические методы// Название сайта: URL: <http://mathmod.narod.ru/metods.htm>
7. Патанкар С.В. Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
8. Патанкар С.В. Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 124 с.
9. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. - Новосибирск: Наука, 1997-. 408 с.
10. Perminov V. Mathematical modeling of forest fires taking account of the firebreaks // Advances in Forestry Letters. - 2013. -V.2, N 1.
11. Компьютерные нормы | HR-Portal// Название сайта: URL: <http://www.hr-portal.ru/article/kompyuternye-normy>
12. Работа за компьютером// Название сайта: URL: <http://userdocs.ru/informatika/36364/index.html>
13. Действия населения при химической аварии// Название сайта: URL: <http://kk.convdocs.org/docs/index-58812.html>
14. Учебно – методический комплекс “Охрана труда”

15. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
16. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
17. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
18. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.
19. Сущность методики FAST в области ФСА [Электронный ресурс] <http://humeur.ru/page/sushhnost-metodiki-fast-v-oblasti-fsa>.

Приложение А

Раздел 1.4.

The method of solving the problem

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ЕМ41	Зубарева Анастасия Евгеньевна		

Консультант кафедры ЭБЖ:

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

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ:

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

The method of solving the problem

The individual differential equations in our mathematical model express a certain conservation principle. Each equation employs a certain physical quantity as its dependent variable and implies that there must be a balance among the various factors that influence the variable. The dependent variables of these differential equations are usually specific properties, i.e., quantities expressed on a unit-mass basis. Examples are mass fraction, velocity (i.e., momentum per unit mass), and energy. All the dependent variables of interest here seem to obey a generalized conservation principle. If the dependent variable is denoted by ϕ , the general differential equation is

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \text{div} (\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div} (\Gamma \text{grad } \phi) + S, \quad (1)$$

where Γ is the diffusion coefficient, and S is the source term. The quantities Γ and S are specific to a particular meaning of ϕ . (Indeed, we should have used the symbols Γ_ϕ and S_ϕ this would, however, lead to too many subscripts in subsequent work.). The four terms in the general differential equation are the unsteady term, the convection term, the diffusion term, and the source term. The dependent variable ϕ can stand for a variety of different quantities, such as the mass fraction of a chemical species, the enthalpy or the temperature, a velocity component, the turbulence kinetic energy, or a turbulence length scale. Accordingly, for each of these variables, an appropriate meaning will have to be given to the diffusion coefficient Γ and the source term S .

The density appearing in Eq. (1) may be related, via an equation of state, to variables such as mass fraction and temperature. These variables and the velocity components obey the general differential equation. Further, the flow field should satisfy an additional constraint, namely, the mass conservation or the continuity equation, which is

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} (\rho \mathbf{u}) = 0 . \quad (2)$$

We have written Eqs. (1) and (2) in vector form. Another useful representation is the Cartesian-tensor form of these equations:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 , \quad (4)$$

where the subscript j can take the values 1, 2, 3, denoting the three space coordinates. When a subscript is repeated in a term, a summation of three terms is implied; for example,

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_1} (\rho u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\rho u_2) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho u_3) , \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right) . \quad (6)$$

The procedure for casting any particular differential equation into the general form (1) is to manipulate it until, for the chosen dependent variable, the unsteady term and the convection and diffusion terms conform to the standard form. The coefficient of $\text{grad } \phi$ in the diffusion term is then taken as the expression for Γ , and the remaining terms on the right-hand side are collectively defined as the source term S . All the relevant differential equations for heat and mass transfer, fluid flow and related phenomena can be thought of as particular cases of the general ϕ equation is an important time-saving step. As a consequence, we need to concern ourselves with the numerical solution of only Eq. (1). Even in the construction of a computer program, it is sufficient to write a general sequence of instructions for solving Eq. (1), which can be repeatedly used for different meanings of ϕ along with appropriate expressions for Γ and S , and, of course, with appropriate initial and

boundary conditions. Thus, the concept of the general ϕ equation enables us to formulate a general numerical method and to prepare general-purpose computer programs.

A discretization equation is an algebraic relation connecting the values of ϕ for a group of grid points. Such an equation is derived from the differential equation governing ϕ and thus expresses the same physical information as the differential equation. That only a few grid points participate in a given discretization equation is a consequence of the piecewise nature of the profiles chosen. The value of ϕ at a grid point thereby influences the distribution of ϕ only in its immediate neighborhood. As the number of grid points becomes very large, the solution of the discretization equations is expected to approach the exact solution of the corresponding differential equation. This follows from the consideration that, as the grid points get closer together, the change in ϕ between neighboring grid points becomes small, and then the actual details of the profile assumption become unimportant. For a given differential equation, the possible discretization equations are by no means unique, although all types of discretization equations are, in the limit of a very large number of grid points, expected to give the same solution. The different types arise from the differences in the profile assumptions and in the methods of derivation.

The main idea of the control-volume formulation is easy to understand and lends itself to direct physical interpretation. The calculation domain is divided into a number of non-overlapping control volumes such that there is one control volume surrounding each grid point. The differential equation is integrated over each control volume. Piecewise profiles expressing the variation of ϕ between the grid points are used to evaluate the required integrals. The result is the discretization equation containing the values of ϕ for a group of grid points

The discretization equation obtained in this manner expresses the conservation principle for ϕ for the finite control volume, just as the differential equation expresses it for an infinitesimal control volume.

The most attractive feature of the control-volume formulation is that the resulting solution would imply that the integral conservation of quantities such as mass, momentum, and energy is exactly satisfied over any group of control volumes and, of course, over the whole calculation domain. This characteristic exists for any number of grid points—not just in a limiting sense when the number of grid points becomes large. Thus, even the coarse-grid solution exhibits exact integral balances.

When the discretization equations are solved to obtain the grid-point values of the dependent variable, the result can be viewed in two different ways. In the finite-element method and in most weighted-residual methods, the assumed variation of ϕ consisting of the grid-point values and the interpolation functions (or profiles) between the grid points is taken as the approximate solution. In the finite-difference method, however, only the grid-point values of ϕ are considered to constitute the solution, without any explicit reference as to how ϕ varies between the grid points. This is akin to a laboratory experiment where the distribution of a quantity is obtained in terms of the measured values at some discrete locations without any statement about the variation between these locations. In our control-volume approach, we shall also adopt this view. We shall seek the solution in the form of the grid-point values only. The interpolation formulas or the profiles will be regarded as auxiliary relations needed to evaluate the required integrals in the formulation. Once the discretization equations are derived, the profile assumptions can be forgotten. This viewpoint permits complete freedom of choice in employing, if we wish, different profile assumptions for integrating different terms in the differential equation. To make the foregoing discussion more concrete, we shall now derive the control-volume discretization equation for a simple situation.

Discretization equation for two dimensions

Now we have all the ingredients needed for writing the discretization equation corresponding to the general differential equation. At first, we shall derive only the two-dimensional form, but the same procedure would apply to three dimensions. Let us consider the control volume shown in Fig. 1. If we employ our one-dimensional practice of obtaining the total flux J_e , and assume that it prevails over the control-volume face of area $\Delta y \times 1$, we shall be in a position to write the complete discretization equation at once.

One subtle detail of the derivation will now be given some attention. Even in the one-dimensional situation we have seen that a_p turned out to be $a_E + a_w$ only when the continuity equation was satisfied. Thus, our basic rule about the sum of the neighbor coefficients can be satisfied only when we involve the continuity equation in the derivation. This practice is illustrated in the following.

The two-dimensional form of can be written as

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = S, \quad (7)$$

where J_x and J_y are the total (convection plus diffusion) fluxes defined by

$$J_x \equiv \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (8)$$

$$J_y \equiv \rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad (9)$$

where u and v denote the velocity components in the x and y directions. The integration of over the control volume shown in Fig. 1 would give

$$\frac{(\rho_P \phi_P - \rho_P^0 \phi_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + J_e - J_w + J_n - J_s = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y, \quad (10)$$

where the source term has been linearized in the usual manner and, for the unsteady term, P_p and ϕ_p are assumed to prevail over the whole control volume. The "old" values (i.e., the values at the beginning of the time step)

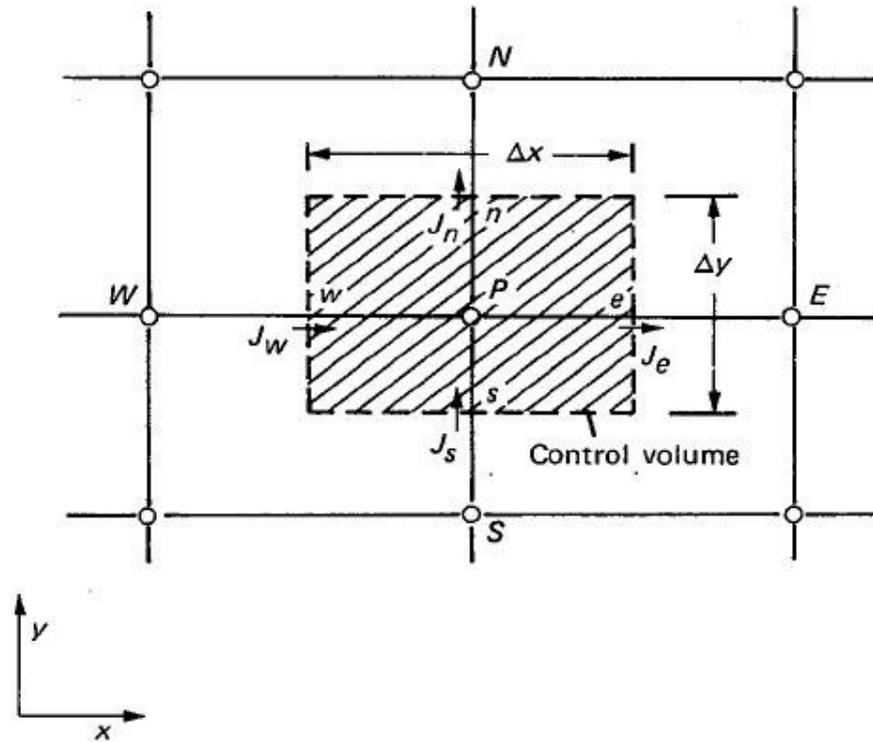


Figure 1 Control volume for the two-dimensional situation.

are denoted by p_p^0 and ϕ_p^0 . In conformity with the fully implicit practice, all other values (i.e., those without a superscript) are to be regarded as the "new" values. The quantities J_e , J_n , and J_s are the integrated total fluxes over the control-volume faces; that is, J_e stands for $\int J_x dy$ over the interface e , and so on. In a similar manner, we can integrate the continuity equation over the control volume and obtain

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + F_e - F_w + F_n - F_s = 0, \quad (11)$$

where F_e , F_n , and F_s are the mass flow rates through the faces of the control volume. If ρu at point e is taken to prevail over the whole interface e , we can write

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y. \quad (12)$$

Similarly,

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y , \quad (13)$$

$$F_n = (\rho v)_n \Delta x , \quad (14)$$

$$F_s = (\rho v)_s \Delta x . \quad (15)$$

If we now multiply Eq. (11) by ϕ_p and subtract it from Eq. (10), we obtain

$$\begin{aligned} (\phi_P - \phi_P^0) \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} + (J_e - F_e \phi_P) - (J_w - F_w \phi_P) + (J_n - F_n \phi_P) \\ - (J_s - F_s \phi_P) = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y . \end{aligned} \quad (16)$$

The assumption of uniformity over a control-volume face enables us to employ our one-dimensional practices for the two-dimensional situation. A method of expression of such terms as $J_e - F_e \phi_P$ and $J_w - F_w \phi_P$, use it as follows:

$$J_e - F_e \phi_P = a_E (\phi_P - \phi_E) , \quad (17)$$

where

$$a_E = D_e A(|P_e|) + \llbracket -F_e, 0 \rrbracket , \quad (18)$$

Here D_e and D_w , like their counterparts F_e and F_w , contain the area Δy of the faces e and w . With similar expressions for $J_n - F_n \phi_P$ and $J_s - F_s \phi_P$ we are in a position to write the final form of the discretization equation. Because of the nature of the expressions in Eqs. (17), the rule about the sum of the neighbor coefficients is readily satisfied.

When the given velocity and density fields *do* satisfy the continuity discretization equation, the foregoing derivation and a derivation based on Eq. (10)

alone will yield identical discretization equations. However, when the given flow field does not satisfy the continuity equation, the two formulations give different equations and lead to different solutions. We prefer the formulation that satisfies our basic rule. How could we encounter flow fields that do not satisfy continuity? The possibility arises because often the flow field is not really given but is iteratively calculated, just as the temperature-dependent conductivity is updated in a conduction problem. Before the final convergence is attained, the imperfect flow field at intermediate stages of iteration may not satisfy the continuity equation. The two-dimensional discretization equation can now be written as

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b , \quad (19)$$

where

$$a_E = D_e A(|P_e|) + \llbracket -F_e, 0 \rrbracket , \quad (19a)$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + \llbracket -F_n, 0 \rrbracket , \quad (19b)$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + \llbracket F_s, 0 \rrbracket , \quad (19c)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} , \quad (19d)$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y + a_P^0 \phi_P^0 , \quad (19e)$$

$$a_P = a_E + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y . \quad (19f)$$

Here ϕ_p^0 and p_p^0 refer to the known values at time t , while all other values (ϕ_p , ϕ_E , ϕ_w , ϕ_s and so on) are the unknown values at time $t + \Delta t$. The flow rates F_e , F_w , F_n and F_s have been defined in Eqs. (12). The corresponding conductance's are defined by

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e} , \quad (20a)$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta y)_n}, \quad (20b)$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta y)_s}, \quad (20c)$$

and the Peclet numbers by

$$P_e = \frac{F_e}{D_e} \quad P_n = \frac{F_n}{D_n} \quad P_s = \frac{F_s}{D_s}. \quad (21)$$

The function $A(|P|)$ can be selected from Table for the desired scheme. The power-law scheme is recommended, for which

$$A(|P|) = \llbracket 0, (1 - 0.1|P|)^5 \rrbracket. \quad (22)$$

It can be appreciated that even at this stage the physical significance of the various coefficients in Eq. (19) is easy to understand. The neighbor coefficients a_E , a_w , a_N , and a_s represent the convection and diffusion influence at the four faces of the control volume, in terms of the flow rate F and the conductance D . The term $a_p^0 \phi_p^0$ is the known ϕ content of the control volume (at time t) divided by the time step. The remaining terms can be similarly interpreted.

We formulated the procedure for solving the general differential equation for ϕ in the presence of a given flow field. However, except in some very special circumstances, it is not possible to specify the flow field; rather, we must calculate the local velocity components and the density field from the appropriate governing equations. The velocity components are governed by the momentum equations, which are particular cases of the general differential equation for ϕ (with $\phi = u$, $\Gamma = \mu$ and so on). Thus, we are tempted to conclude that we already have developed the method for solving the momentum equations, thereby getting the velocity field.

If the nonlinearity of the momentum equations appears to be a difficulty, we only have to remind ourselves that, while treating heat conduction, we saw how to handle nonlinearity by iteration. In particular, the convection coefficient ρu being a function of the dependent variable u of the momentum equation is no different from the conductivity k being a function of the temperature T . Starting with a guessed velocity field, we could iteratively solve the momentum equations to arrive at the converged solution for the velocity components. The pressure gradient forms a part of the source term for a momentum equation. The pressure field is indirectly specified via the continuity equation. When the correct pressure field is substituted into the momentum equations, the resulting velocity field satisfies the continuity equation. This indirect specification, however, is not very useful for our purposes unless we attempt a direct solution of the whole set of the discretization equations resulting from the momentum and continuity equations. Since we have preferred iterative methods of solving the discretization equations even for a single dependent variable, the direct solution for the entire set of velocity components and pressure seems out of the question. The difficulties described so far can be resolved by recognizing that we do not have to calculate all the variables for the same grid points. In the case of the velocity components, there is a significant benefit to be obtained by arranging them on grids that are different from the grid used for all other variables. Such a displaced or "staggered" grid for the velocity components was first used by Harlow and Welch (1965). In the staggered grid, the velocity components are calculated for the points that lie on the faces of the control volumes. Thus, the x-direction

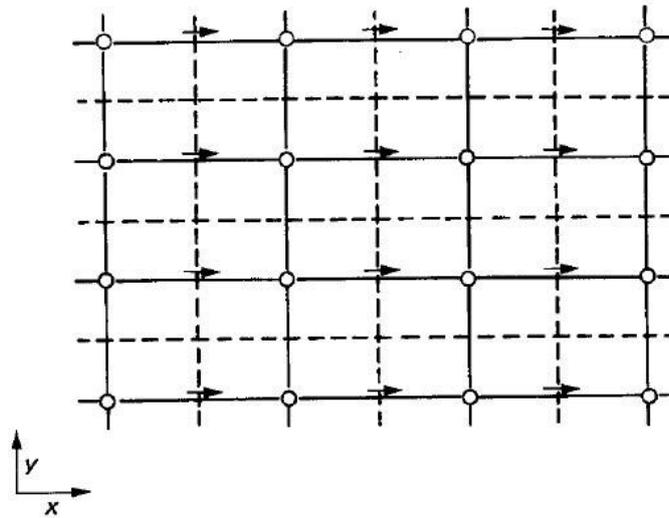


Figure 2 Staggered locations for u .

velocity u is calculated at the faces that are normal to the x direction. The locations for u are shown in Fig. 2 by short arrows, while the grid points (hereafter called the main grid points) are shown by small circles; the dashed lines indicate the control-volume faces. It will be noticed that, with respect to the main grid points, the u locations are staggered only in the x direction. In other words, the location for u lies on the x -direction link joining two adjacent main grid points. Whether the u location is exactly midway between the grid points depends upon how the control volumes are defined. The u location must lie on the control-volume face, irrespective of whether the latter happens to be midway between the grid points. It is easy to see how the locations for the velocity components v and w are to be defined. In Fig. 3, a two-dimensional grid pattern is shown

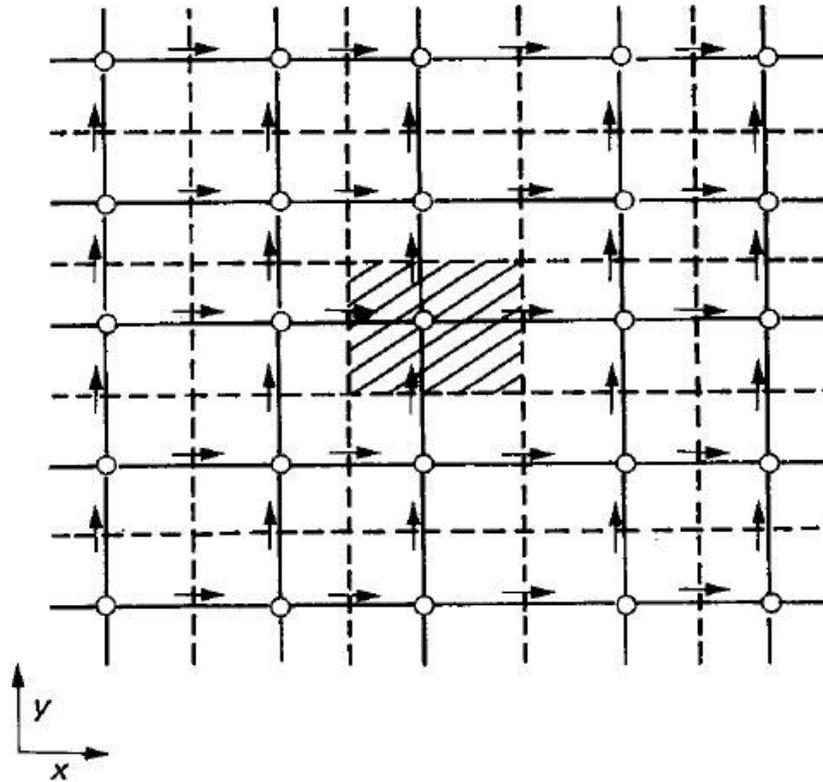


Figure 3 Staggered locations for u and v . \rightarrow u ; \uparrow v ; \circ = other variables.

the locations for u and v placed on the respective control-volume faces.

An immediate consequence of the staggered grid is that the mass flow rates across the control-volume faces can be calculated without any interpolation for the relevant velocity component. However, this feature, although it offers some convenience in setting up the general discretization equation for ϕ is not an important advantage of the staggered grid. The important advantages are twofold. For a typical control volume (shown shaded in Fig. 3) it is easy to see that the discretized continuity equation would contain the differences of adjacent velocity components, and that this would prevent a wavy velocity field, from satisfying the continuity equation. In the staggered grid, only "reasonable" velocity fields would have the possibility of being acceptable to the continuity equation. The second important advantage of the staggered grid is that the pressure difference between two adjacent grid points now becomes the natural driving force for the velocity component located between these grid points. Consequently, pressure fields such as

those, would no longer be felt as uniform pressure fields and could not arise as possible solutions.

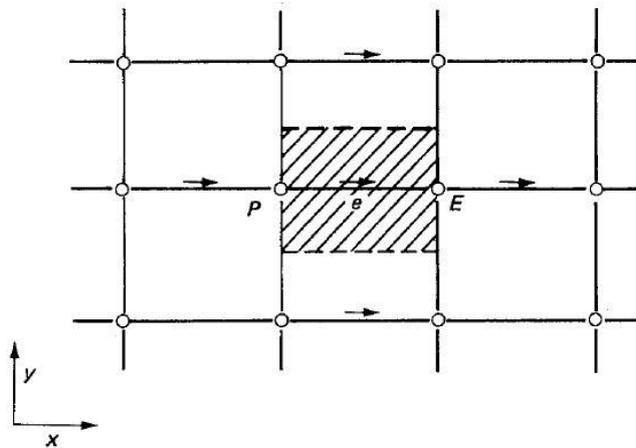


Figure 4 Control volume for u .

Unusual about this control volume. Its faces lie between the point e and the corresponding locations for the neighbor u 's. The control volume is, however, staggered in relation to the normal control volume around the main grid point P . The staggering is in the x direction only, such that the faces normal to that direction pass through the main grid points P and E . This layout realizes one of the main advantages of the staggered grid: The difference $p_P - p_E$ can be used to calculate the pressure force acting on the control volume for the velocity u .

The calculation of the diffusion coefficient and the mass flow rate at the faces of the u control volume shown in Fig. 4 would require an appropriate interpolation. The resulting discretization equation can be written as

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (p_P - p_E) A_e . \quad (23)$$

where $(p_P - p_N) A_n$ is the appropriate pressure force. The momentum equations can be solved only when the pressure field is given or is somehow estimated. Unless the correct pressure field is employed, the resulting velocity field will not satisfy the continuity equation. Such an imperfect velocity field based on a

guessed pressure field p^* will be denoted by u^* , v^* . This "staggered" velocity field will result from the solution of the following discretization equations:

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e , \quad (24)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n , \quad (25)$$

In these equations, the velocity components and pressure have been given the superscript. Then we discuss the way of improving the guessed pressure p^* such that the resulting staggered velocity field will progressively get closer to satisfying the continuity equation. Let us propose that the correct pressure p is obtained from

$$p = p^* + p'' . \quad (26)$$

where p' will be called the pressure correction. Next, we need to know how the velocity components respond to this change in pressure. The corresponding velocity corrections u' , v' can be introduced in a similar manner:

$$u = u^* + u' ; v = v^* + v' \quad (27)$$

Then we subtract Eq. (24) from Eq. (23), we have

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + (p_P' - p_E') A_e . \quad (28)$$

The result is

$$a_e u_e' = (p_P' - p_E') A_e . \quad (29)$$

Or

$$u_e' = d_e (p_P' - p_E') , \quad (30)$$

where

$$d_e \equiv \frac{A_e}{a_e}. \quad (31)$$

Equation (6.15) will be called the velocity-correction formula, which can also be written as

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P + p'_E). \quad (32)$$

This shows how the starred velocity u is to be corrected in response to the pressure corrections to produce U_e .

The correction formulas for the velocity components in other directions can be written similarly:

$$v_n = v_n^* + d_n (p'_P - p'_N), \quad (33)$$

Thus, we now have all the preparation needed for obtaining a discretization equation for p' . It is to this task that we now turn.

We shall now turn the continuity equation into an equation for the pressure correction. The continuity equation is

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0. \quad (34)$$

We shall integrate this over the shaded control volume shown in Fig. 5.

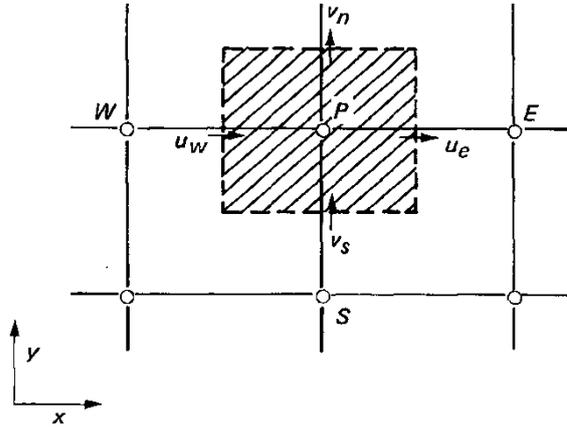


Figure 5 Control volume for the continuity equation. With these decisions, the integrated form of Eq. (4) becomes

$$\begin{aligned} \frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_s] \Delta y \\ + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta x = 0. \end{aligned} \quad (35)$$

If we now substitute for all the velocity components the expressions given by the velocity-correction formulas [such as Eqs. (32)-(34)], we obtain, after rearrangement, the following discretization equation for p' :

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S, \quad (36)$$

Where

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y, \quad (37a)$$

$$a_N = \rho_n d_n \Delta x, \quad (37b)$$

$$a_S = \rho_s d_s \Delta x, \quad (37c)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S, \quad (37d)$$

$$\begin{aligned} b = \frac{(\rho_P^0 - \rho_P) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y \\ + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x. \end{aligned} \quad (37e)$$

The procedure that we are developing for the calculation of the flow field has been given the name SIMPLE, which stands for Semi-Implicit Method for Pressure-

Linked Equations. We shall discuss the significance of the name a little later. The procedure has been described in Patankar and Spalding (1972). The Sequence of Operations. The important operations, in the order of their execution, are:

1. Guess the pressure field p^* .
2. Solve the momentum equations, such as Eqs. (4) - (5), to obtain u^* , v^* .
3. Solve the p' equation.
4. Calculate p from Eq. (26) by adding p' to p^* .
5. Calculate u , v from their starred values using the velocity-correction formulas (29)-(30).
6. Solve the discretization equation for other ϕ (such as temperature, concentration, and turbulence quantities) if they influence the flow field through fluid properties, source terms, etc. (If a particular ϕ does not influence the flow field, it is better to calculate it after a converged solution for the flow field has been obtained.)
7. Treat the corrected pressure p as a new guessed pressure p^* , return to step 2, and repeat the whole procedure until a converged solution is obtained.

In other words, instead of using Eq. (26), we employ

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (38)$$

with α_p set equal to about 0.8. Thus, the computations proceed to convergence via a series of continuity-satisfying velocity fields. This feature of SIMPLE has many advantages.