



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт электронного обучения

Направление подготовки техносферная безопасность

Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Математическое моделирование возникновения лесных пожаров в результате аварийного разрыва трубопровода

УДК 621.643 658.345

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-1E11	Ушакова Ярослава Станиславовна		

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
Старший преподаватель	Хаперская Алена Васильевна			

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
Профессор	Романенко Сергей Владимирович	Доктор химических наук		



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт электронного обучения

Направление подготовки (специальность): техносферная безопасность

Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой С.В. Романенко

(Подпись)

(Дата)

(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
3-IE11	Ушаковой Ярославле Станиславовне

Тема работы:

Математическое моделирование возникновения лесных пожаров в результате аварийного разрыва трубопровода	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	2869/с от 14.04.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе:

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т.д.); вид сырья или материала изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделий в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ т.д.)

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов

(аналитический обзор по литературным источникам с целью достижений мировой науки техники в рассмотрении области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)

Перечень графического материала

(с точным указанием обязательных чертежей)

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	ст. преподаватель Хаперская Алена Васильевна
Раздел «Социальная ответственность»	к.т.н. ст. преподаватель Романцов Игорь Иванович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

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
3-1E11	Ушакова Ярослава Станиславовна		



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт электронного обучения

Направление подготовки (специальность): техносферная безопасность

Уровень образования: Бакалавр

Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

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

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН

Выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполняемой работы:

Дата контроля	Название раздела модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.03.2016	Введение	
01.04.2016	1. Обзор литературы	
13.04.2016	2. Объект и методы исследования	
	2.1. Математическое моделирование аварийных ситуаций	
19.04.2016	3. Математическое моделирование возникновения пожаров под действием излучения	
	3.1. Физическая постановка задачи	
25.04.2016	3.2. Математическая постановка задачи	
29.04.2016	3.3. Численный метод решения	
05.05.2016	3.4. Результаты решения задачи	
11.05.2016	3.5. Верификация модели	
	4. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	
	5. Раздел «Социальная ответственность»	
12.05.2016	Заключение	

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
Профессор	Романенко Сергей Владимирович	Доктор химических наук		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа 3-1E11	ФИО Ушакова Ярослава Станиславовна
-------------------------	--

Институт Уровень образования	ИнЭО Бакалавр	Кафедра Направление/специальность	ЭБЖ Техносферная безопасность
--	-------------------------	---	--

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Оценка конкурентоспособности технических решений
 Матрица SWOT
 Альтернативы проведения НИ
 График проведения и бюджет НИ
 Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность Старший преподаватель	ФИО Хаперская Алена Васильевна	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	---------	------

Задание принял к исполнению студент:

Группа 3-1E11	ФИО Ушакова Ярослава Станиславовна	Подпись	Дата
------------------	---------------------------------------	---------	------

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-IE11	Ушакова Ярослава Станиславовна

Институт	ИнЭО	Кафедра	ЭБЖ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Техносферная безопасность

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Рабочее место расположено на открытом воздухе. Трасса трубопровода проходит в лесной зоне. При разрыве магистрального трубопровода могут иметь место вредные и опасные проявления факторов производственной среды для человека. Оказывается негативное воздействие на природу (атмосферу, гидросферу, литосферу). Возможно возникновение чрезвычайных ситуаций техногенного, стихийного, экологического и социального характера
Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования». СНиП III-42-80* «Магистральные трубопроводы. Правила производства и приёмки работ». ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные факторы». ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность». ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны». ПБ 03-576-2003. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – 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). 1.2. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).	Опасные факторы: • Осколки, части разрушившихся установок и конструкций; • Пламя и искры; Вредные факторы: • Токсичные вещества и материалы, вышедшие из разрушенных трубопроводов; • Повышенная температура окружающей среды; • Токсичные продукты горения и термического разложения; • Пониженная концентрация кислорода; • Огнетушащие вещества;
2. Экологическая безопасность: – 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.	Аварии на трубопроводах сопровождаются: • загрязнением и сгоранием атмосферного воздуха; • загрязнением поверхностных водных источников и подземных вод; • повреждением почвенно – растительного покрова. • уничтожением лесных массивов
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: – 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.	Чрезвычайные ситуации на магистральном трубопроводе могут возникнуть: • 60% случаев – гидроудары, перепады давления и вибрации; • 25% - коррозионные процессы;

	15% - природные явления и форс-мажорные обстоятельства.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– РД 09-364-00 «Типовая инструкция по организации безопасного проведения огневых работ на взрывопожароопасных объектах»; – РД 153-39.4-113-01 «Нормы технологического проектирования магистральных трубопроводов».

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-1E11	Ушакова Ярослава Станиславовна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 80 с., 14 рис., 25 табл., 12 источников.

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

Объектом исследования является: низовой лесной пожар при аварийных ситуациях на трубопроводах.

Цель работы: определение максимальных размеров зон зажигания растительного покрова (лесных низовых пожаров) в результате аварийных выбросов горючих веществ.

В процессе исследования проводились: определение размеров зон зажигания растительного покрова при аварийных ситуациях на трубопроводах при помощи программы «Fire» для различных влагосодержаний и масс разлившегося горючего вещества; построение графиков размеров зон зажигания при помощи программы «MatLab»; .

В результате исследования получены температуры и концентрации компонентов газовой фазы в рассматриваемой области. На основе полученных данных определены максимальные размеры зон зажигания растительного покрова в зависимости от влагосодержания и массы разлившегося горючего вещества.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: данная программа позволяет, на основе данных о влагосодержании почвы и массы разлившегося горючего вещества, определить размеры зон зажигания растительного покрова и, следовательно, возможность в более кратчайшие сроки ликвидировать аварию на трубопроводах.

Степень внедрения: нефтяные и газовые предприятия.

Область применения: определение размеров зон зажигания растительного покрова при авариях на трубопроводах

Экономическая эффективность/значимость работы: данная работа позволит в более короткие сроки предотвратить аварии на объектах магистральных трубопроводов, и, следовательно, уменьшит риск возникновения экологического загрязнения.

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

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования».

СНиП III-42-80* «Магистральные трубопроводы. Правила производства и приёмки работ».

ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные факторы».

ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность».

ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».

ПБ 03-576-2003. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Магистральные трубопроводы (МТ): капитальные инженерные сооружения, рассчитанные на длительный срок эксплуатации и предназначенные для бесперебойной транспортировки на значительные расстояния природных и искусственных газов, нефти, нефтепродуктов, воды, твердых и сыпучих тел, взвешенных в потоке воздуха или воды, от мест их добычи, переработки, забора (начальная точка трубопровода) к местам потребления (конечная точка).

Тепловое излучение: электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет энергии теплового движения атомов и молекул.

Оглавление

Введение	13
1. Обзор литературы	14
2. Объект и методы исследования	19
2.1. Математическое моделирование аварийных ситуаций	19
3. Математическое моделирование возникновения пожаров под действием излучения	23
3.1. Физическая постановка задачи	23
3.2. Математическая постановка задачи	26
3.3. Численный метод решения	28
3.4. Результаты решения задачи	36
3.5. Верификация модели	43
4. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	45
5. Раздел «Социальная ответственность»	68
Заключение	78
Список использованных источников	79

Введение

Использование магистральных трубопроводов является одной из наиболее актуальных проблем в наше время, а также аварийные ситуации на данных объектах. Аварии, возникающие на объектах магистральных трубопроводов, могут понести за собой серьезные последствия, чаще всего, большое количество человеческих жертв и потерей материальных ценностей. Чтобы не возникало ещё более катастрофических последствий необходимо заранее знать масштабы возможной аварии, чтобы как можно быстрее её предотвратить.

Благодаря проектированию в программе «Fire» стало возможным по определенным известным данным (количество разлившейся горючей жидкости, влагосодержание и др.) определить масштабы аварии и, следовательно, в более короткие сроки локализовать их.

Целью моего исследования является определение времени и максимальных размеров зон зажигания растительного покрова (низовых лесных пожаров) в результате аварийных выбросов горючих веществ.

В задачи исследования входит:

- Построение математической модели аварийных ситуаций связанных с разрывом трубопроводов и возникновением пожаров под действием излучения с образованием огненных шаров.
- Разработка методики численных расчетов.
- Получение результатов расчетов и их анализ.

Также, благодаря данной работе возможно более подробного изучить образование огненных шаров при тепловом излучении и рассмотреть начальные этапы воздействия источника тепловой энергии на поверхность Земли, покрытую растительностью.

Обзор литературы

Магистральные трубопроводы – трубопроводы, которые предназначены для транспортировки на большие расстояния природных и искусственных газов, нефти, нефтепродуктов, воды от мест их добычи, переработки, забора к местам потребления и рассчитанные на длительный срок эксплуатации [1].

Магистральные трубопроводы транспортируют:

- нефть и нефтепродукты из районов их добычи, производства до мест потребления;
- сжиженный углеводородный газ фракций С3 и С4 и их смеси из районов их производства до места использования;
- воду в системах отопления и прочих системах водоснабжения.

Для магистральных трубопроводов создаются санитарные разрывы (санитарные полосы отчуждения), которые определяются минимальными расстояниями от магистральных трубопроводов до смежных зданий, строений и сооружений[2].

Минимальные расстояния от магистральных нефтепроводов до городов, поселков и отдельных малоэтажных жилищ устанавливаются:

- от 50 до 75 метров - при диаметре до 300 мм;
- от 50 до 100 метров - при диаметре 300 мм - 600 мм;
- от 75 до 150 метров - при диаметре 600 мм - 1000 мм;
- от 100 до 200 метров - при диаметре 1000 мм - 1400 мм.

В газовой промышленности на долю магистральных трубопроводов приходится большое количество крупных аварий. Трассы трубопроводов часто проходят по густонаселенным районам с развитой инфраструктурой. Линейная часть трубопроводов является потенциально опасным объектом (ФЗ №116) [3], способным оказывать значительное негативное воздействие на окружающую среду. Поэтому приобретает важность научная задача по зонированию территории в полосе прохождения трассы и прогнозированию

параметров опасных зон для населения и территорий. Крупная техногенная катастрофа на объектах магистральных трубопроводах, как правило, сопровождается возникновением огненных шаров, которые зажигают близлежащий растительный покров.

Под огненным шаром понимается специфическая структура паровоздушной смеси, которая образуется при залповом выбросе значительного количества (от одной до нескольких сотен тонн) сжатого или сжиженного газа в открытое пространство при неблагоприятных атмосферных условиях (отсутствие ветра) с последующим зажиганием ОШ от постороннего источника. Как правило, огненный шар начинает свою жизнь как небольшой огненный шар. В течение следующих нескольких секунд, огненный шар увеличивается в размерах, вскоре достигает своего максимального диаметра. Огненный шар приобретает плавучесть и поднимается с земли, как жар огня он испаряет капли жидкости и повышает среднюю температуру оставшейся смеси из пара, воздуха и продуктов реакции. Как только он поднимается, ограниченный запас топлива потребляется, и огненный шар перестает существовать [4].

Форма огненного шара. Огненный шар в основном рассматривают в виде сферы. Видео и другие наблюдения случайных и экспериментальных огненных шаров показывают, что большинство огненных шаров могут быть разумно описаны как сфера на большей части их продолжительности.

Диаметр огненного шара. Статические модели обычно предполагают, что огненный шар достигает своего максимального диаметра мгновенно и утверждают, что этот размер существует в течение всего срока существования огненного шара. Почти все статические модели огненного шара рассчитывают диаметр с помощью уравнения следующего вида, которое учитывает максимальный диаметр огненного шара с массой топлива, вовлеченное в огненный шар.

$$D = k * M^n ,$$

Где: D – максимальный диаметр огненного шара;

M – участвующая масса топлива;

k и n – константы.

В опубликованных моделях, константы колеблются от 2.97 до 6.48.

Время жизни огненного шара обычно имеет следующую форму, которая относится к длительности или продолжительности существования огненного шара с массой топлива, вовлеченной в огненный шар.

$$t_d = k * M^n$$

Где: t_d – продолжительность огненного шара;

k и n – константы.

В опубликованных моделях, значения констант k и n колеблются в диапазоне от 0,23 до 2.61, и от 0.0966 к 0.333, соответственно.

Охрана труда и здоровья Соединенного Королевства разработала следующие два уравнения продолжительности огненного шара. Эти уравнения широко используются. Изменение экспоненты от $1/3$ до $1/6$, отражает изменение в поведении огненного шара как увеличение массы топлива.

$$t_d = 0.45 * M^{1/3}, \text{ если } M < 37.000 \text{ кг}$$

$$t_d = 2.60 * M^{1/6}, \text{ если } M \geq 37.000 \text{ кг}$$

Масса вовлеченного топлива. Масса топлива, вовлеченная в огненный шар, является неотъемлемой частью уравнения для диаметра и продолжительности огненного шара. Эта масса может быть такой же, как и масса огненного шара, заключенная внутри сосуда до его разрыва, но она также может быть меньше этой суммы - особенно, если сумма перегрева небольшая [4].

Эволюция огненного шара может происходить по двум сценариям. По первому сценарию зажигание топлива частично перемешанного с воздухом происходит на начальной стадии аварийного выброса, при этом богатая смесь будет гореть в диффузионном режиме. По второму – зажигание происходит с задержкой, при этом значительная часть топлива перемешивается с воздухом, продукты горения и вовлекаемого воздуха интенсивно расширяются и объем горящего облака значительно превосходит начальный объем горючего газа. Поэтому последний сценарий является наиболее опасным по интенсивности теплового воздействия на окружающие объекты[5].

Опасными факторами, характерными для аварий с пожарами на объектах магистральных трубопроводов, является тепловое излучение. Вариант развития аварий при возникновении огненных шаров достаточно специфичен и относительно мало изучен. Это объясняется невозможностью крупномасштабного исследования данного явления, сложностью фиксации физических закономерностей непосредственно в процессе аварии из-за его случайной природы и относительно кратковременности самого события (10-40 сек.), поэтому актуальными являются методы математического моделирования [5]. В математической модели используются интегральные параметры (максимальный размер огненного шара, время жизни и высота подъема горящего облака, мощность излучения с единицы поверхности) как функции массы вовлеченного топлива, полученные из эмпирических зависимостей путем обработки результатов экспериментов и экспресс-анализа аварийных ситуаций. Данные, полученные в результате исследований, могут быть использованы для прогнозирования последствий и проведения профилактических мероприятий.

Разработка мероприятий по обеспечению пожарной безопасности магистральных трубопроводов в соответствии с действующим законодательством должна базироваться на детальной оценке их пожарной опасности. Методы оценки риска поражения по современным представлениям

должны основываться на количественной оценке, как самих поражающих факторов, так и степени их воздействия на поражаемые объекты, в том числе и биологические в динамике эволюции ОШ. В данном плане большой научный и практический интерес представляет имитационное моделирование воздействия излучения ОШ на окружающую среду. Следует отметить, что оценка рисков, сопутствующим возможным гипотетическим авариям, предполагает проведение анализа достаточно большого количества сценариев развития аварий. Их число может измеряться десятками и сотнями. Поэтому к математической модели, описывающей процесс развития аварии (в том числе и при возникновении ОШ), помимо требования точности и адекватности должно предъявляться и требование по быстродействию[5].

Решение поставленной задачи позволяет прогнозировать опасные зоны поражения и обосновывать управленческие решения по ликвидации последствий аварии. Для прогнозирования опасности теплового поражения необходимы данные по корреляционным отношениям между различными термодинамическими критериями. Состояние анализируемой проблемы как в части математического моделирования эволюции ОШ, так и в части оценки поражений окружающей среды мотивировало дальнейшее исследование в этой области и выбор цели и задач исследования.

В работе [6] было рассмотрено влияние ядерного взрыва на зажигание лесного массива. Энергия взрыва в данном расчете составляла 1МТ и считалось, что высота взрыва - 1 км. Время прихода ударной волны в эпицентр взрыва, в этом случае, превышает 2 с, но зажигание происходит менее, чем за одну секунду. Еще больше разность между временем прихода ударной волны и временем зажигания реализуется на границе зоны зажигания. Поэтому можно сделать вывод, что в данной ситуации зажигание растительного покрова происходит до прихода ударной волны. Этот результат согласуется с данными наблюдений за последствиями американских ядерных взрывов в Хиросиме и Нагасаки [6]. А в работе [7] изучено влияние взрыва

тунгусского метеорита, который имеет неядерную модель взрыва, на зажигание лесных массивов. Существует два режима газофазного зажигания при взрыве тунгусского метеорита: вырожденный (высокотемпературный) режим зажигания ЛГМ в эпицентре взрыва и нормальный (низкотемпературный), обусловленный окислением газообразных продуктов пиролиза ЛГМ при температурах, меньших температуры горения. При энерговыделении $2,5 \cdot 10^{17}$ Дж, соответствующем взрыву тунгусского метеорита, напочвенный покров воспламеняется на расстояниях 12-16 км, в зависимости от прочих условий, а кроны деревьев – в радиусе 6-9 км от эпицентра. С ростом влагосодержания ЛГМ радиус зажигания уменьшается[7].

2. Объект и методы исследования

2.1. Математическое моделирование аварийных ситуаций

Магистральные трубопроводы являются распространенными опасными производственными объектами, предназначенными для транспортирования природного газа (пропана, бутана и др.) на дальние расстояния. Существует три взаимосвязанные группы причин, способствующих возникновению и развитию аварий на объектах трубопроводов:

- ошибки персонала (проведение ремонтных и профилактических работ; ошибки при проектировании; ошибки при пуске и остановке оборудования; ошибки при локализации аварийных ситуаций);
- отказы оборудования (физический износ; коррозия; механические повреждения; усталостные эффекты металла, не выявленные при освидетельствовании; нарушение режимов эксплуатации, превышение давления; дефекты в сварных соединениях);
- нерасчетные внешние воздействия природного и техногенного характера (штормовые ветра и ураганы, снежные заносы, ливневые дожди, грозовые разряды, механические повреждения, диверсии).

Данные причины могут привести к аварийным ситуациям на магистральных трубопроводах. В работе рассматривается один из возможных

вариантов аварий под действием теплового излучения с образованием огненных шаров.

Образование и горение огненного шара при выбросе и зажигании топлива в атмосфере - сложный процесс, включающий нестационарное развитие горючего облака, его турбулентное смешение с окислителем, приводящее к возникновению горючей смеси, зажигание и распространение пламени по частично перемешанному газу, диффузионное горение топлива в переобогащенной смеси. В процессе образования и горения выброса важную роль играет начальный импульс газа, созданный источником, а после возгорания топлива - силы плавучести и процессы радиационного теплопереноса [8].

Эмпирические зависимости, полученные путем обработки результатов экспериментов и описывающие интегральные параметры (максимальный размер огненного шара, время жизни и высоту подъема горящего облака, мощность излучения с единицы поверхности) как функции массы вовлеченного топлива позволяют провести экспресс-анализ аварийной ситуации и оценить ее максимально возможные последствия. При этом используется высокая степень схематизации, приводящая к существенному упрощению наблюдаемых явлений и сведению их многообразия к нескольким типовым сценариям. В то же время имеется очень мало экспериментальных сведений о внутренней концентрационно-тепловой и радиационной структуре огненных шаров. Отчасти это объясняется тем, что крупномасштабные опыты весьма дорогостоящи и опасны, а процесс горения в огненном шаре существенно нестационарен и имеет короткую протяженность по времени. Можно сказать, что до настоящего времени существует серьезное несоответствие между сложностью и многообразием процессов, происходящих при горении огненного шара, и имеющимся уровнем их понимания и описания [8].

В данных условиях весьма перспективным является использование методов математического моделирования, основанных на современных

достижениях в описании турбулентных течений, турбулентного горения, радиационного теплопереноса и эффективных численных методах решения возникающих нестационарных неоднородных дифференциальных уравнений. При соответствующей верификации теоретические модели могут давать надежные данные, позволяющие глубже понять особенности процессов, протекающих при горении облака топлива в открытой атмосфере[8].

Рассмотрим основные подходы к моделированию огненных шаров, имеющиеся в настоящее время. Анализ литературных данных показывает, что развитие моделей огненных шаров происходило по тем же направлениям, что и моделирование термиков. Напомним, что под огненным шаром понимается облако, в котором протекают химические реакции, поддерживающие высокую температуру в теле огненного шара на всем протяжении его жизни, т. е., до полного выгорания топлива. В термике же вся энергия выделяется при его образовании (например, в результате взрыва), так что в дальнейшем температура облака падает за счет смешения с окружающим холодным воздухом. Термик может рассматриваться как поздняя стадия развития огненного шара, начало которой совпадает с моментом окончания горения топлива [8].

Можно выделить два основных подхода к моделированию огненных шаров. Первый из них основан на упрощенном представлении геометрии и замене реального описания гидродинамики течения уравнениями сохранения массы, импульса и энергии, записанными для огненного шара в целом. Огненный шар аппроксимируется сферой, имеющей постоянную высокую температуру и всплывающей как целое в поле сил тяжести под действием суммарной выталкивающей силы. Для описания процессов турбулентного переноса используется гипотеза о вовлечении, предложенная еще в ранних работах по динамике термиков [9]. Согласно этой гипотезе скорость вовлечения атмосферного воздуха в тело огненного шара пропорциональна линейной скорости вертикального подъема огненного шара. В качестве силы, противодействующей силам плавучести, вводится сила сопротивления, а в

ряде работ учитывается и эффект присоединенной массы (т.е., инерция среды, сквозь которую движется всплывающий огненный шар) [10].

Примером модели огненного шара, предполагающей однородность параметров газа по объему облака, может служить подход, предложенный в работе [11]. Рассматривается первоначально неподвижный сферический объем газообразного топлива, который после зажигания начинает гореть в диффузионном режиме на границе с окружающей атмосферой, всплывая за счет действующей на нагретый газ выталкивающей силы. Считается, что скорость турбулентного горения определяется скоростью смешения топлива с воздухом. Поскольку в процессе горения объем нагретых продуктов значительно превосходит собственный объем, огненный шар предполагается состоящим из нагретых продуктов, а исходное количество топлива используется лишь для определения момента окончания горения.

На всем протяжении времени жизни огненный шар считается сферическим объемом нагретого газа с изменяющимися во времени радиусом, высотой и скоростью подъема, но с постоянными термодинамическими параметрами. Для огненного шара, движущегося в автомодельном режиме, записываются законы сохранения массы и вертикального импульса: скорость изменения объема огненного шара считается пропорциональной мгновенной скорости подъема, тогда как скорость изменения вертикального импульса шара приравнивается действующей на облако выталкивающей силе.

Другим подходом к моделированию огненных шаров, приобретающим в настоящее время все большее значение, является численное исследование протекающих процессов, позволяющее изучать внутреннюю структуру огненного шара, особенности и температурно-концентрационных полей, возникающих в условиях вынужденной и естественной конвекции, а также роль масштабных эффектов при горении облаков[8].

В целом можно утверждать, что до настоящего времени цельная теоретическая картина физико-химических процессов, протекающих при нестационарном медленном горении топливных облаков в условиях открытой

атмосферы получена не была. Имеющиеся численные расчеты, как правило, сконцентрированы на отдельных гранях явления, зачастую не принимая во внимание или сильно упрощая описание других важных факторов. Практически отсутствуют систематические исследования процессов турбулентного горения в теле огненного шара, не изучена относительная роль инерционных и плавучих сил в эволюции горящего облака при выбросе топлива в атмосферу, не изучено влияние масштаба облака на его внутреннюю структуру, процессы тепломассопереноса, воздействие огненного шара на окружающую среду. Решение перечисленных вопросов позволило бы достичь более высокого уровня понимания явления огненного шара, свести воедино разрозненные эмпирические данные, а также определить направления новых экспериментальных исследований [8].

3. Математическое моделирование возникновения пожаров под действием излучения

3.1. Физическая постановка задачи

Пусть источник тепловой энергии находится на высоте H от поверхности Земли (см. рис. 1). Так как его размеры малы по сравнению с радиусом Земли, будем считать точечным источником излучения, d - расстояние от центра источника до текущей точки поверхности лесного массива, h - высота растительного покрова, O - эпицентр, r - радиус зоны зажигания. На верхнюю границу $z=h$ растительного покрова действует интенсивный тепловой поток $q_R(r,t)$, который ослабляется по мере удаления от эпицентра O . Максимум интенсивности источника достигается при $t=t_o$, далее она затухает до нуля согласно данным о $q_R(r,t)$, которая может быть аппроксимирована следующим образом [6]:

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

$$t_m = 0.92m^{0.1}, \quad P_m = 450 \cdot 10^3$$

Здесь t_p - коэффициент пропускания атмосферы;

P_m - максимальная величина светового импульса в момент времени t_m , Дж/с;

L - угол между направлением вектора плотности потока излучения и верхней границей растительного покрова;

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

t_m - время максимума тепловыделения источника излучения, с;

k_0 - аппроксимационный коэффициент ($k_0=0.75$).

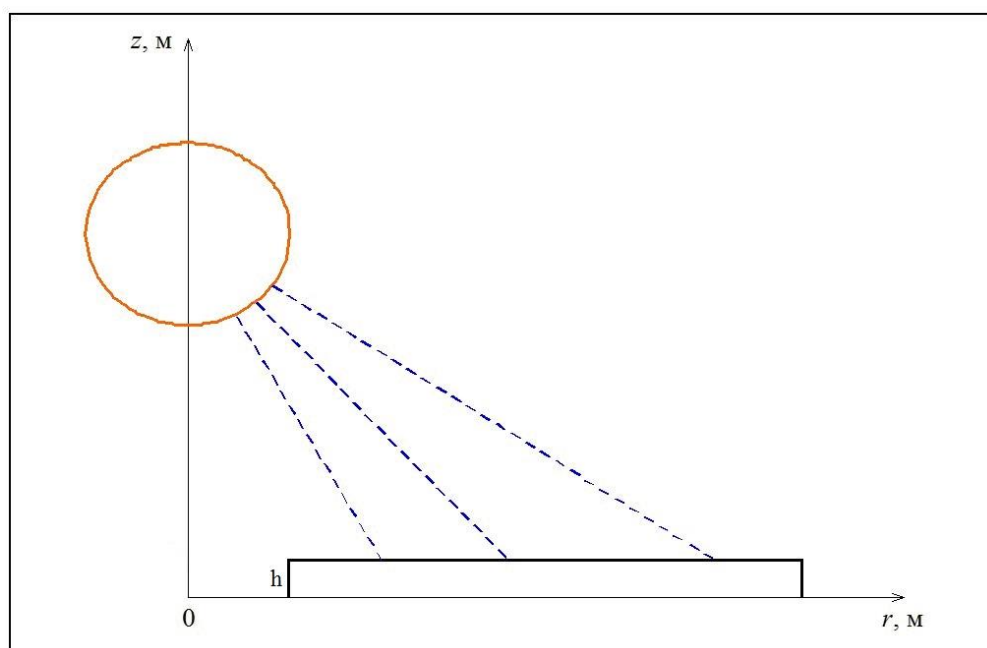


Рисунок 1- Схема процесса зажигания растительного покрова

Поступление тепловой энергии в растительный покров вызывает нагрев горючих материалов, испарение влаги и последующее термическое разложение твердого материала с выделением летучих продуктов пиролиза. Затем продукты пиролиза сгорают в атмосфере, взаимодействуя с кислородом воздуха. Из-за наличия силы тяжести, нагретый воздух начинает всплывать вверх. Ввиду того, что на периферии от эпицентра ОШ интенсивность лучистого потока в растительный покров невелика, то там не происходит зажигания. Таким образом, за время действия источника излучения формируется зона первоначального зажигания растительного покрова

радиусом r . В идеальном случае она имеет в плане форму круга. Последующее ее развитие определяется взаимодействием восходящих потоков с полем ветра, поскольку они выносят в приземный слой атмосферы и осуществляют разброс по окружающей территории твердых горящих элементов, а также метеорологическими и географическими условиями в заданном районе [6].

Для целей настоящего исследования будем считать, что скорость ветра в атмосфере относительно невысока и энергия в основном переносится благодаря излучению. Это позволяет рассматривать задачу в осесимметричной постановке. В работе будут указаны основные физические допущения и представления об объекте исследования, необходимые для понимания математической модели. Считается, что:

- течение симметрично относительно вертикальной оси z , имеющей начало в центре рассматриваемой области (рис.1) и направленной вертикально вверх;
- течение носит развитый турбулентный характер;
- плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука,
- растительный покров считается недеформируемой средой. Предполагаем, что растительный покров можно моделировать однородной двухтемпературной многофазной реагирующей средой.

Выделяется температура конденсированной (твердой) T_s и газовой T фаз. К первой относится сухое органическое вещество, влага, конденсированные продукты пиролиза и минеральная часть горючих материалов. В газовой фазе будем выделять только необходимые для описания реакции горения компоненты, то есть массовые концентрации c_α ($\alpha=1$ – кислород, 2 - горючие продукты пиролиза, 3 – остальные инертные компоненты, включая пары воды). Твердая фаза, представляющая горючий

материал, воду в жидко-капельном состоянии и конденсированные продукты пиролиза, не имеет собственной скорости и ее объемной долей, по сравнению с газовой фазой, можно пренебречь в соответствующих уравнениях, так как в единице объема растительного покрова находится <0.5 кг. С точки зрения гидродинамики, данная пористая среда, тем не менее, оказывает сопротивление с силой $\vec{F} = \rho_{sc_d} |\vec{v}| \vec{v}$ любому перемещению воздушных масс. Считается, что среда находится в термодинамическом равновесии [6].

3.2. Математическая постановка задачи

Направим ось z вертикально вверх, ось r - вдоль поверхности земли (см. рис.1). Для описания процессов тепломассопереноса в объеме с растительностью используются общие законы сохранения для многофазной среды. Поскольку любое перемещение воздушных потоков в атмосфере носит турбулентный характер, то для их описания используются уравнения Рейнольдса. Сформулированная задача в цилиндрической системе координат сводится к решению следующих уравнений [6]:

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

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w c_p T) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r \rho c_p \overline{v'T'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho c_p \overline{w'T'}) + k_g (c U_R - 4 \sigma T^4) + q_5 R_5 + \alpha_v (T_s - T); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho c_\alpha) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_\alpha) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(-r \rho \overline{v' c'_\alpha}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{w' c'_\alpha}) - R_{5\alpha}, \alpha = 1, 2; \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \varphi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_{3w} - q_2 R_{2s} + k(c U_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s); \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \\ \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - \frac{M_c}{M_1} R_{3w}, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sum_{\alpha=1}^3 c_\alpha = 1, P_e = \rho_5 R T \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}. \\ \dot{m} = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3, R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, R_{52} = \nu(1 - \alpha_c) R_1 - R_5. \end{aligned} \quad (10)$$

Начальные и граничные условия для системы уравнений (2) - (10) имеют следующий вид:

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

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

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

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

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

Здесь:

z_0 - уровень шероховатости.

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

c_{pi} - 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 - CO, 3 - инертные компоненты воздуха(азот, CO₂, водяной пар);

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, M_c, M - молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси;

s, c_d - удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент растительного покрова;

c - скорость света;

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

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

g - ускорение свободного падения.

Индексы "o" и "e" относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно. Верхний индекс-штрих "" относится к пульсационной составляющей данной величины. Использовалась локально - равновесная модель турбулентности [6].

3.3. Численный метод решения

Дифференциальные уравнения, описывающие процессы тепло- и массообмена гидродинамики подчиняются обобщенному закону сохранения. Если обозначить любую искомую функцию Φ , то обобщенное дифференциальное уравнение принимает в вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho v_1\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho v_2\Phi) = \frac{\partial}{\partial x_1}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_1}) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_2}) + S_\Phi; \quad (16)$$

где t , x_i - временная и пространственные координаты, ρ - плотность, v_i - компоненты вектора скорости, Γ_Φ - коэффициент переноса (например, Γ_Φ — коэффициент турбулентной вязкости, теплопроводности, диффузии и т.д.), S_Φ — источниковый член. В частности в S_Φ может входить приток (сток) тепла за счет химических реакций в уравнении энергии или увеличение (уменьшение) концентраций компонент в результате химических реакций в уравнении диффузии. Конкретный вид Γ_Φ и S_Φ зависит от смысла переменной Φ . В (16) также подразумевается суммирование по индексу i . При решении двумерных задач $i=1,2$.

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

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -K(t)\Phi + F(t), \quad K(t) \geq 0, F(t) \geq 0, \Phi|_{t=0} = \Phi_e. \quad (17)$$

Построение дискретного аналога для уравнения вида (16) проведем на основе метода контрольного объема, подробное изложение которого дается в [10]. Основная идея метода поддается прямой физической интерпретации. Расчетная область разбивается на некоторое число непересекающихся контрольных объемов таким образом, что каждая узловая точка содержится в одном контрольном объеме. В двумерном случае прямоугольник. Дифференциальные уравнения интегрируются по каждому контрольному объему. Для вычисления интегралов используются кусочные профили

(прямые, параболы, полиномы различных степеней, экспоненты и т.д.), которые описывают изменение функции Φ между узловыми точками. При численной реализации наиболее оптимальными являются полиномиальные профили. Полученный таким образом дискретный аналог выражает закон сохранения для параметра состояния Φ для конечного каждого контрольного объема. Так же, как дифференциальное уравнение выражает закон сохранения для бесконечно малого контрольного объема. Важнейшее свойство метода контрольного объема состоит в том, что при его использовании точно выполняются интегральные законы сохранения таких величин как масса, количество движения, энергия и т.д. в каждом контрольном объеме и для любой группы контрольных объемов и, следовательно, на всей расчетной области. Таким образом, даже решение с использованием малого количества контрольных объемов удовлетворяет точным интегральным балансам во всей области, то есть дискретный аналог (разностная схема) Патанкара - Сполдинга является консервативным. Способ разбиения расчетной области для двумерного случая на контрольные объемы и типичный контрольный объем приведены на рис.2 [10].

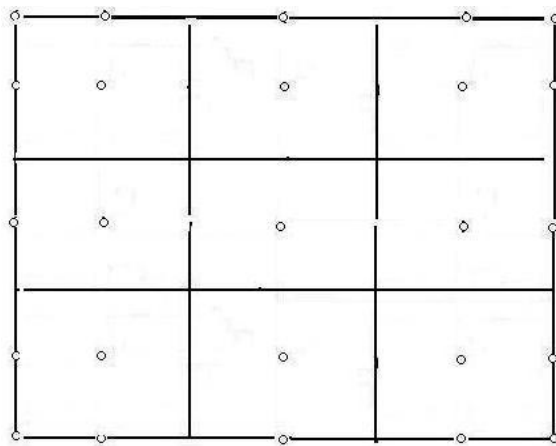


Рисунок 2- Пример разбиения расчетной области на контрольные объемы на плоскости.

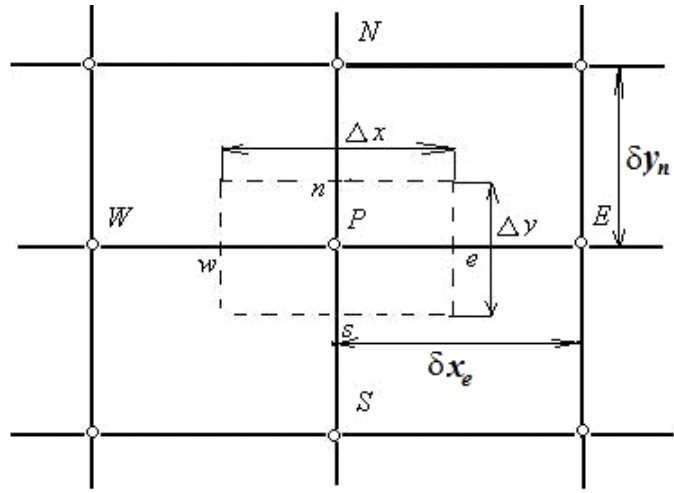


Рисунок 3- Типичный контрольный объем для двумерного случая.

На рис. 3 изображена часть типичной двумерной сетки. Пунктирной линией обозначен контрольный объем для двухмерной области с центром в точке P . Центры соседних контрольных объемов (узлов) обозначены буквами N, S, W, E («север», «юг», «запад» и «восток»). Соответствующие точки на границах контрольного объема обозначены прописными буквами n, s, w, e . Размеры контрольного объема обозначены Δx и Δy . Расстояния до центров соседних контрольных объемов обозначены, например $\delta x_e, \delta y_n$ и т.д. [10].

Следуя [12], где подробно изложен способ получения дискретного аналога с помощью метода контрольного объема, запишем в окончательном виде для трехмерного случая для уравнения (16) дискретный аналог запишется в следующем виде:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b \quad (18)$$

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

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

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

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

Здесь Φ_P^0 и ρ_P^0 обозначают известные значения для времени t , а все другие величины ($\Phi_P, \Phi_E, \Phi_W, \Phi_N, \Phi_S$ и т. д.) представляют собой неизвестные

величины для времени $t + \Delta t$. Массовые расходы F_e, F_w, F_n, F_s , определены уравнениями

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

соответствующие проводимости:

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta x_2}{(\delta x)_e}, D_w = \frac{\Gamma_w \Delta x_2}{(\delta x)_w}, D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x_1}{(\delta x)_n}, D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x_1}{(\delta x)_s}, \quad (19)$$

а числа Пекле: $P_e = F_e / D_e, P_w = F_w / D_w, P_n = F_n / D_n, P_s = F_s / D_s$.

Выражение типа $[A, B]$ означает, что выбирается максимальный элемент из двух. Для функции $A(|P|)$ рекомендуется схема со степенным законом [8]

$$A(|P|) = \left[0, (1 - 0, |P|)^5 \right] \quad (20)$$

Следует отметить, что даже на этой стадии физический смысл различных коэффициентов в (18) понятен. На шести гранях контрольного объема учитывается влияние конвекции и диффузии, коэффициентами в соседних точках a_E, a_W, a_N, a_S , они зависят от массового расхода F и проводимости D [10]. Член $a_P^0 \Phi_P^0$ характеризует известную величину Φ для контрольного объема, (для времени t), отнесенную к шагу по времени. Оставшиеся члены можно интерпретировать аналогичным образом.

Предполагаем непрерывность и дифференцируемость функций в дискретном аналоге (18) необходимое число раз. Разложением в ряд Тейлора легко показать, что разностные уравнения (18) аппроксимируют исходную краевую задачу в общем случае с погрешностью $O(h + t)$. Граничные условия (16) в рамках дискретного аналога (18) аппроксимируются согласованным с внутренними узлами образом и имеют такой же порядок аппроксимации. Дискретный аналог основной системы уравнений является полностью неявным, что исключает получение нефизических решений. Практическая проверка устойчивости и сходимости проводилась путем изменения размеров контрольных объемов и шага по времени Δt с помощью метода пробных

функций, то есть когда заранее известно решение. Разностные уравнения (18), как уже отмечалось выше, полностью консервативны в силу способа их построения [10].

Чтобы получить дискретные аналоги на границах расчетной области нужно проинтегрировать уравнения типа (15) и учесть на заданной границе условия типа (16). Если использовать сдвинутые контрольные объемы, то на границах возникнут половинные контрольные объемы. По остальным направлениям и для скалярных функций применяются нулевые контрольные объемы [8]. Например, они применяются для правой вертикальной границы трехмерной расчетной области, если граничное условие в дифференциальной форме имеет вид

$$\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} + \beta_2 \Phi = \beta_3 \quad (21)$$

Используя на границе половинных контрольных объемов [8] получим дискретный аналог в виде

$$a_p \Phi_p = a_w \Phi_w + b \quad (22)$$

где $a_p = a_w + a_p^0 - S_p \Delta x_1 \Delta x_2 + \beta_2 \Delta x_2$, $b = S_c \Delta x_1 \Delta x_2 + a_p^0 \Phi_p^0 + \beta_3 \Delta x_2$, а остальные обозначения приведены выше [10].

Аналогично, имея граничное условие типа (16) на соответствующей границе, получим дискретные аналоги. Для случая нулевого контрольного объема, то есть соответствующий размер Δx_1 на границе равен нулю. Так, используя (22), получим, например, для нулевого контрольного объема $\Delta x_1 = 0$

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

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

В уравнении химической кинетики вида (17) была использована

неявная	разностная	схема	$\Phi^{n+1} = \frac{\Phi^n + F^{n+1}(t)\Delta t}{1 + K^{n+1}(t)\Delta t}$
---------	------------	-------	---

(24)

Уравнение (24) имеет первый порядок аппроксимации по t и обеспечивает положительность Φ для любых шагов по времени Δt , что выражает физическую природу переменной Φ .

В уравнении движения символом v_i обозначается составляющая скорости, а коэффициентам Γ и S придается соответствующее значение. В виду того, что в процессе расчёта величин давлений возникают сложности, связанные с первыми производными в конвективных членах и градиентом давления, в данной методике используется шахматная сетка для компонентов v_i [10]. На Рис. 4 представлен пример по размещению контрольных объёмов компонентов v_i и других функций таких, как плотность, температура и давление [10].

Используя шахматную сетку (см. рис.4) дискретные аналоги для компонент скорости уравнения количества движения отличаются от дискретных аналогов уравнений для других Φ , при расчете в узлах сетки. Это отличие является несущественным. Оно связано с использованием для аппроксимации уравнений количества движения контрольных объёмов на шахматной сетке. Для каждой зависимой переменной можно использовать свою сетку. Для расчета компонентов скорости нужно определять их на сетке, она будет различаться с сетками, используемыми для других переменных.

При использовании сдвинутых для уравнений движения сеток, компоненты вектора скорости рассчитываются в точках, лежащих на гранях контрольных объёмов определенных для функций скалярных величин (температура, концентрации, давление и т.д.). Следовательно, на поверхностях контрольных объёмов, перпендикулярных направлениям осей x_i составляющие скорости v_i вдоль соответствующих осей x_i . На рис. 4 стрелками указаны точки, в которых будут определяться компоненты скорости v_i для двумерного случая. Кружками обозначаются точки для скалярных функций (узловые точки – основными). Анализируя рис. 4 следует, что по отношению к узловым точкам основной сетки точки, в которых определяется компоненты скорости v_i , смещены только в направлении оси x_i . То есть, данные точки

лежат на отрезках, которые соединяют две соседние узловые точки. Между основными узловыми точками (на гранях контрольных объемов), в которых задаются скалярные функции (температура, концентрации, давление и т.д.) расположены точки для определения v_i [10].

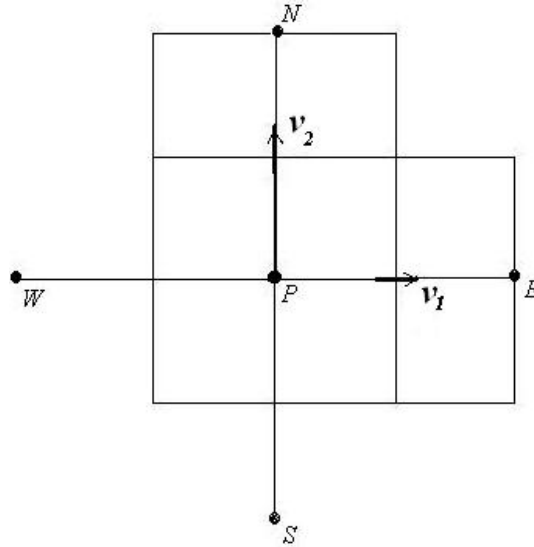


Рисунок 4- Распределение контрольных объемов для скалярных функций и компонентов скорости v_i

Так как сетка будет смещенная, массовый расход через грани контрольных объемов можно вычислять не интерполируя соответствующие компоненты скорости. Данный подход определения сеток обеспечивает более удобный вид записи дискретного аналога обобщенного дифференциального уравнения Φ .

Итоговый дискретный аналог для компонентов скорости v_i можно записать в виде [10]

$$\begin{aligned} a_e v_{1e} &= \sum a_{nb} v_{1nb} + b + (p_P - p_E) A_e, \\ a_n v_{2n} &= \sum a_{nb} v_{2nb} + b + (p_P - p_N) A_n. \end{aligned} \quad (25)$$

Здесь число соседних членов зависит от размерности задачи под знаком суммирования. Формулы (25) записаны в соответствии с (18). Отличие состоит в том, что соответствующие члены b определяется как и в (18), но проекции градиента давления на оси координат не включены в b , а выписаны отдельно. Коэффициенты A_e , A_n определяют в двумерном случае $A_e = \Delta x_2$, $A_n = \Delta x_1$.

Для того, чтобы решить уравнения движения (25) необходимо задать или сделать расчет поля давления. Определим поле давление так, чтобы поле скорости удовлетворяло уравнению неразрывности. Будем использовать для этого алгоритм *SIMPLE*. В [10] подробно изложена данная методика. При этом для поправки давления будет вводиться вспомогательная. Получение дискретного аналога для поправки давления p' также приведено в [11]. Здесь p' определяется по формуле $p' = p - p^*$. Где p – давление, а p^* - приближенное поле давления. Уравнение для сеточных значений поправки давления p' имеет вид :

$$a_p p'_p = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + b, \quad (26)$$

где

$$a_E = \rho_e d_e \Delta x_2, a_W = \rho_w d_w \Delta x_2, a_N = \rho_n d_n \Delta x_1, a_S = \rho_s d_s \Delta x_1, a_p = a_E + a_W + a_N + a_S, \\ b = \frac{(\rho_p^0 - \rho_p) \Delta x_1 \Delta x_2}{\Delta t} + \left[(\rho v_1^*)_w - (\rho v_1^*)_n \right] \Delta x_2 + \left[(\rho v_2^*)_s - (\rho v_2^*)_n \right] \Delta x_1.$$

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

3.4. Результаты решения задачи

На основе изложенной математической модели проводились численные расчеты по определению картины процесса возникновения загорания растительного покрова в результате образования огненного шара и воздействия теплового излучения на подстилающую поверхность. В результате численного интегрирования получены поля массовых концентраций компонентов газовой фазы, температур, объемных долей компонентов твердой фазы. На основе этих данных определялись значения радиусов зажигания лесных массивов под действием теплового излучения огненного шара, которые зависят от влажности подстилающей поверхности и массы разлившегося горючего вещества. По полученным результатам составлены таблицы зависимости радиуса зажигания от массы разлившегося горючего вещества и влагосодержания подстилающей поверхности. Затем построены графики по данным таблицам. А также построены зависимости объемных долей, температур и концентраций от времени.

Рассмотрим зависимости различных функции от времени в точке зажигания при влагосодержании $W=0,3$; запасе ЛГМ $Z=10 \text{ кг/м}^3$, массе разлившегося топлива $m=10 \text{ т}$ и высоте растительного покрова $H=5 \text{ см}$. Максимальный радиус зажигания при данных условиях 37 метров.

Таблица 1- Зависимости температур, объемных долей и концентрации от времени

t,с	$\bar{T}_s$	$\bar{T}$	$\bar{\varphi}_1$	$\bar{\varphi}_2$	$\bar{\varphi}_3$	$\bar{C}_1$	$\bar{C}_2$
1	1,04	1	0,997	0,293	$169 \cdot 10^{-3}$	0,960	0,029
3	1,37	1,03	0,968	0,269	0,032	0,780	0,292
4	1,59	1,08	0,793	0,206	0,207	0,397	1,19
5	1,85	1,11	0,158	0,067	0,842	0,205	1,71
6	2,01	1,36	0	$0,36 \cdot 10^{-24}$	0,973	0,187	0,059
7	3,02	2,48	0	$0,51 \cdot 10^{-35}$	0,886	0,175	0,014
8	5,43	5,51	0	0	0,775	0,193	0,004
9	4,86	4,79	0	0	0,558	0,142	0,002

где t – время пожара, $\bar{T}_s$ –температура твердой (конденсированной) фазы, $\bar{T}$ - температура газовой фазы, $\bar{\varphi}_1$ – объемная доля сухого органического вещества, $\bar{\varphi}_2$ – объемная доля воды, $\bar{\varphi}_3$ – объемная доля кокса, $\bar{C}_1$ – концентрация кислорода, $\bar{C}_2$ – концентрация продуктов пиролиза.

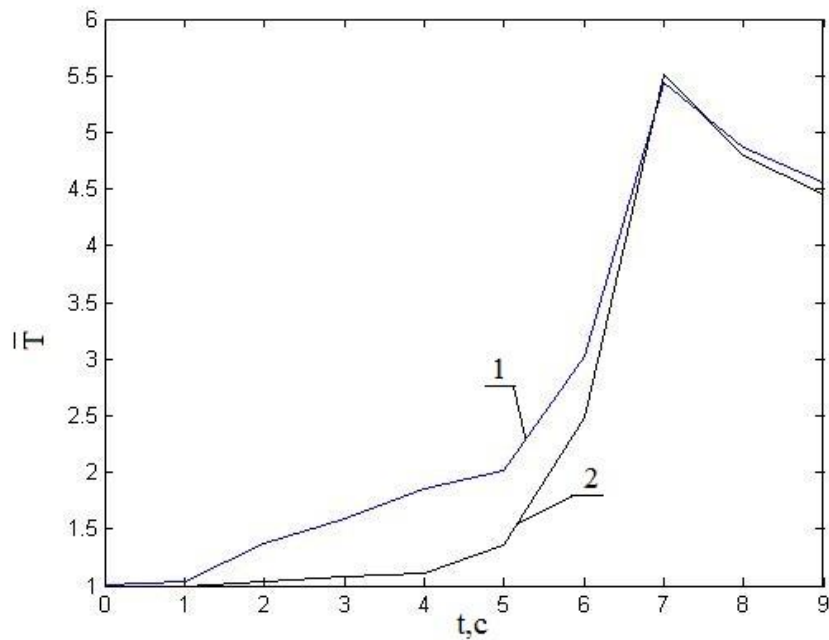


Рис. 5 – График зависимости температуры в точке зажигания от времени

1- график зависимости температуры твердой фазы в точке зажигания от времени $\bar{T}_s = T_s / T_e, T_e = 300K$;

2- график зависимости температуры газовой фазы в точке зажигания от времени $\bar{T} = T / T_e, T_e = 300K$.

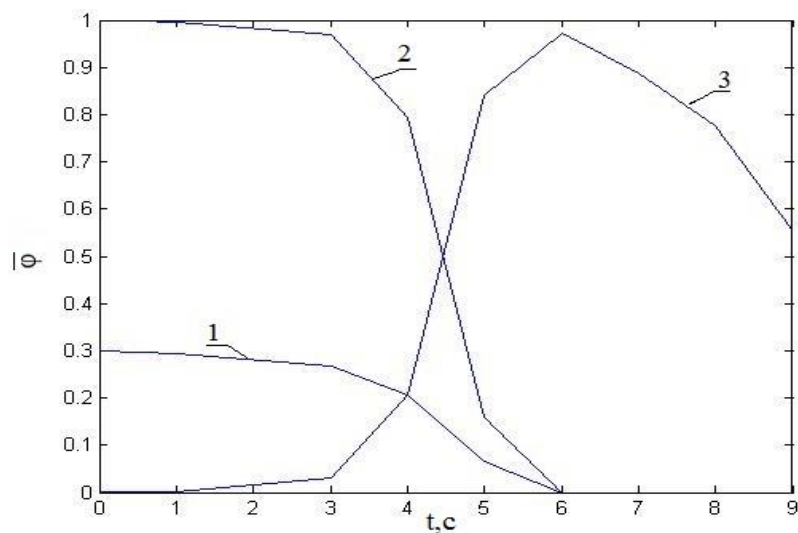


Рис. 6 – График зависимости изменения объемных долей в точке пожара от времени

1-график зависимости объемной доли воды ($\bar{\varphi}_2$) в точке пожара от

времени;

2- график зависимости объемной доли сухого органического вещества ($\bar{\varphi}_1$) в точке пожара от времени;

3- график зависимости объемной доли кокса ($\bar{\varphi}_3$) в точке пожара от времени.

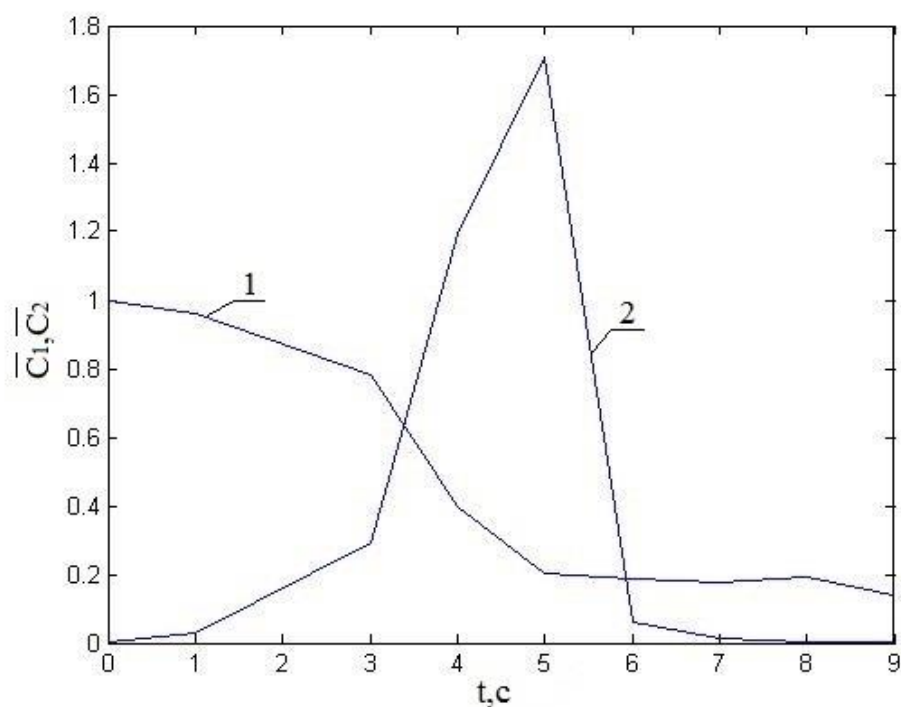


Рис. 7 – График зависимости концентрации кислорода и продуктов пиролиза в точке пожара от времени

1- график зависимости концентрации кислорода ($\bar{C}_1$) в точке пожара от времени;

2- график зависимости концентрации летучих горючих продуктов пиролиза ($\bar{C}_2$) в точке пожара от времени.

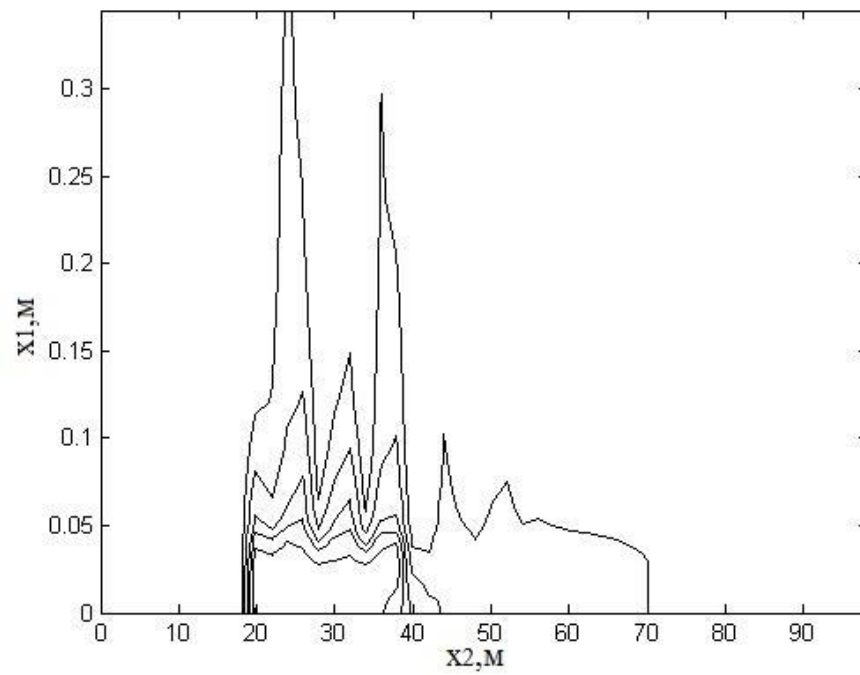


Рис. 8 – График распределения изотерм температур для высоты растительного покрова $H=0,05$ м.

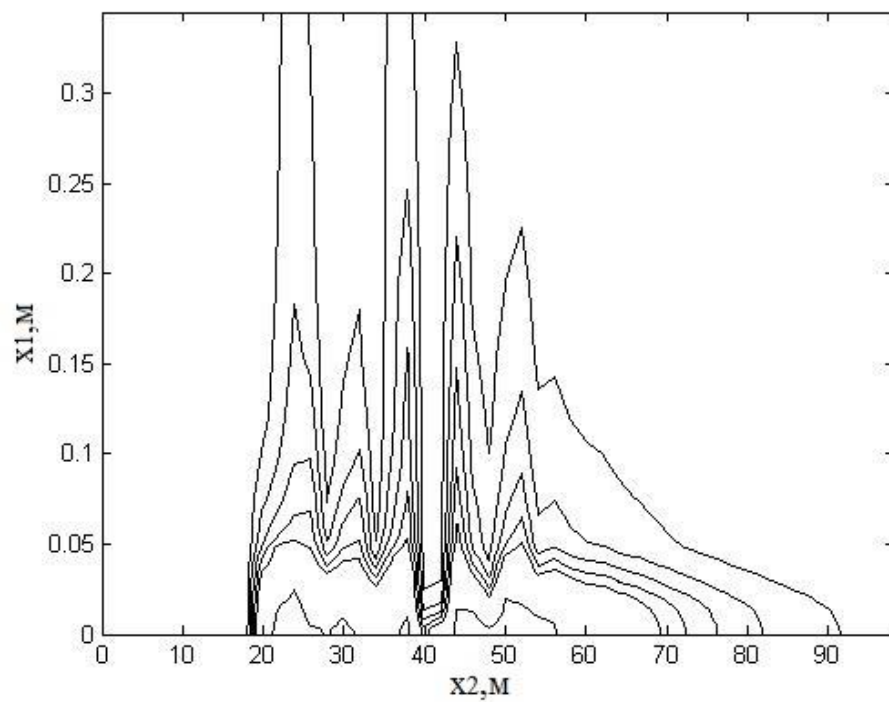


Рис. 9 – График распределения изолиний концентрации кислорода ($\bar{C}_1$) для высоты растительного покрова $H=0,05$ м.

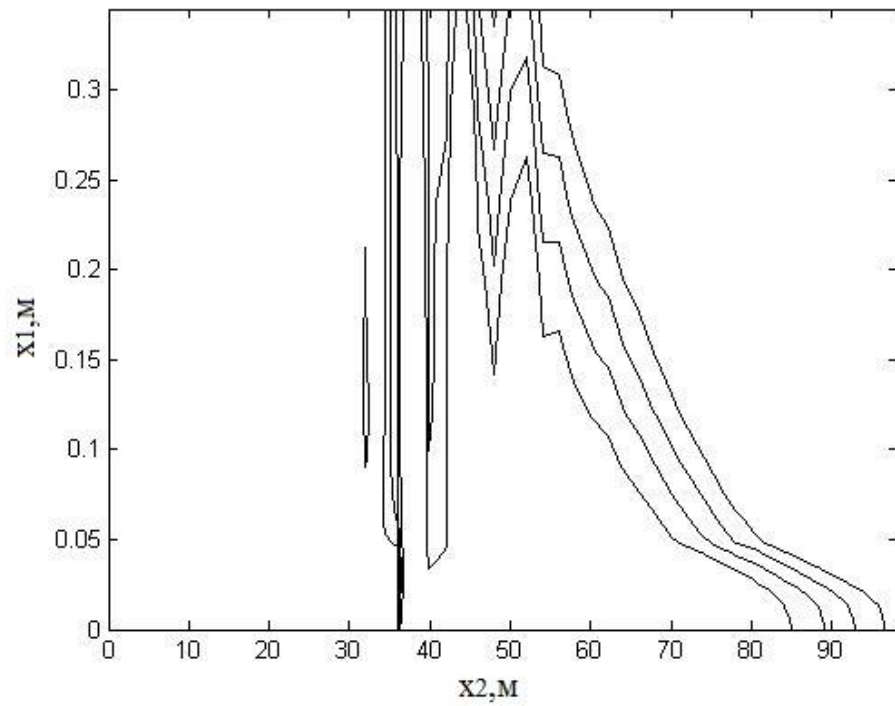


Рис. 10 – График распределения изолиний концентраций продуктов пиролиза ($\bar{C}_2$) для высоты растительного покрова $H=0,05$ м.

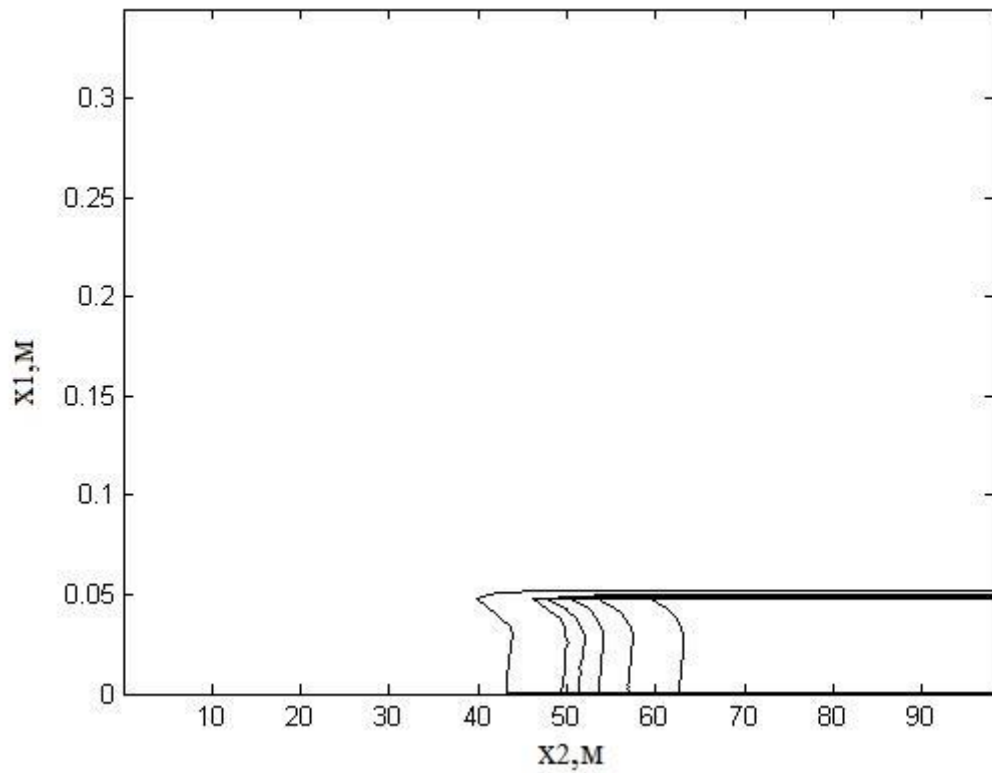


Рис. 11 – График распределения изолиний объемной доли сухого органического вещества ($\bar{\varphi}_1$) для высоты растительного покрова $H=0,05$ м.

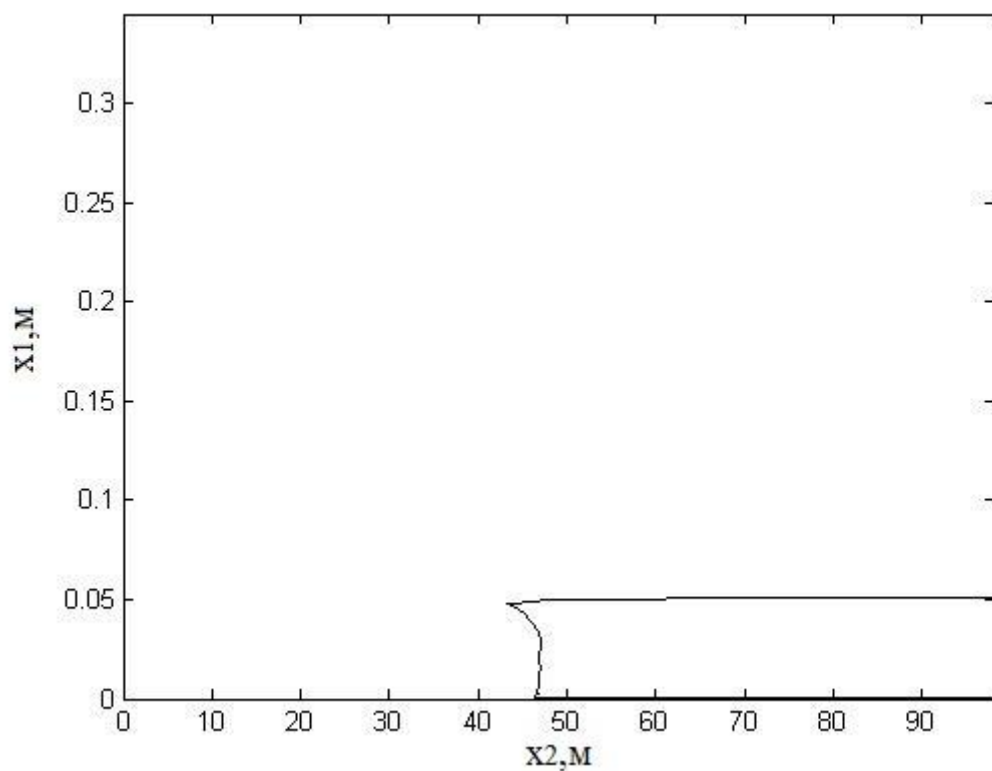


Рис. 12 – График распределения изолиний объемной доли воды ($\bar{\varphi}_2$) для высоты растительного покрова $H=0,05$ м.

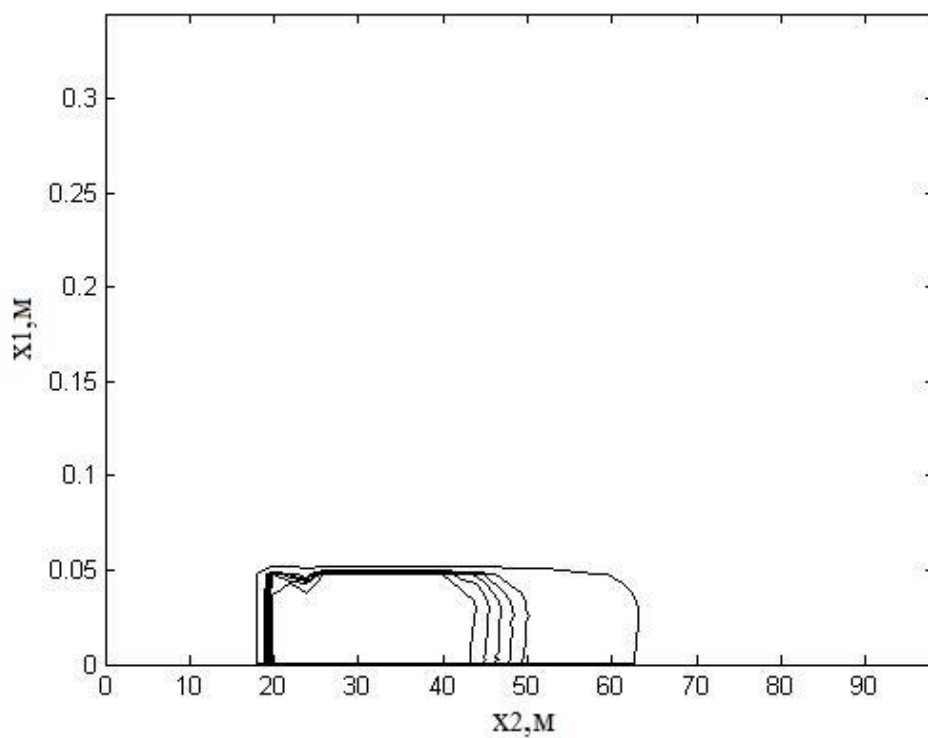


Рис. 13 – График распределения изолиний объемной доли кокса ($\bar{\varphi}_3$) для высоты растительного покрова $H=0,05$ м.

Таблица 2- Зависимости радиуса растительного покрова от влагосодержания и массы разлившегося топлива

Масса разлившегося горючего вещества, т	Радиус зажигания растительного покрова при влагосодержании $W=0.1$, м	Радиус зажигания растительного покрова при влагосодержании $W=0.3$, м	Радиус зажигания растительного покрова при влагосодержании $W=0.5$, м
10	53,52	39,45	27,39
20	72,61	55,53	43,47
30	87,19	68,60	54,52
40	99,25	79,15	63,07

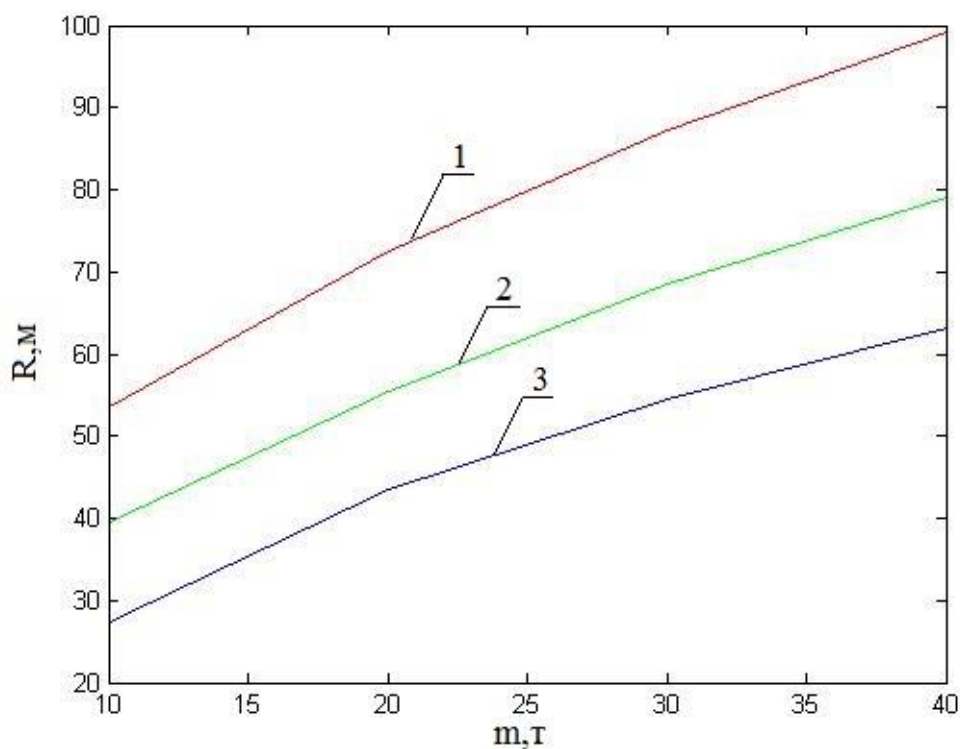


Рис. 14 – График зависимости радиусов зажигания растительного покрова от массы разлившегося горючего вещества и влагосодержания

- 1- Влагосодержание $W=0,1$
- 2- $W=0,3$
- 3- $W=0,5$

3.6 Верификация модели

Верификацию нашей модели выполним по этому уравнению:

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

$$t_m = 0.3m^{0.1}, \quad P_m = 450 * 10^3$$

Здесь t_p - коэффициент пропускания атмосферы;

P_m - максимальная величина светового импульса в момент времени t_m , Дж/с;

L - угол между направлением вектора плотности потока излучения и верхней границей растительного покрова;

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

t_m - время максимума тепловыделения источника излучения, с;

k_0 - аппроксимационный коэффициент ($k_0=0.75$).

$$\int_0^t q_R(r, t) dt = \frac{t_p P_m \sin L}{4 \pi D^2} \begin{cases} t_m^2 / 2, & t < t_m \\ t_m / k_0 (1 - \exp(-k_0(t / t_m - 1))), & t \geq t_m \end{cases},$$

$$t_m = 0.3m^{0.1}, \quad P_m = 450 * 10^3$$

4. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережения»

1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Выпускная квалификационная работа по теме «Математическое моделирование возникновения лесных пожаров в результате аварийного разрыва трубопровода» выполняется в рамках научно-исследовательской работы для организаций, связанных с транспортировкой нефти и газа, непосредственно, на объектах магистральных трубопроводов. Заинтересованными лицами в полученных данных будут являться сотрудники организаций, обслуживающих данные объекты.

Суть работы заключается в определении времени и размеров зон зажигания и изучение механизма протекающих при этом физико-химических процессов.

Сегментировать рынок услуг по работе с программой «Fire» и «MatLab» можно по следующим критериям: вид горючего вещества, которое транспортируется по магистральным трубопроводам и визуальное представление результатов математического моделирования (Таблица 3).

Таблица 3 - Карта сегментирования рынка услуг по разработке программы математического моделирования

		Вид горючего вещества		
		Нефть	Газ	Нефть-газ
Результат представления математического моделирования	Графики	1, 2	1, 2	1, 2
	Формулы	1, 2	1, 2	1, 2

	Таблицы	1	1	1

1 – SIMPLE

2 – SIVA

1.2. Анализ конкурентных технических решений

Таблица 4 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

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

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

- моделируются графики и результат представлен наглядно;
- программа все необходимые уравнения считает автоматически;
- проста в использовании;
- приемлемая цена.

1.3 Технология QuaD

Таблица 5-Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	
Показатели оценки качества разработки					
1. Унифицированность	0,05	85	100	0,85	0,04
2. Безопасность	0,1	90	100	0,9	0,09
3. Потребность в ресурсах памяти	0,15	95	100	0,95	0,1
4. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,1	85	100	0,85	0,09
5. Простота эксплуатации	0,1	85	100	0,85	0,09
6. Качество интеллектуального интерфейса	0,1	80	100	0,8	0,08
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
7. Конкурентоспособность продукта	0,15	70	100	0,7	0,1
8. Перспективность рынка	0,05	60	100	0,6	0,03
9. Цена	0,1	90	100	0,9	0,09
10. Финансовая эффективность научной разработки	0,1	70	100	0,7	0,07
Итого	1	810	1000	0,81	0,78

$$\Pi_{\text{cp}} = \sum B_i \cdot \text{Б}_i = 4,25 + 9 + 14,25 + 8,5 + 8 + 10,5 + 3 + 9 + 7 = 73,5$$

Перспективность данной разработки (73,5) выше среднего

1.4 SWOT-анализ

Таблица 6 - Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Более низкая стоимость, по сравнению с другими технологиями. С2. Использование современного оборудования и ИТ-технологий., С3. Наличие опытного руководителя. С4. Представление полученной информации наглядно (графики,. формулы, таблицы). С5. Актуальность программы	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров для работы с программой. Сл2. Время, затрачиваемое на расчет в программе и построение графиков (30-40 минут). Сл3. Отсутствие необходимого оборудования и программного обеспечения для работы с программой. Сл4. Ограниченная область применения. Сл5. Медленный процесс вывода на рынок новой технологии.
Возможности: В1. Повышение стоимости конкурентных разработок В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Повышение уровня предотвращения экологического		

загрязнения		
В4. Повышение уровня оперативного реагирования спец. служб		
В5. Повышение уровня локализации аварий		
Угрозы:		
У1. Неумение персонала пользоваться программой.		
У2. Появление новых конкурентов.		
У3. Появление новых технологий.		
У4. Отсутствие спроса на программу.		
У5. Введение дополнительных государственных требований и сертификации программы.		

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

Второй этап

Выявление соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта.

Таблица 7- Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
	B ₁	+	-	0	-	+
	B ₂	+	-	-	+	0
	B ₃	-	+	+	+	+
	B ₄	-	+	+	+	+
	B ₅	-	+	+	+	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и возможности: B1C1C5, B2C1C4, B3B4B5C2C3C4C5.

Таблица 8 - Интерактивная матрица проекта

Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл ₁	Сл ₂	Сл ₃	Сл ₄	Сл ₅
	B ₁	+	+	+	+	0
	B ₂	-	-	-	-	0
	B ₃	0	-	-	0	-
	B ₄	0	-	-	0	-
	B ₅	0	-	-	0	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и возможности: B1Сл1Сл2Сл3Сл4.

Таблица 9 - Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		С ₁	С ₂	С ₃	С ₄	С ₅
	У ₁	+	+	+	0	-
	У ₂	-	+	+	-	0
	У ₃	0	+	+	0	-
	У ₄	-	+	+	-	0
	У ₅	0	+	-	0	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и угроз: У1С1С2С3, У2С2С3, У3У4С2С3, У5С2С5.

Таблица 10 - Интерактивная матрица проекта

Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл ₁	Сл ₂	Сл ₃	Сл ₄	Сл ₅
	У ₁	+	-	+	-	0
	У ₂	+	+	0	+	+
	У ₃	+	+	+	+	0
	У ₄	+	+	+	+	0
	У ₅	-	-	-	-	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и угроз: У1Сл1Сл3, У2Сл1Сл2Сл4Сл5, У3У4Сл1Сл2Сл3Сл4, У5Сл5.

Третий этап

Таблица 11 - SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского: С1. Более низкая стоимость, по сравнению с другими технологиями. С2. Использование современного оборудования и ИТ-технологий., С3. Наличие опытного руководителя. С4. Представление полученной информации наглядно (графики,. формулы, таблицы). С5. Актуальность программы	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров для работы с программой. Сл2. Время, затрачиваемое на расчет в программе и построение графиков (30-40 минут). Сл3. Отсутствие необходимого оборудования и программного обеспечения для работы с программой. Сл4. Ограниченная область применения. Сл5. Медленный процесс вывода на рынок новой технологии.
Возможности: В1. Повышение стоимости конкурентных разработок В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Повышение уровня предотвращения экологического загрязнения В4. Повышение уровня оперативного реагирования спец. служб	- В результате низкой стоимости продукт могут позволить себе многие организации - В результате использования современных технологий повысится скорость локализации экологической очистки - При грамотном подходе руководителей улучшится реагирование служб, а следовательно и сам исход	

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

2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований.

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

Таблица 12 - Морфологическая матрица

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

Возможные варианты решения технической задачи:

- А1Б2В2Г3Д1Е1Ж2 – в данном решении происходит визуализация результатов посредством графиков, значения которых приведены в таблицах в виде трех поражающих факторов, длительность расчетов 40 минут, язык русский, алгоритм расчета используется SIMPLE в данном случае применение в газовой сфере.
- А3Б3В1Г1Д1Е1Ж1 – в данном решении происходит визуализация результатов посредством таблиц, процесс описывается графиками, задается два поражающих фактора, длительность расчетов в данном случае 20 минут, язык интерфейса русский, алгоритм расчета SIMPLE, в данном случае применение в нефтяной сфере.

3. Планирование научно-исследовательских работ

3.1. Структура работы в рамках научного исследования

Таблица 13- Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

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

3.2. Определение трудоемкости выполнения работы

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5} \quad (27)$$

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

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

$t_{\text{max}i}$ – 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, 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 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} \quad (28)$$

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.

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:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (29)$$

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:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (30)$$

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

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

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

Согласно данным производственного и налогового календаря на 2016 год, количество календарных дней составляет 366 дней, количество рабочих дней составляет 246 дней, количество выходных – 105 дней, а количество праздничных дней – 15, таким образом: $k_{\text{кал}} = 1,48$.

Таблица 14 - Временные показатели проведения научного исследования.

Название работы	Трудоемкость работ									Испол- нители	Длитель- ность работ в рабочих днях			Длитель- ность работ в календар- ных днях		
	t _{min} , чел-дни			t _{max} , чел-дни			t _{ожи} , чел-дни									
	И с п . 1	И с п . 2	И с п . 3	И с п . 1	И с п . 2	И с п . 3	И с п . 1	И с п . 2	И с п . 3		И с п . 1	И с п . 2	И с п . 3	И с п . 1	И с п . 2	И с п . 3
Составление и утверждение темы проекта	3	3	3	7	7	7	4, 6	4, 6	4, 6	Руково- дитель	4, 6	4, 6	4, 6	6,9	6,9	6,9
Анализ актуальности темы	2	2	2	5	5	5	3, 2	3, 2	3, 2	Студент	3, 2	3, 2	3, 2	4,8	4,8	4,8
Поиск и изучение материала по теме	15	15	15	30	30	30	21	21	21	Студент	21	21	21	31, 5	31, 5	31, 5
Выбор направления исследований	2	2	2	5	5	5	3, 2	3, 2	3, 2	Руково- дитель, Студент	1, 6	1, 6	1, 6	2,4	2,4	2,4
Изучение литературы по теме	20	20	20	30	30	30	36	36	36	Студент	36	36	36	54	54	54
Подбор нормативных документов	15	15	15	25	25	25	19	19	19	Студент	19	19	19	28, 5	28, 5	28, 5
Изучение программ «Fire» и «MatLab»	10	10	10	20	20	20	14	14	14	Студент	14	14	14	21	21	21
Моделирование зон зажигания растительного покрова под действием теплового излучения огненного шара	23	30	35	30	35	37	28 ,8	32	36	Студент	28 ,8	32	37	43, 2	48	52
Изучение результатов	10	12	14	15	18	21	12	14 ,4	16	Студент	12	14 ,4	16	18	21, 6	24
Проведение расчетов по теме	17	24	30	25	30	35	20 ,2	26 ,4	31 ,6	Студент	20 ,2	26 ,4	32 ,2	30, 3	39, 6	48, 8
Анализ результатов	2	5	7	5	7	9	3, 2	5, 8	7, 4	Студент	3, 2	5, 8	7, 4	4,8	8,7	10, 2
Вывод по цели	1	2	3	3	4	5	1, 8	2, 8	3, 8	Студент	1, 8	2, 8	3, 8	2,7	4,2	5,8

На основании таблицы 14 строим календарный план-график.

Таблица 15- Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ ра- бот	Вид работ	Исполни- тели	Т _{кi} , кал · дн.	Продолжительность выполнения работ								
				Март			Апрель			Май		
				1	2	1	2	1	2	1	2	3
1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководи- тель	7									
2	Выдача задания по тематике проекта	Научный руководи- тель	2									
3	Постановка задачи	Научный руководи- тель	2									
4	Определение этапов и сроков разработки проекта	Научный руководи- тель, студент	3									
5	Поиск литературы по теме	Студент	13									
6	Изучение литературы и программ «Fire» и «MatLab»	Студент	15									
7	Поиск нормативных документов по данной теме	Студент	5									
8	Моделирование зон зажигания	Студент	16									
9	Проведение расчетов и изучение результатов	Студент	16									
10	Согласование полученных данных с научным руководителем	Научный руководи- тель, студент	5									
11	Оценка	Студент	4									

	эффективности полученных результатов											
12	Работа над выводами по проекту	Студент	2									
13	Составление пояснительной записки к работе	Студент	6									



руководитель



студент

3.4. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

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

3.4.1. Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi} \quad (31)$$

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

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, 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.

Таблица 16- Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы, (Зм), руб.		
		Исп. 1	Исп.2	Исп. 3	Исп .1	Исп .2	Исп .3	Исп .1	Исп .2	Исп .3
Бумага	лист	110	135	150	2,5	2,5	2,5	316,	388,	415,

								25	13	75
Краска для принтерных картриджей	шт.	1	1	1	125 0	125 0	125 0	143 7,5	143 7,5	143 7,5
Интернет	М/бит	100	110	120	1	1	1	115	126, 5	137
Книги с дополнительной литературой	шт.	2	3	5	450	480	520	517, 5	552	587
Ручки	шт.	1	1	1	10	10	10	11,5	11,5	11,5
Тетради	шт.	1	1	1	10	10	10	34	34	34
Итого		215	251	278	172 3,5	175 3,5	175 3,5	243 1,75	254 9,7	262 2,75

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

Таблица 17- 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.	Программа «Fire»	1	1	1	1500	1500	1500	1501	1501	1501
2.	Программа «MatLab»	1	1	1	2500	2500	2500	2501	2501	2501
Итого								5002	5002	5002

3.4.3. Основная заработная плата исполнителей темы

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

от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл.18.

Таблица 18 - Расчет основной заработной платы

№ п/ п	Наименование этапов	Исполнитель и по категориям	Трудо- емкость, чел.- дн.			Заработная плата, прихо- дящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего зара- ботная 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	4,6			3,6			16,56		
2.	Анализ актуальности темы	Студент	3,2			0,8			2,56		
3.	Поиск и изучение материала по теме	Студент	21			0,8			16,8		
4.	Выбор направления исследований	Руководитель Студент	1,6			4,4			5,76	1,28	1,28
5.	Изучение литературы по теме	Студент	36			0,8			28,8		
6.	Подбор нормативных документов	Студент	19			0,8			15,2		
7.	Изучение программ «Fire» и «MatLab»	Студент	14			0,8			11,2		
8.	Моделирование зон зажигания растительного покрова под действием теплового излучения огненного шара	Студент	28,8	26,4		0,8			23,04	21,12	19,4

9.	Изучение результатов	Студент	12	14,4	0,8	9,6	11,52	11,52
10.	Проведение расчетов по теме	Студент	20,2	26,4	0,8	16,16	21,12	19,4
11.	Анализ результатов	Студент	3,2	5,8	0,8	2,56	4,64	2,56
12.	Вывод по цели	Студент	1,8	2,8	0,8	1,44	2,24	1,44
Итого:						148,68	153,04	146,72

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).

$$Z_{\text{зн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (32)$$

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

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

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

Основная заработная плата работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

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

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (33)$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. ;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (34)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

при отпуске в 72 раб. дней $M=9,6$.

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 17).

Таблица 19- Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней	120	120
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48	72
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	198	174

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p \quad (35)$$

где Z_{tc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от Z_{tc});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от Z_{tc});

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

Таблица 20 - Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_{tc} , руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	Тр.раб. дн.			$Z_{осн.руб.}$		
					Ис п.1	Ис п.2	Ис п.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель	25000	1,3	58500	3072,73	11	12	13	33800	36872, 76	39944
Студент	15000	1,3	35100	1936,55	47	48	49	91017, 85	92954, 4	94890, 95
Итого:								124817 ,85	129827 ,16	134834 ,95

3.4.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{доп} = \kappa_{доп} \cdot З_{осн}, \quad (36)$$

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

Таблица 21- Затраты на дополнительную заработную плату

Исполнители	Основная зарплата(руб.)			Коэффициент дополнительной заработной платы ($\kappa_{доп}$)	Дополнительная зарплата(руб.)		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Руководитель	33800	36872,76	39944	0,12	4056	4424,73	4793,28
Студент	91017,85	92954,4	94890,95	0,12	10922,14	11154,53	11386,91
Итого:					14978,14	15579,26	16180,2

3.4.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = \kappa_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (37)$$

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

На 2015 г. в соответствии с Федеральным закона 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 22- 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	26784	30802	36784	4464	4018	4164
Студент-дипломник	126360	145314	226360	15163	48954	19163
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	27,1%					
Итого:						
Исполнение 1	31248 руб.					
Исполнение 2	34820 руб.					
Исполнение 3	40948 руб.					

3.4.5. Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (38)$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Таким образом, наибольшие накладные расходы при первом исполнении равны: $З_{\text{накл}} = 2431,75 \cdot 0,16 = 389,08$ руб.

При втором исполнении: $З_{\text{накл}} = 2549,7 \cdot 0,16 = 407,95$ руб.

При третьем исполнении: $З_{\text{накл}} = 2622,75 \cdot 0,16 = 419,64$ руб

3.4.6. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Таблица 23- Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
Материальные затраты НТИ	2431,75	2549,7	2622,75	Пункт 3.4.1
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	5002	5002	5002	Пункт 3.4.2
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	124817,8	129827,1	134834,9	Пункт 3.4.3

	5	6	5	
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	14978,14	15579,26	16180,2	Пункт 3.4.4
Отчисления во внебюджетные фонды	31248	34820	40948	Пункт 3.4.5
Накладные расходы	38908	40795	41964	16 % от суммы ст. 1-5
Бюджет затрат НТИ	217385,7 4	228573,1 2	241551,8 5	Сумма ст. 1- 6

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:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (39)$$

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

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

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

Для первого варианта исполнения $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = 124817,85/140000 = 0,9$;

Для второго варианта исполнения $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = 129827,16/140000 = 0,93$;

Для третьего варианта исполнения $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = 134834,95/140000 = 0,96$.

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

$$I_{pi} = \sum a^i \cdot b^i, \quad (40)$$

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 – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проводим в форме таблицы (табл. 24).

Таблица 24- Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой ко- эффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1. Способствует росту производи- тельности труда пользователя	0,1	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	3	4
3. Ремонтопригодность	0,15	4	3	3
4. Энергосбережение	0,20	4	4	3
5. Надежность	0,15	4	4	4
6. Пусковой период	0,1	5	3	4
7. Материалоемкость	0,15	4	4	5
ИТОГО	1	4,2	3,5	3,8

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

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

$$I_{p-исп3} = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 = 3,8$$

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

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}} \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр}} \quad \text{и т.д.}$$

Для первого варианта исполнения $I_{исп.} = 4,2/0,9 = 4,7$;

Для второго варианта исполнения $I_{исп.} = 3,5/0,93 = 3,8$;

Для третьего варианта исполнения $I_{исп.} = 3,8/0,96 = 4$.

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.23) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{ср}$):

Для первого варианта исполнения $\mathcal{E}_{ср} = 4,7/3,8 = 1,2$;

Для второго варианта исполнения $\mathcal{E}_{ср} = 3,8/4 = 0,95$;

Для третьего варианта исполнения $\mathcal{E}_{ср} = 4/4,7 = 0,85$.

Таблица 25- Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,9	0,93	0,96
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,2	3,5	3,8
3	Интегральный показатель эффективности	4,7	3,8	4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,2	0,95	0,85

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. Раздел «Социальная ответственность»

Введение

В данной выпускной квалификационной работе «Математическое моделирование возникновения лесных пожаров в результате аварийного разрыва трубопровода» будет изучено, с помощью проектирования в программе «Fire», влияние воздействия огненного шара на близлежащий растительный покров и условия возникновения лесных пожаров в результате этой ЧС.

В этом разделе выпускной квалификационной работы будут рассмотрены вредные и опасные производственные факторы при аварийном разрыве магистрального трубопровода, действующие на пожарного или группу пожарных, которые будут проводить работы по ликвидации этой ЧС. А так же экологическая безопасность и правовые, организационные вопросы обеспечения безопасности.

2. Производственная безопасность

Опасные и вредные факторы при тушении пожаров в результате аварийного разрыва трубопровода

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
• Тушение лесного пожара • Разбор разрушившихся конструкций	• Токсичные вещества и материалы, вышедшие из разрушенных трубопроводов; • Повышенная температура окружающей среды; • Токсичные продукты	• Осколки, части разрушившихся установок и конструкций; • Пламя и искры	• СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования». • СНиП III-42-80* «Магистральные трубопроводы. Правила производства и приёмки работ». • ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные факторы».

	горения и термического разложения; • Пониженная концентрация кислорода • Огнетушащие вещества		• ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность». • ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны». • ПБ 03-576-2003. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.
--	---	--	---

1.1 Анализ опасных производственных факторов

К опасным факторам пожара, воздействие которых приводит к травмам, отравлениям или гибели людей относятся:

- Пламя и искры;
- Осколки, части разрушившихся установок и конструкций.

Пламя и искры

Горение всех жидких, газообразных и большинства твердых горючих веществ, которые, разлагаясь или испаряясь, выделяют газообразные продукты, сопровождается образованием пламени. Таким образом, пламя представляет собой газовый объем, в котором происходит процесс горения паров и газов.

Пламя бывает светящимся и несветящимся. Свечение пламени при горении органических веществ зависит от наличия в нем раскаленных твердых частиц углерода, которые успевают сгорать. Несветящееся (синее) пламя обычно бывает при сгорании газообразных продуктов: окиси углерода, водорода, метана, аммиака, сероводорода.

Температура пламени при горении на воздухе древесины составляет - 850-1400°C, нефтепродуктов в резервуаре - 1100-1300°C. Все тепло в процессе горения выделяется из пламени. Часть этого тепла расходуется на нагревание

продуктов горения и становится источником для поддержания дальнейшего горения. Вторая часть его уносится в пространство в виде тепловых лучей, которые нагревают окружающие предметы, а некоторые из них - даже поджигают.

Открытый огонь очень опасен, т.к. воздействие пламени на тело человека вызывает ожоги. Еще большую опасность представляет тепловое излучение огня, которое может вызвать ожоги тела, глаз и др. При горении технологических установок интенсивность излучения тепла настолько велика, что человек без специальных средств защиты подойти к ним ближе, чем на 10 м, не может. Температурный порог жизнеспособности тканей человека составляет 70°C. В качестве средств защиты от пламени и искр необходимо использовать огнестойкую одежду.

Осколки, части разрушившихся установок и конструкций:

Разрушение конструкций и установок происходит вследствие потери ими несущей способности под воздействием высоких температур и взрывов. При этом люди могут получить значительные механические травмы, оказаться под обломками завалившихся конструкций.

1.2 Анализ вредных производственных факторов

К вредным факторам пожара относятся:

- Повышенная температура окружающей среды;
- Токсичные продукты горения и термического разложения;
- Пониженная концентрация кислорода
- Токсичные вещества и материалы, вышедшие из разрушенных трубопроводов;
- Огнетушащие вещества.

Повышенная температура окружающей среды

В результате аварийного разрыва трубопровода, происходит возгорание нефте- и газопродуктов и образование огненного шара, который зажигает близлежащий растительный покров. Тепловая энергия, выделяемая в ходе

реакции горения лесного массива и огненного шара, способствует повышению температуры окружающей среды.

Повышенная температура окружающей среды приводит к нарушению теплового режима тела человека, вызывает перегрев, ухудшение самочувствия из-за интенсивного выведения необходимых организму солей, нарушения ритма дыхания, деятельности сердца и сосудов. Необходимо избегать длительного облучения инфракрасными лучами интенсивностью около 540 Вт/м. Вдыхание нагретого воздуха приводит к поражению и некрозу верхних дыхательных путей, удушью и смерти человека. При воздействии температуры свыше 100°C человек теряет сознание и гибнет через несколько минут. Опасны для человека ожоги кожи. Несмотря на большие успехи медицины в их лечении, у пострадавшего, получившего ожоги второй степени на 30% поверхности тела, мало шансов выжить. Время же, за которое человек получает ожоги второй степени, невелико: при температуре среды 71°C - 26 сек., 15 сек. - при 100°C. Исследованиями установлено, что во влажной атмосфере, типичной для пожара, вторую степень ожога вызывает температура значительно ниже указанной. Таким образом, температура окружающей среды 60-70°C опасна для жизни человека. В качестве средств защиты личного состава применяют изолирующие противогазы и термостойкие и теплоотражательные костюмы.

Токсичные продукты горения и термическое разложение

В зависимости от того, каким количеством кислорода окисляется горючее вещество, различают два вида горения: полное и неполное. При наличии достаточного количества кислорода происходит полное горение. При этом основным продуктом горения является углекислый газ, неспособный к дальнейшему горению. Если же кислорода не хватает, происходит неполное сгорание, основным продуктом которого является окись углерода, или так называемый угарный газ. Окись углерода способна гореть и в соединении с воздухом образовывать взрывчатые смеси. Кроме того, она обладает отравляющими свойствами. Большую опасность для жизни людей

представляют дымовые газы. Так, диоксид углерода CO_2 в концентрации 3-4,5% становится опасным для жизни при вдыхании в течение нескольких минут. Основным механизмом токсического воздействия CO_2 на человека является блокирование гемоглобина крови, при этом нарушается поступление кислорода из легких в ткани, что приводит к кислородному голоданию. Человек теряет способность рассуждать, становится равнодушным, не стремится избежать опасности, у него наступает оцепенение, головокружение, депрессия, нарушение координации движений, а при остановке дыхания - смерть. Токсичные продукты горения: CO , CO_2 , NH_3 , Br_2 , Cl_2 , COCl_2 , HCN , H_2S , SO_2 , HCl , HBr , HF , COF_2 , CH_3Cl , $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$, HCON , CH_3CON и т.д. Их токсичное действие увеличивается при понижении концентрации O_2 в атмосфере.

Прежде всего выделяется большое количество оксида углерода, углекислого газа, оксидов азота, которые насыщают окружающее пространство, в котором происходит горение, и создают опасные для жизни человека концентрации. Для углекислого газа не более 0.11 кг/м^3 , через 4 часа – падение давления и смерть. Для оксида углерода концентрация в воздухе не более $1.16 \times 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, вдыхание в составе воздушной смеси в течении 5-10 минут - смертельно. В качестве средств защиты личного состава применяют изолирующие противогазы (КИП-7 и КИП -8).

Пониженная концентрация кислорода

Чаще всего люди на пожарах гибнут не от огня и высокой температуры, а из-за понижения концентрации кислорода в воздухе. В обычных условиях человек дышит атмосферным воздухом с содержанием кислорода 20,9%. В условиях пожара при сгорании веществ и материалов уровень кислорода в воздухе уменьшается. Содержание кислорода в начальной стадии пожара снижается до 16 %, в то время как уже при 17 % происходят ухудшение двигательных функций, нарушение мускульной координации, затруднение мышления и притупление внимания. Концентрация кислорода должна быть не

менее 15%. В качестве средств защиты личного состава применяют изолирующие противогазы (КИП-8 и КИП-7).

Токсичные вещества и материалы, вышедшие из разрушенных трубопроводов

Магистральные трубопроводы предназначены для транспортировки товарной нефти и нефтепродуктов (в том числе стабильного конденсата и бензина) из районов их добычи (от промыслов) производства или хранения до мест потребления (нефтебаз, перевалочных баз, пунктов налива в цистерны, нефтеналивных терминалов, отдельных промышленных предприятий и НПЗ). Пары нефтепродуктов высокотоксичны, они оказывают отравляющее действие на организм человека, особенно токсичны пары сернистых, а также этилированных бензинов.

Огнетушащие вещества

Наряду с огнетушащей способностью важнейшей характеристикой огнетушащих газов и аэрозолей считается токсичность (степень химической вредности), или в более широком представлении - токсическая опасность, зависящая в условиях пожаротушения от физико-химических свойств и биологической активности применяемых веществ, их количества, времени контакта с пламенем или нагретыми поверхностями, продолжительности воздействия на биообъект и других факторов. Само воздействие огнетушащих веществ на человека в этих условиях следует рассматривать, прежде всего как экстремальное, как характерный для аварийной ситуации внезапный, интенсивный и кратковременный химический удар.

2. Экологическая безопасность

Экологическая безопасность (ЭБ) — допустимый уровень негативного воздействия природных и антропогенных факторов экологической опасности на окружающую среду и человека.

Пожары оказывают существенное влияние на окружающую среду, загрязняя ее продуктами горения, пиролиза, несгоревшими горючими

веществами, огнетушащими средствами. Но если причиняемые пожарами материальный ущерб и социальные потери (погибшие и пострадавшие люди), как правило, известны сразу после пожара, то экологический ущерб имеет не только текущие, но и отдаленные последствия для человечества и экосистемы. Рассмотрим некоторые процессы:

Загрязнение воды

При тушении пожара, вода, соприкасаясь с раскаленными веществами, превращается в пар. И пар, и вода насыщаются отравляющими веществами. Пар попадает в атмосферу и дополнительно участвует в круговороте веществ между сушей и океаном, выпадая в виде кислотных дождей и снега. Вода атмосферных осадков с места пожаров в конечном итоге попадает в озера, моря, проникает в почву и долгое время сохраняется в биосфере.

Сгорание воздуха при пожаре

Процесс горения любого вещества сопровождается не только выбросом в атмосферу раскаленных продуктов сгорания и тепловым излучением, но и потреблением значительных объемов воздуха. При сгорании 1 м³ природного газа расходуется 5 м³ воздуха; 1 кг древесины - 4,2 м³; 1 кг соломы - 4,6 м³; 1 кг каменного угля - 8 м³ воздуха. А объем продуктов сгорания значительно превышает эти показатели.

Таким образом, в огне сгорают значительные объемы кислорода, создавая опасность для жизни людей в случае понижения в зоне пожара концентрации кислорода (менее 16 %), которая в случае массовых пожаров может понизиться до 10, а иногда до 6%.

Токсичность продуктов сгорания

В отличие от многих других процессов горения при пожарах нельзя предотвратить или снизить уровень поступающих в окружающую среду опасных веществ. Согласно статистике, в нашей стране ежегодно сгорает около 10 тыс. тонн токсичных веществ, которые выбрасываются в атмосферу.

Пожарные подвергаются, так называемому накапливаемому отравлению, небольшие дозы отравляющих веществ, регулярно получаемые

ими во время ликвидации пожаров, в конечном итоге приводят к тому, что пожарные приобретают профессиональные заболевания легких, желудочно-кишечного тракта, онкологические заболевания. Таким образом, пожары представляют экологическую опасность для всех живых организмов и, прежде всего, для людей.

3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Раздел ВКР «Социальная ответственность» рассматриваем в условиях ЧС, поэтому п.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях рассматривать нецелесообразно.

4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

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

- СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования».
- СНиП III-42-80* «Магистральные трубопроводы. Правила производства и приёмки работ».
- РД 09-364-00 «Типовая инструкция по организации безопасного проведения огневых работ на взрывоопасных взрывопожароопасных объектах»;
- РД 153-39.4-113-01 «Нормы технологического проектирования магистральных трубопроводов».

4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

- Магистральные трубопроводы следует прокладывать подземно (подземная прокладка). Прокладка трубопроводов по поверхности земли в насыпи (наземная прокладка) или на опорах (надземная прокладка) допускается только как исключение. При этом должны предусматриваться специальные мероприятия, обеспечивающие надежную и безопасную эксплуатацию трубопроводов.

- Прокладка трубопроводов может осуществляться одиночно или параллельно другим действующим или проектируемым магистральным трубопроводам — в техническом коридоре.

- Под техническим коридором магистральных трубопроводов надлежит понимать систему параллельно проложенных трубопроводов по одной трассе, предназначенных для транспортирования нефти (нефтепродукта, в том числе сжиженных углеводородных газов) или газа (газового конденсата) .

- Предельно допустимые (суммарные) объемы транспортирования продуктов в пределах одного технического коридора и расстояния между этими коридорами определяются согласно строительным нормам и правилам, утвержденным в установленном порядке.

- Не допускается прокладка магистральных трубопроводов по территориям населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий, аэродромов, железнодорожных станций, морских и речных портов, пристаней и других аналогичных объектов.

- Для обеспечения нормальных условий эксплуатации и исключения возможности повреждения магистральных трубопроводов и их объектов вокруг них устанавливаются охранные зоны, размеры которых и порядок производства в этих зонах сельскохозяйственных и других работ регламентируются Правилами охраны магистральных трубопроводов.

- Температура газа, нефти (нефтепродуктов), поступающих в трубопровод, должна устанавливаться исходя из возможности транспортирования продукта и требований, предъявляемых к сохранности изоляционных покрытий, прочности, устойчивости и надежности трубопровода.

- Необходимость и степень охлаждения транспортируемого продукта решается при проектировании.

- Трубопроводы и их сооружения следует проектировать с учетом максимальной индустриализации строительно-монтажных работ за счет применения, как правило, труб с заводской изоляцией и сборных конструкций

в блочно-комплектном исполнении из стандартных и типовых элементов и деталей, изготовленных на заводах или в стационарных условиях, обеспечивающих качественное их изготовление. При этом принятые в проекте решения должны обеспечивать бесперебойную и безопасную эксплуатацию трубопроводов.

Заключение

- Построена математической модели аварийных ситуаций связанных с разрывом трубопроводов и возникновением пожаров под действием излучения с образованием огненных шаров;
- разработана методики численных расчетов;
- получены результатов расчетов.

При выполнении расчетов в данной работе изучалось влияние определенных факторов на процесс действия теплового излучения от огненных шаров, возникающих при аварии на магистральных трубопроводах, на подстилающую поверхность. Полученные результаты позволяют узнать критические условия распространения пожара, то есть зависимость радиуса загорания от массы разлившегося горючего вещества и влагосодержания, что, в свою очередь, дает возможность применять такой метод расчетов для профилактики и разработки более быстрого предотвращения аварий на данных объектах.

Список использованных источников:

1. Википедия – свободная энциклопедия
https://ru.wikipedia.org/wiki/Магистральные_трубопроводы
2. Распоряжение Правительства РФ от 13.08.2013 N 1416-р (ред. от 15.05.2014) «Об утверждении схемы территориального планирования Российской Федерации в области федерального транспорта (в части трубопроводного транспорта)».
3. Федеральный закон от 21 июля 1997 г. N 116-ФЗ О промышленной безопасности опасных производственных объектов (с изменениями от 7 августа 2000 г., 10 января 2003 г., 22 августа 2004 г., 9 мая 2005 г., 18 декабря 2006 г., 30 декабря 2008 г.).
4. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs: International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials San Francisco, California September 28 - October 1, 1999/ William E. Martinsen and Jeffrey D. Marx 1999
5. Прогнозирование опасности поражения человека тепловым излучением огненного шара при пожарах на химических и нефтехимических предприятиях: Автореферат / Хайруллин И.Р.– 2008. – 20с.
6. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии: Вычислительные технологии Том № 2. / Гришин А.М., Перминов В.А. — ТГУ, 1997. – 11с.
7. Гришин А.М., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов в результате взрыва тунгусского метеорита. В «Физика горения и взрыва» 32, №2, 1996
8. Unsteady burning of unconfined fuel vapour clouds: Sixteenth Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, J. A. Fay, D. H. Lewis. – PA, 1976, pp. 1397–1405

9. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface//Physics fluids: Harlow F.H., Welch J.B. - 1965.- №8.- P.2182-2189.
10. Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости: Патанкар С.В. - М.: Энергоатомиздат, 1984.-152с.
11. Математическое моделирование экологических последствий массовых лесных пожаров: Материалы международной научной конференции, – Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия 10.07 - 15.07. / Перминов В.А. — Томск: Изд. – во ТГУ, 1999.-С.56 – 58.
12. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources: Proc. Roy. Soc., / B. R. Morton, G. I. Taylor, J. S. Turner. - 1956, v. 234, No. 1196, pp. 1–23.