

Школа Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
 НОЦ И.Н. Бутакова

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование тепломассопереноса при воспламенении типичного лесного горючего материала в высокотемпературной среде

УДК 66.021.3/4:630.432:536.45

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б5Б	Кириенко Виктория Андреевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Барановский Н.В	к.ф.- м.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Сотникова А.А	—		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель профиля ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника	Антонова А.М	к.т.н		

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе на <i>иностранном</i> языке, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты комплексной инженерной деятельности.
P2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач
P3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов
P4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
P5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению</i> в течение всей жизни, непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности в <i>широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
P8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых</i> и <i>специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования
P9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением базовых и специальных знаний, современных методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений
P10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных

	публикаций с применением <i>базовых</i> и <i>специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.
P11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами, использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений
<i>Специальные профессиональные</i>	
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

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

Подразделение: Инженерная школа энергетики
Отделение: НОЦ И. Н. Бугакова
Направление: 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ А.М. Антонова
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Б5Б	Кириенко Виктории Андреевне

Тема работы:

Исследование тепломассопереноса при воспламенении типичного лесного горючего материала в высокотемпературной среде

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№751/с от 01.02.2019

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 материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объект исследования – лист березы. Требования к продукту – математическая модель тепломассопереноса в типичном лесном горючем материале, находящемся в высокотемпературной среде, с учетом структурной неоднородности образца. Исходные данные: теплофизические свойства листа и характеристики среды.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки в рассматриваемой области. Математическое моделирование теплопереноса в листе березы, находящемся в высокотемпературной среде, с учетом структурной неоднородности листа. Обсуждение результатов исследования. Экспериментальное исследование зажигания, находящегося в высокотемпературной среде. Формулировка выводов и заключения.</p>
--	--

<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Основной раздел	Барановский Н.В
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Подопригора И.В
Социальная ответственность	Сотникова А.А

<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>
<p>Введение, Обзор литературы, Объект и методы исследования, Результаты исследования, Заключение (русский)</p>

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Барановский Н.В	к.ф.- м.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б5Б	Кириенко Виктория Андреевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 166 с., 37 рис., 19 табл., 91 источников.

Ключевые слова: лесной пожар, лесной горючий материал, зажигание, математическая модель, тепломассоперенос, эксперимент, пиролиз.

Объектом исследования является процесс тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала (листе березы).

Цель работы – исследование процесса тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала, подверженного воздействию высокотемпературной среды для физического обоснования новых подходов к классификации лесных горючих материалов.

В процессе исследования проводилось численное и экспериментальное моделирование процесса тепломассопереноса в неоднородном по структуре листе березы.

Основные технологические характеристики: программные реализации математических моделей разработаны с использованием языка программирования высокого уровня Pascal.

Степень внедрения: результаты работы внедрены в учебный процесс, использованы при проведении НИР РФФИ № 16-41-700831.

Область применения: полученные экспериментальные данные и разработанные модели могут стать базой для разработки теоретических основ классификации лесных горючих материалов.

Экономическая значимость работы заключается в том, что результаты исследования могут быть использованы для усовершенствования уже существующих или создания новых систем прогноза пожарной опасности, применение которых позволит снизить ущерб от лесных пожаров.

В будущем планируется разработать математические модели тепломассопереноса с учетом испарения влаги и термического разложения сухого органического вещества.

Оглавление

Введение	10
1 Современное состояние области исследований	12
1.1 Характеристика лесных пожаров	12
1.2 Характеристика лесных горючих материалов	16
1.3 Сушка лесных горючих материалов.....	21
1.4 Термическое разложение лесного горючего материала	31
1.5 Зажигание лесных горючих материалов	37
1.6 Горение лесных горючих материалов	43
1.7 Системы и методы прогноза лесной пожарной опасности	48
1.8 Выводы по результатам обзора литературы	53
2 Объект и методы исследования	55
2.1 Объект исследования.....	55
2.2 Метод конечных разностей.....	56
2.3 Методика проведения эксперимента.....	60
3 Результаты исследования.....	62
3.1 Экспериментальное исследование зажигания ЛГМ высокотемпературной средой.....	62
3.2 Математическое моделирование теплопереноса в структурно неоднородном элементе ЛГМ.....	65
3.2.1 Одномерная математическая модель с тремя слоями в структуре листа.....	65
3.2.2 Двумерная математическая модель с тремя слоями в структуре листа.....	74
3.2.3 Двумерная математическая модель с тремя слоями в структуре листа и учетом локализации устьиц	86

3.2.4 Одномерная математическая модель с тремя слоями в структуре листа и пиролиза.....	109
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .	119
4.1 Оценка конкурентоспособности разработки	120
4.2 SWOT-анализ разработки	122
4.3 Планирование научно-исследовательских работ.....	125
4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования	125
4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ	127
4.3.3 Бюджет затрат на проектирование	132
4.3.3.1 Расчет материальных затрат проекта.....	132
4.3.3.2 Расчет затрат на амортизацию специального оборудования для научных (экспериментальных) работ	133
4.3.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	136
4.3.3.4 Накладные расходы	137
4.3.3.5 Формирование затрат на проектирование	138
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	139
4.5 Заключение по разделу	141
5 Социальная ответственность	143
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	144
5.2 Производственная безопасность.....	145
5.2.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов	146
5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия	150

5.3 Экологическая безопасность проекта.....	153
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Пожар – как источник ЧС	154
5.5 Заключение по разделу	154
Заключение.....	156
Список использованных источников.....	157

Введение

Проблема возникновения, мониторинга и предотвращения лесных пожаров остается актуальной и острой на протяжении долгого времени. Общая площадь Земли, покрытая лесом, составляет около 3 866 млн. гектаров, что занимает около одной трети поверхности суши. Под лесом понимается совокупность земли, древесной, кустарниковой, травянистой растительности, а также различных организмов, находящихся во взаимосвязи и влияющих друг на друга в своем развитии. Лесные экосистемы – поставщики экологических ресурсов для всего живого, источники экономически ценных продуктов [1]. Так, деревья поддерживают атмосферный воздух в пригодном для живых организмов состоянии, леса синтезируют почти 2/3 органической массы на суше и около 1/2 всей органической массы Земли [2]. Без лесов невозможно гармоничное существование планеты в целом. Поэтому лесные пожары – огромная опасность для всего живого.

По статистике, каждые 5 секунд на планете регистрируется пожар. Среднегодовое число пожаров достигает 5.5 миллионов [2]. Нельзя не отметить, что такое количество возгораний несёт за собой огромные потери различного плана: людские, экономические, сокращение лесных ресурсов, разрушение биогеоценозов и т.д. [3-5]. Лесные пожары стали обыденностью для многих стран с большими лесными массивами, такими как Россия, США, Канада, Португалия, Франция, Греция, Турция, Австралия, Чили, Перу, Аргентина. Так, по данным российской статистики, лесные пожары уничтожили 70 млн. куб. м древесины (2002 г) и около 700 тыс. гектаров лесных насаждений (2000 г), 800 тыс. гектаров лесов (2009 г.) [3]. Реальный же ущерб от лесных пожаров значительно превышает статистические показатели [3, 4.] Несмотря на огромные потери, леса России составляют 22 % лесов мира, по-прежнему не утратили своей значимости, имеют экономическое и глобальное экологическое значение [5]. Значит, сохранение

и воспроизводство лесных массивов России является национальной и общечеловеческой задачей. Поэтому борьбе с лесными пожарами и уделяется пристальное внимание со стороны мирового научного сообщества.

Таким образом, для обеспечения нормального дальнейшего функционирования многих биogeоценозов и планеты в целом необходимо проводить исследования по решению проблемы лесных пожаров. Многие исследовательские группы по всему миру трудятся над разработкой различных схем мониторинга и тушения лесных пожаров, проводят математические и физические эксперименты для изучения влияния внешних условий и типа лесного массива на процесс пожара. Полученные данные уже нашли применение для борьбы со стихийным бедствием. Однако, необходима дальнейшая работа, обобщающая уже известные данные по тематике и заполняющая существующие «ниши» в исследованиях. Ведь, только получив полную картину особенностей лесных пожаров, можно эффективно противостоять им.

Следует отметить, что основа эффективной технологии предупреждения лесных пожаров – это методы их прогнозирования. Но прогнозирование лесных пожаров невозможно без физически обоснованных систем классификации лесных горючих материалов.

Цель данного исследования – численное и экспериментальное изучение тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала (лист покрытосеменных древесных растений) при воздействии высокотемпературной среды для физического обоснования новых подходов к классификации лесных горючих материалов.

1 Современное состояние области исследований

1.1 Характеристика лесных пожаров

Под лесным пожаром понимается неуправляемое (стихийное) горение, распространяющееся по площади лесного массива [1]. Такое неконтролируемое горение наносит колоссальный вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства. Данному стихийному бедствию, как правило, предшествует ряд предпосылок, которые суммируются и усиливаются различными техническими, организационными, хозяйственными факторами. К ключевым таким факторам и предпосылкам можно отнести рельеф местности, тип лесного массива, погодные условия, влажность, ветер и т.д. [7-10]. Источники лесных пожаров могут быть природного (молнии, самовозгорание) или антропогенного (неосторожное отношение, умышленный поджог, выжигание леса под пастбища или пашни) происхождения. Стоит также заметить, что более 90 % пожаров происходит из-за деятельности человека.

Существует развернутая классификация лесных пожаров. Пожары, принято разделять на низовые, верховые, подземные (торфяные, почвенные). Также каждый из этих видов пожаров может быть устойчивым и беглым. Рассмотрим особенности каждого вида пожаров [1, 6, 10]:

1. Низовой пожар – вид пожара, для которого характерно вытянутое поле пожарища с неровной кромкой. Дым, как правило, светло-серого цвета. Скорость распространения по ветру превышает в 6-10 раз скорость распространения против ветра. Активное распространение наблюдается в дневное время суток. Пример низового пожара представлен на рисунке 1.

1.1. Устойчивый низовой пожар влечет за собой полное сгорание напочвенного покрова, валежника и лесной подстилки, обгорают корни и кора деревьев. Минимальная скорость пламенного горения 0,2м/мин. В среднем скорость пламенного горения варьируется от нескольких метров до 180м/ч. По высоте горения кромки низовые пожары могут быть слабыми (с высотой пламени до 0,5 м), средними (пламя высотой 1,5 м) и сильными

(пламя имеет высоту более 1,5м). Как правило, такие пожары характерны в середине лета.

1.2. Беглый низовой пожар поражает живой и мертвый напочвенный покров, самосев леса, подлесок. В среднем сгорает 2-3 см лесной подстилки. Скорость распространения пожара составляет 180-300 м/ч. Характерной особенностью этого вида пожара является то, что участки с повышенной влажностью остаются нетронутыми при распространении пламени. Площадь поражения имеет пятнистую структуру.



Рисунок 1 – Типичная картина низового лесного пожара [6]

2. Верховой пожар – стадия лесного пожара, следующая за низовой. Пламя поражает кроны деревьев (хвою, листья, ветви). Форма площади пожарища вытянута по направлению ветра. Для этого пожара характерен дым темного цвета. При таком пожаре выделяется большое количество теплоты, что ведет к образованию конвективных колонок диаметром в несколько сотен метров с высотой пламени в центре 100-120 метров. Поступательное движение таких колонок совпадает с продвижением фронта пожара. Наиболее часто верховой пожар возникает в периоды засухи и сильных ветров. Типичный верховой пожар представлен на рисунке 2.

2.1 Устойчивый (повальный) верховой пожар происходит из низового при сильном ветре, а также в том случае, если для древостоя характерны низко опущенные кроны. После пожара древостой полностью погибает. Скорость распространения составляет 30-1500 м/ч.

2.2 Беглый верховой пожар распространяется по кронам деревьев «скачками» и опережает фронт низового пожара. При сильном ветре беглый верховой пожар может создавать новые очаги низового пожара. Пожар распространяется со скоростью около 4500-4800м/ч.



Рисунок 2 – Типичный верховой пожар [6]

3. Почвенный пожар обычно возникает на хорошо просохших участках с торфяной почвы или слоем лесной подстилки более 20 см. Пожар распространяется очень медленно (несколько метров в сутки). При таком пожаре сгорают корни, что приводит к падению деревьев. Форма пожарища круглая или овальная. Характерная схема почвенного пожара представлена на рисунке 3.

3.1. Подстильногумусовый пожар – вид почвенного пожара, при котором горение распространяется по толщине лесной подстилки и гумусового слоя.

3.2. Торфяной пожар – почвенный пожар, для которого характерно распространение горения по торфянистому горизонту почвы или залежам торфа под слоем лесной почвы. [5,6]

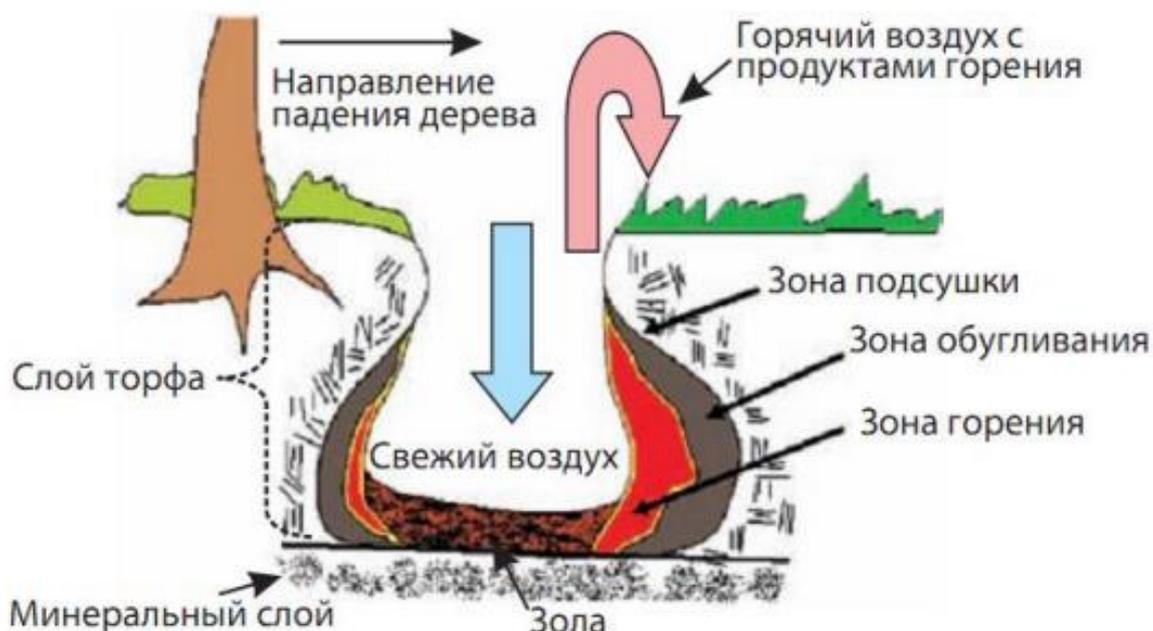


Рисунок 3 – Схема почвенного пожара [6]

Целесообразно также привести классификацию лесных пожаров по категориям сложности тушения и площади, которую прошел огонь [6]:

1. Начинаящийся пожар ($S = 1.5$ га)
2. Малый пожар ($S = 1.5-3.0$ га)
3. Средний пожар ($S = 3.0-25.0$ га)
4. Крупный пожар ($S = 25.0-200.0$ га)
5. Особо крупный пожар ($S =$ более 200 га)

Также существуют различные классификации лесных пожаров по ландшафту возникновения. Примером может служить классификация М.А Сафронова. Он разделял лесные пожары на: тундровые, собственно лесные, смешанные, кустарниковые, луговые, болотно-моховые, болотно-травяные, пожары в редицах, пожары в сухостойниках и пожары на вырубках [9].

1.2 Характеристика лесных горючих материалов

Для дальнейшего анализа проблемы лесных пожаров, необходимо выяснить особенности лесного фонда нашей страны и лесных горючих материалов в целом. Эти знания необходимы для анализа как особенностей горения и распространения пожара, так и тушения огня и ликвидации последствий.

Под лесным горючим материалом (ЛГМ) понимают растения лесов, их морфологические части и растительные остатки различной степени разложения, которые могут гореть при лесных пожарах [7]. Разделение ЛГМ на классы может осуществляться на различных уровнях. Так, они могут подразделяться, исходя из элементарных частей комплексов ЛГМ, когда рассматриваются отдельные растения напочвенного покрова, подрост, опад, морфологические части деревьев. Также лесные горючие материалы могут быть классифицированы внутри какого-либо простого или сложного комплекса в рамках биогеоценоза [8]. Рассмотрим наиболее популярные классификации ЛГМ.

Довольно часто для исследований в области лесных пожаров применяется классификация ЛГМ Национальной системы пожарной опасности США (The National Fire-Danger Rating System:). В соответствии с данной системой ЛГМ делятся на отмершие (dead fuel) и живые (life fuel), а также «тонкое горючее» (fine fuel, напочвенный покров из усохших травянистых растений), которое считают основным проводником горения. При разделении используются стандартные условия воздушной среды, а именно температура воздуха 26.5°, относительная влажность 20%.

В дальнейшем живые горючие материалы делятся на 2 класса:

1. травы и травянистые растения
2. хвоя, листва и ветки диаметром не более 6 мм.

Согласно подходу организации к классификации, в рамках этих двух моделей образцы ЛГМ проходят несколько стадий, таких как pregreen (MCHERB (влажность) 30 percent or less), greenup, green (MCHERB greater

than 120 percent), transition (MCHERB 30 to 120 percent), cured or frozen (MCHERB 30 percent or less). Каждая стадия характеризуется своим значением влажности и этапом развития. Для первой модели характерны все 5 стадий, для второй модели 4, так как исключается стадия transition.

Мертвые материалы делятся на классы в зависимости от временного лага. Под временным лагом понимается период времени, в ходе которого происходит потеря двух третей того количества влаги, которое испарилось бы из образца при стандартных условиях. Мертвые материалы делятся на 4 класса:

1. 1 класс(1-hour time lag fuel) – время восстановления 0-2 часа (в среднем около 1 часа). К такому классу можно отнести мертвые травянистые растения, круглое древесное топливо диаметром не более 6 мм.

2. 2 класс(10-hour time lag fuel) – время восстановления 0-20 часов (в среднем около 10 часов). В эту группу входит круглое древесное топливо диаметром от 6 до 25 мм, а также лесная подстилка толщиной 20 мм.

3. 3 класс(100-hour time lag fuel) – время восстановления 20-200 часов (в среднем около 100 часов). К таким относится круглое древесное топливо диаметром от 25 до 75 мм, а также лесная подстилка толщиной 20-100 мм.

4. 4 класс(1000-hour time lag fuel) – среднее время восстановления 1000ч. К такому классу относят валеж диаметром 76-200мм [5,7,11].

Стоит отметить, что данная классификация не является полностью универсальной, поскольку она не учитывает особенности некоторых видов ЛГМ. Так, например, в России большое распространение находят мохово-лишайниковые покровы, которые не могут быть учтены в рамках данной классификации. Значит, такой способ деления лесных горючих материалов имеет ограниченное применение и не может быть использован всеми странами для прогноза пожарной опасности.

Ещё одна распространённая система классификации ЛГМ была разработана в Канаде в рамках системы прогноза пожарной опасности Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS). Она состоит из четырёх подсистем: подсистема индексной оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды FWI; подсистема прогноза поведения лесного пожара FBP; подсистема Accessory Fuel Moisture System, позволяющая оценивать влагосодержание лесных горючих материалов, отличных от «стандартного» типа; подсистема для прогнозирования возникновения пожаров от молний и по вине человека. Последняя подсистема ещё разрабатывается [12].

Рассмотрим подсистему предсказания поведения лесного пожара Fire Behavior Prediction (FBP). Данная система может спрогнозировать возможную территорию распространения пожара, скорость распространения, возможный тип пожара. Для осуществления расчетов необходимо задание таких входных параметров как особенности погоды, рельефа, влажность лесного горючего материала, предполагаемые период прогноза и тип лесного горючего материала. Поскольку последняя составляющая входных параметров достаточно существенно влияет на прогноз пожарной опасности, возникла необходимость классифицировать ЛГМ.

В рамках данной классификации было выделено 5 топливных моделей, включающих в себя 18 видов топлива. Рассмотрим основные топливные модели в рамках данной классификации [13]:

1. Хвойные топлива – наиболее потенциально пожароопасная группа. В рамках данной топливной модели выделяют 7 типов ЛГМ, среди которых наиболее воспламеняемыми считаются хвоинки ели и сосны.

2. Травяные топлива – данная группа характеризует лесную подстилку. В данную топливную модель входят травяные топлива характерные для весны и для конца лета. Разделение подстилки по сезонам объясняется особенностями влажности и состава.

3. Смешанные топлива – данная модель описывает типичную растительность бореального леса и описывает различные комбинации

хвойных и лиственных пород. В данной модели различают 4 типа ЛГМ в зависимости от процентного соотношения хвойной и лиственной составляющей.

4. Лиственные топлива – в данную модель входят 2 типа ЛГМ (безлистные и зеленые). Данная группа может исказить данные по прогнозам в различных географических областях.

5. Рубленные топлива – эта группа объединяет в себе 3 типа ЛГМ, которые являются остатками деятельности человека, например, остатки древесных пород после вырубки.

Также в канадской классификации ЛГМ можно выделить три большие группы: почвенные (ground fuels), включающие гумус, торф, корни; напочвенные (surface fuels), включающие опад листвы и хвои, травы, мелкие кустарники, крупный валеж; кроновое горючее (crown fuels), куда входят ветки с хвоей и листвой и отмершие сучья[13].

Выделенные в классификации комплексы ЛГМ не отображают всего разнообразия лесного фонда Канады. Использовать систему можно лишь в том случае, где растительность соответствует типовым комплексам.

В России наиболее распространенной является классификация советского ученого, профессора Николая Петровича Курбатского. Разделение лесных горючих материалов осуществлялось в соответствии с их ролью в процессе горения лесного биогеоценоза [7]:

1. мхи и лишайники
2. подстилка (полуразложившийся опад, очем мха, гумусовый торфянистый горизонт)
3. травы и кустарнички (вместе с подростом, самосевом, подлеском)
4. мертвые древесные остатки (сухостой, валежник, сучья, пни, порубочные остатки)
5. подрост и подлесок (кустарник)
6. хвоя и листва растущих деревьев
7. стволы растущих деревьев и живые сучья (толщиной более 7 мм)

Также Курбатский разделил все лесные горючие материалы на проводники горения, поддерживающие горение материалы и задерживающие горение материалы. При этом необходимо учитывать тот факт, что лесной горючий материал может, как поддерживать, так и задерживать горение в зависимости от влагосодержания [8].

Также необходимо помнить и классификацию лесного фонда по пожарной опасности. В соответствии с ней, лесной фонд можно разделить на 5 классов [14]:

1. первый класс (очень высокая горимость) – сухие боры: сосняки лишайниковые, вересковые, а также вырубki на участках этих сосняков.

2. второй класс (высокая горимость) – сосняки, ельники брусничные и кисличные на свежих, супесчаных почвах в областях с относительно возвышенным ровным рельефом.

3. третий класс (средняя горимость) – сосняки и ельники черничные на влажных почвах на ровных относительно пониженных участках.

4. четвертый класс (горимость ниже среднего) – сосняки и ельники долгомошные на сырых почвах; березняки и осинники кисличные и черничные

5. пятый класс (низкая горимость) – хвойные и лиственные насаждения на заболоченных площадях; верховые и переходные болота.

Важно помнить о том, что пожаростойкость у всех древесных пород отличается. Светлохвойные светлюбивые породы заметно более пожаростойкие, чем темнохвойные теневыносливые виды (ель, пихта, кедр). Следовательно, пожаростойкость снижается в ряду хвойных в порядке [14]: лиственница – сосна – кедр – пихта – ель. В ряду лиственных пород осина обладает более высокой пожаростойкостью, чем берёза. Пожаростойкость также зависит и от возраста древесной породы. Например, сосновые молодняки высотой до 2 м обычно погибают от огня полностью. При толщине коры до 1 мм происходит неизбежное отмирание камбия. Нарост

коркового слоя способствует увеличению стойкости дерева к огню. Так, кора 8 мм толщины защищает сосну в 95% случаев.

Следует также отметить особенности лесного фонда Российской Федерации. Большая часть лесов России находится в таежной зоне. Леса европейской части страны представлены хвойными (сосна обыкновенная и ель европейская) и лиственными (осина, береза повислая и пушистая, ольха серая и чёрная). В сибирских лесах основными лесобразующими древесными породами являются пихта сибирская, сосна кедровая сибирская (кедр сибирский) и лиственницы (сибирская и Гмелина). В зоне смешанных лесов на юге европейской части России преобладают дуб черешчатый, липа мелколистная и другие широколиственные древесные породы [14].

1.3 Сушка лесных горючих материалов

Изучение процесса сушки лесных горючих материалов является важным аспектом для создания систем прогнозирования лесных пожаров. Высыхание ЛГМ считается наиболее важным и менее изученным этапом процесса горения в природных условиях. Рассмотрим основные достижения ученых в изучении этого процесса.

Под сушкой ЛГМ понимается испарение воды из материала. Для этого необходимо различать понятия свободной и связанной влаги. Свободной считается вода, для которой давление насыщенного пара равно давлению насыщенного пара над плоской поверхностью воды. Как правило, такая вода лежит на слое материала в виде пленки, образованной за счет поверхностного натяжения жидкости. Связанная вода предполагает наличие более крепких связей с материалом. Следует помнить, что при одной и той же температуре парциальное давление связанной воды меньше парциального давления свободной воды. Процесс испарения связанной воды включает в себя множество стадий (как правило, включает десорбцию, адсорбцию, движение воды по порам тела, течение в пограничном слое среды в

окрестностях тела) и достаточно затратный с точки зрения энергии. В связи с этим появилась необходимость классификации связанной воды [15].

На сегодняшний момент принято считать, что влага может быть связана тремя разными способами: химически, физико-химически и физико-механически. Данная классификация была предложена советским ученым П.А Ребиндером. В качестве фактора для классификации было выбрано количество работы необходимое для удаления одного моля влаги из материала. Химически связанная вода обладает наибольшей энергией связи (для удаления 1 моля такой воды требуется 5000 Джоулей энергии) и не удаляется при сушке. Для удаления физико-химической связанной воды необходимо затратить 3000 Джоулей энергии, к данному типу также относят адсорбционно и осмотически связанную воду. Наименее энергозатратной для удаления является физико-механически связанная вода, требующая для этого 100 Джоулей энергии [15].

Выделяют два режима сушки – кинетический и диффузионный. Кинетический режим реализуется в случае, когда сушка лимитируется испарением (десорбцией) воды с внешней поверхности пористого влагосодержащего тела. Диффузионный режим имеет место тогда, когда сушка лимитируется переносом влаги или паров непосредственно внутри тела. Сушка ЛГМ в основном характеризуется кинетическим режимом, за исключением сушки толстых веточек при высоких температурах [16].

При исследовании сушки ЛГМ основными задачами являются определение самого механизма и времени процесса, термокинетических параметров исследуемого вида ЛГМ и его влагосодержания. Рассмотрим наиболее ключевые исследования данной области. В рамках своих работ ученые с помощью численных и экспериментальных методов описывали процесс сушки при различных граничных условиях.

Изучение процесса сушки происходило одновременно в разных направлениях. Много исследовательских работ направлено на определение влажности ЛГМ. Данный показатель является ключевым для характеристики

топлива и возможности пожара. Обычно данная величина определяется отношением массы воды к массе сухого органического вещества и выражается в процентах. Важность анализа этого показателя объясняется несколькими особенностями. Во-первых, высокое содержание влаги способствует задержке зажигания и горения, поскольку сначала необходимо испарить находящуюся в ЛГМ жидкость. Если подведенного количества теплоты недостаточно для отвода данной влаги, то воспламенения не произойдет. Во-вторых, содержание в ЛГМ жидкости также ведет к увеличению его теплопроводности и теплоемкости. В-третьих, пары воды уменьшают потенциал воспламенения, температуру горения, а также могут разбавить кислород [17].

Влажность ЛГМ обусловлена его существенными особенностями. К таковым можно отнести гигроскопичность, характеризующая способность вещества притягивать и удерживать молекулы жидкости, особенности клеточного строения и теплофизические свойства частиц ЛГМ. Все эти особенности будут отличаться у живых и мертвых топлив, тем самым обуславливая содержание в них влаги. Так, движение воды через частицы мертвого топлива обусловлено процессами испарения из клеточных стенок, диффузией пара через пустоты клеток и его конденсация на стенках ячеек клетки. В итоге вода испаряется с поверхности ЛГМ. Динамика влажности твердого топлива определяется как разность давлений водяного пара в топливной частице и атмосфере. Немного иначе обстоит процесс движения жидкости в живом топливе. Вода перемещается через клетки через осмос и пустоты клеток путем диффузии и капиллярных сил. Диффузная вода затем подтягивается к листу через проводящую ткань ксилема в древесине путем растягивающего давления, вызванного потенциалом воды, который управляется градиентом давления пара от воздуха к установке. По мере истощения почвенной воды диффузионный градиент должен становится более сильным, оказывая более растягивающее давление для преодоления растягивающих сил со стороны почвы на связанную воду[17].

Влажность ЛГМ чаще всего измеряют термогравиметрическим методом. Он предполагает сушку образцов в печи и последующего определения разности веса образцов до и после сушки. Такой метод достаточно прост и эффективен. Наиболее точные результаты можно получить при проведении сушки при более низких температурах (80-85 °С) в течение более длительных периодов времени (48-72 ч), что позволяет предотвращать нежелательные изменения органической структуры топливной частицы [17].

Для исследования процессов парообмена, адсорбции и десорбции обычно вводят понятие равновесного содержания влаги [18]. Под равновесным влагосодержанием ЛГМ в данных условиях окружающей среды понимается влажность, которую элемент достигнет, если его оставить на достаточное время в тех (постоянных) условиях. Этот параметр может зависеть от конкретных условий окружающей среды и от темпов изменения текущей влажности образца в сторону равновесной. При моделировании равновесную влажность описывают как функцию от относительной влажности и температуры, иногда с учетом типа лесного горючего материала. Наиболее известные модели, использующие этот показатель, принадлежат Симарду, Ван Вагнеру, Андерсону, Нельсону [18]. Ученые разрабатывали свои модели на основе эмпирических данных, пытаясь учесть процессы адсорбции и десорбции.

Однако использование параметра равновесного влагосодержания осложняется гистерезисным характером ее режимов смачивания и сушки. В связи с этим авторы стали предлагать другие подходы к описанию процессов. Так, появилось несколько парообменных моделей, которые также как и предыдущие основывались на данных влажности и температуры среды, однако конечным результатом расчетов было фактическое содержание влаги в ЛГМ. В этом случае также были предприняты попытки параметризации процесса сушки с целью увеличения достоверности результатов. Также были попытки построить поведенческую модель, использующую в качестве

входных данных количество выпавших осадков. Все полученные учеными модели нуждаются в доработке и обладают ограниченной сферой применения [18].

Помимо определения показателя влажности топлива многие ученые занимаются математическим описанием данного процесса. Рассмотрим основные математические модели сушки ЛГМ и полученные с их помощью результаты.

Для качественного прогноза пожарной опасности нужно уметь с наибольшей точностью оценить температуру и влагосодержание напочвенного слоя ЛГМ [19]. Эти параметры позволяют определить возможность возникновения горения (горение начнется в том случае, если значение влагосодержания достигнет критического уровня). На данный момент при оценке пожарной опасности используется комплексный метеорологический показатель В.Г.Нестерова [19]:

$$G_j [K^2] = G_{j-1} \xi_j + T_j (T_j - T_{pj}) \quad (1)$$

где T_j , T_{pj} – температуры воздуха и точки росы в 13÷15 ч местного времени текущего дня; ξ – коэффициент учета осадков, равный нулю, если сумма осадков за прошедшие сутки $f_j > 3$ мм, или равный 1, если $f_j < 3$ мм; j – день пожароопасного периода.

Было отмечено [16,19], что данный показатель не учитывает влияния некоторых факторов, которые могут существенно повлиять на возможность возникновения пожара (скорость ветра, тип ЛГМ и кинетика его испарения, тип почвы). В связи с этим стали появляться результаты исследования, основанные на другом подходе к процессу сушки ЛГМ. Рассмотрим некоторые из них.

Математическое моделирование подобных физико-химических процессов невозможно без сведений о характеристиках тепло- и массопереноса в элементе ЛГМ. Значит, необходимы экспериментальные исследования по определению этих параметров. В [20] приведены результаты

экспериментов, в ходе которых определялись коэффициенты удельной влагоемкости и влагопроводности.

При проведении исследований прибегали к использованию подхода А.В. Лыкова для описания процесса влагообмена. Результаты измерений были аппроксимированы по линейным зависимостям (для удельной влагоемкости $C_m=a-bT$, для влагопроводности $\lambda_m=c-dT$). При анализе экспериментальных данных было выяснено, что λ_m и C_m уменьшаются с ростом температуры. Особенно заметно эта зависимость проявляется для хвои кедра, из-за особенностей её внутренней структуры. Хвоинки имеют в своем составе 2 влаговода (канала для снабжения биологических клеток капиллярной влагой), расположенных в центре, а также 12 устьиц, через которые влага может испаряться. С ростом температуры уменьшается диаметр влаговодов, что ограничивает доступ капиллярной влаги. Как следствие, уменьшаются параметры λ_m и C_m .

В [21] рассматривается слой из смеси ЛГМ, обдуваемый ветром и нагреваемый излучением от Солнца (рисунок 4). Слой имеет высоту h , скорость ветра V_c , учитываются теплофизические параметры составляющих смеси, а также процессы переноса и испарения воды. Задача рассматривается в плоскости xz с рядом допущений. Рассматривались сопряженная и раздельная постановки задачи.

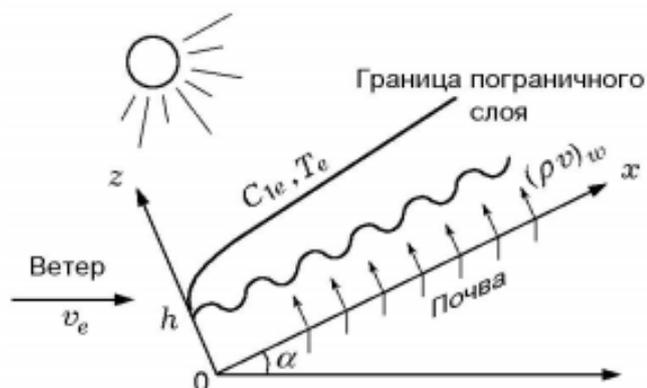


Рисунок 4 – Схема тепломассообмена слоя ЛГМ и приземного слоя атмосферы [21]

Задачей исследования было определение времени сушки ЛГМ, за которое значение влагосодержания слоя станет меньше критического. В ходе проведения эксперимента определялась убыль массы ЛГМ (m/m_0) от времени. Исследования показали, что масса убывала по экспоненциальному закону и выходила на стационарное значение. Следовательно, с увеличением температуры скорость испарения воды возрастает и уменьшается время сушки [21].

С целью проверки достоверности модели [21] были проведены экспериментальные исследования по сушке ЛГМ в дозвуковой аэродинамической трубе (труба типа МТ-234). Исследовались образцы хвои сосны, ели и кедра. Кривые экспериментальных и численных исследований совпали при варьировании плотности укладки образца. Следовательно, это незначительно влияющий фактор. Значительное влияние на процесс сушки оказывают влагосодержание, температура окружающей среды и влажность. Плотность солнечного излучения, дошедшего до слоя, не зависит от угла наклона земной поверхности, значит, угол не влияет на интенсивность процесса сушки. Более быстрая сушка ЛГМ на пригорках связана с меньшей плотностью растительности, и, как следствие, большая доля солнечной радиации доходит непосредственно до поверхности слоя. Также там намного меньше объектов, отбрасывающих тень и защищающих слой ЛГМ от воздействия этой радиации. [22]

Также исследователями были определены некоторые особенности взаимодействия лесных горючих материалов и капель жидкости. Так, сухая хвоя и вода в капельном состоянии не взаимодействуют массой, потому что у сухой хвои атрофированы устьица. Скорость испарения капли с живой хвои значительно выше скорости испарения с сухой хвои.

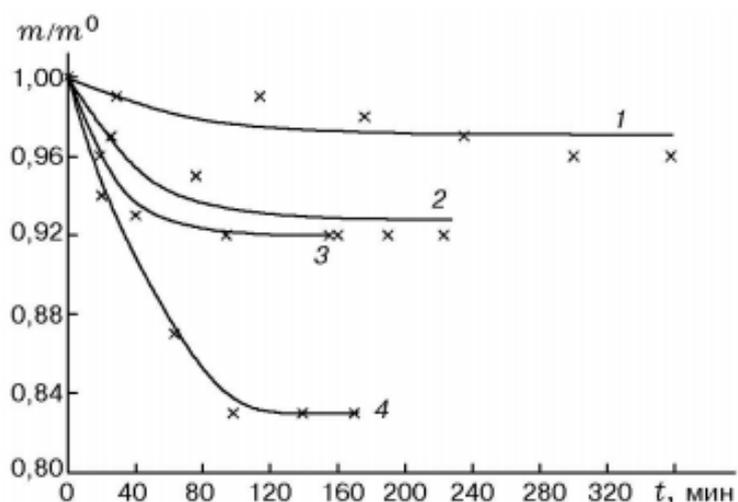


Рисунок 5 – Результаты эксперимента и математического моделирования процесса сушки на примере хвои сосны: 1 – $T=30^{\circ}\text{C}$, 2 – $T=52^{\circ}\text{C}$, 3 – $T=96^{\circ}\text{C}$ (линии – расчетные данные, точки – экспериментальные данные) [22,23]

Также следует отметить, что исследования (численное моделирование) были проведены для условий разной пожарной опасности и разных видов почв, что дает более полную картину процесса сушки в различных условиях и позволяет более точно моделировать и предсказывать процесс лесного пожара. Рисунок 6 отображает результаты экспериментов при варьировании условий.

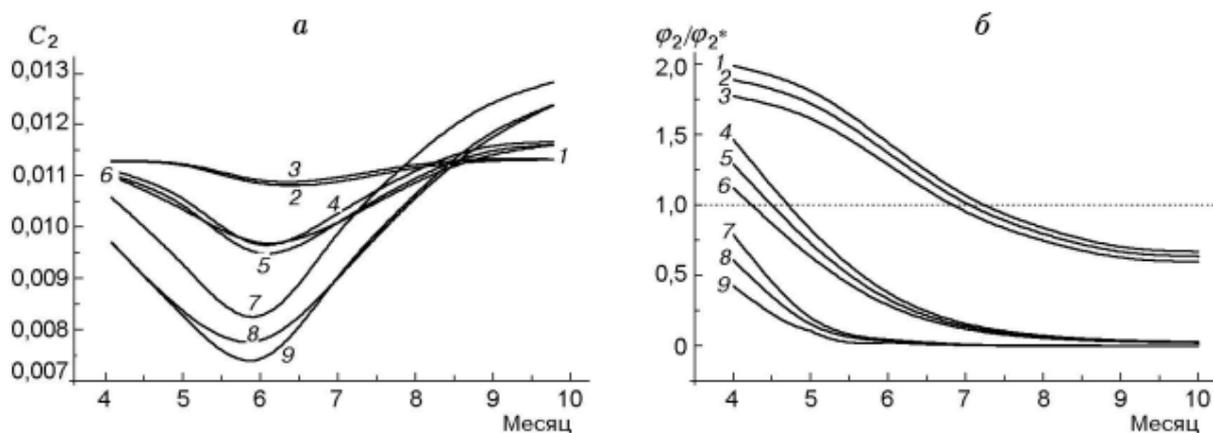


Рисунок 6 – Изменение массовой концентрации паров воды (а) и отношения объемной доли воды в связанном с веществом состоянии к критическому значению (б) [22,23]

На рисунке 6 кривые 1-3 – низкая пожарная опасность на глинистых, типичных и песчаных почвах; кривые 4-6 – средняя пожарная опасность на глинистых, типичных и песчаных почвах; кривые 7-9 – высокая пожарная опасность на глинистых, типичных и песчаных почвах;

Полученные кривые позволяют прогнозировать пожарную опасность, анализируя данные о температуре воздуха и характеристик исследуемой местности. В [23] собраны результаты экспериментальных и численных исследований сушки ЛГМ для различных случаев (испарение свободной и связанной влаги, исследование сушки в аэродинамической трубе, испарение капель воды с шероховатой поверхности).

При экспериментальных исследованиях изучалось испарение воды со слоя ЛГМ и определялись необходимые термокинетические константы (энергия активации, константа скорости реакции. Полученные результаты были сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Термокинетические параметры реакции сушки хвои сосны

$E_2/R, \text{ k-1}$	4373	5247	4560	5956	2720
$k_2, \text{ k}^{1/2} \text{ C}^{-1}$	18,32	1,487*105	2,83	6,03*105	1,88
T, K	303 369	369	443 770	333 403	-

Исследователями доказана необходимость учета парциального давления водяного пара при расчете термокинетических констант при температурах ниже 60°C [21].

В исследовании также приведены и математические модели рассматриваемых явлений с необходимыми выводами о закономерностях процесса сушки. Определена аналитическая формула для расчета времени сушки [21]:

$$t_c = \frac{\tau_{*2} \rho_1 \varphi_{1H} C_{p1} RT_{S*}^{5/2}}{q_2 k_{02} \rho_2 E} \exp\left(\frac{E}{RT_{S*}}\right) \quad (2)$$

Учеными в [24] отмечено, что пожары также часто возникают под пологом древостоя, а значит есть необходимость рассматривать процесс

сушки и в этих условиях в зависимости от изменения лесотаксационных описаний лесного массива. Авторами рассмотрены рододендрово-брусничные и бруснично-разнотравные из-за однородности слоя опада. Используя формулу для определения времени сушки [21] и нуль-мерную математическую модель были получены времена сушки слоя ЛГМ в зависимости от полноты древостоя.

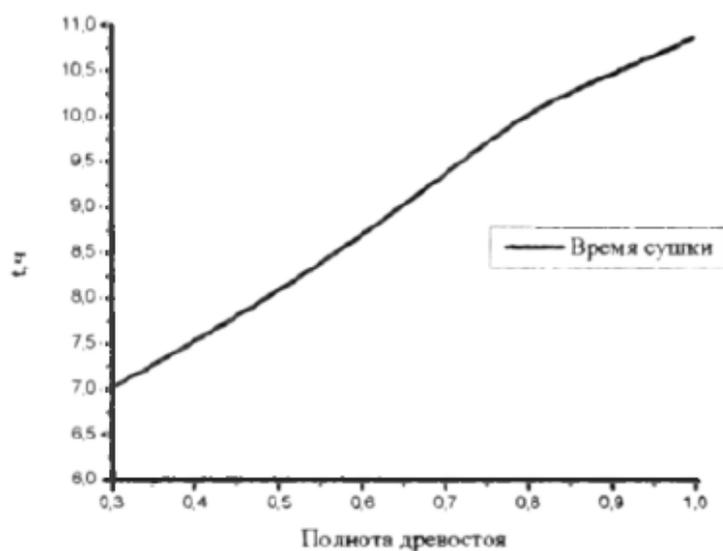


Рисунок 7 – Зависимость времени сушки ЛГМ под пологом древостоя от его полноты [8]

Результаты, полученные с помощью математической модели, были сравнены с данными натурных наблюдений. Сравнение проводилось на примере влагосодержания слоя ЛГМ из опада хвои. Согласование результатов удовлетворительное. Однако данная математическая модель имеет ограничения. Данная подстановка может быть использована лишь для получения прогноза по утренним данным.

Подобные экспериментальные и теоретические исследования процесса сушки проводятся и в других странах. В [25] представлены результаты экспериментов по изучению процесса сушки трёх видов эвкалипта. Отсутствие существенных различий в ответах трех видов поддерживает использование этих данных для выявления общих взаимосвязей между влагосодержанием и связанных с ним параметров, которые используются в

моделях пожаротушения или анализа качества воздуха. Оценки вероятности воспламенения, основанные на данных о временах воспламенения, показали, что критическое при значении влагосодержания в образцах материалов равном 50% вероятность воспламенения составляет от 81 до 89% в пересчете на сухое вещество.

Немецкими учеными были экспериментально определены значения равновесного влагосодержания мертвого ЛГМ [26]. В качестве образцов использовались элементы подстилки норвежской ели, сосны обыкновенной, европейский бука. Выбор пород деревьев обусловлен их частой встречаемостью на территории Европы. Эксперименты были проведены с помощью «климатической камеры» и над различными насыщенными солевыми растворами. В результате получены кривые равновесного содержания влаги в этих элементах ЛГМ. Установлено различие между кривыми для хвои и листьев, что авторы объясняют различиями в физических и химических свойствах материалов. Ученые советуют использовать «климатические камеры» в дальнейших исследованиях, так как они обеспечивают легкую работу с образцами, а также наблюдается адекватное согласование результатов с литературными данными.

Таким образом, исследования в области моделирования процесса сушки и экспериментального определения влагосодержания различных типов ЛГМ продолжаются с целью определения всех возможных сценариев процесса в различных условиях.

1.4 Термическое разложение лесного горючего материала

При распространении лесных пожаров огромную роль играет процесс пиролиза – разложение лесных горючих материалов под воздействием температуры [27].

При пожарах за счет горения летучих продуктов пиролиза выделяется около 90% теплоты, при беспламенном горении угольного остатка около 6% [16]. Для построения адекватных математических моделей лесных

пожаров необходимо учитывать скорость образования летучих и конденсированных паров пиролиза. Эта объясняется особенностями процесса лесного пожара. На начальных стадиях превалирует горение летучих продуктов пиролиза, а на завершающей стадии – горение конденсированных продуктов. [27]

Для того чтобы исследовать процесс пиролиза вещества, необходимо знать его состав. Рассмотрим основные составляющие типичных лесных горючих материалов.

В процессе поиска решения проблемы лесных пожаров лес принято рассматривать как многофазную реакционноспособную среду. В этой среде выделяют следующие компоненты[27]:

1. сухое органическое вещество
2. связанная вода в жидко-капельном состоянии
3. конденсированные продукты пиролиза
4. зола
5. газовая фаза
6. дисперсные частицы фазы
7. дисперсные частицы золы
8. свободная вода в жидко-капельном состоянии (на большой высоте от очага пожара)

Для моделирования этапов лесного пожара необходимо учитывать химический состав сухого ЛГМ, так как он загорается в большинстве случаев. Химический состав большинства лесных горючих материалов недостаточно изучен. Принято считать, что основными компонентами являются зола, углеводы (целлюлоза и гемицеллюлоза), лигнин. Так, максимальное содержание золы наблюдается в листьях осины. Целлюлоза и гемицеллюлоза преобладают в составе шишек сосны. Различие в химическом составе и влагосодержании живого ЛГМ и опада прямо указывает на пожароопасность конкретного элемента ЛГМ. Схематически состав ЛГМ отображен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Групповой состав лесных горючих материалов [27]

В процессе пиролиза образуются газообразные (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_6) и конденсированные продукты (древесный уголь и жижка, состоящая из воды, смолы, спиртовых продуктов, кислот).

Наиболее полно изучен процесс пиролиза древесины. Термическое разложение осуществляется в несколько стадий. В ходе первой реакции образуются первичные летучие соединения, первичная смола и первичный кокс. В дальнейшем первичная смола в ходе двух параллельных химических реакций разлагается на вторичные летучие соединения, летучие соединения третьего сорта и вторичный кокс. Первая стадия проходит эндотермически, все последующие – экзотермически [16].

Представляет интерес изучение процесса пиролиза непосредственно в ЛГМ. Современные исследования не дают точного описания данного процесса, однако некоторые предположения и приближения удовлетворительно согласуются с практическими результатами.

Предполагается, что для описания процесса пиролиза ЛГМ можно использовать следующую систему уравнений 3 [16].

$$\begin{cases} \frac{dm_{io}}{dt} = -k_1 m_{io} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), & t = 0 \quad m_{io} = m_{in} \\ \frac{dm_{ic}}{dt} = \alpha_c m_{io} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), & t = 0 \quad m_{ic} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

где $\alpha_c = \nu_1 M_c / (\nu_1 M_1)$ – отношение молекулярных масс и стехиометрических коэффициентов конденсированного продукта пиролиза и исходного вещества; m_{io} – текущая масса сухого органического вещества в элементе ЛГМ; k_1 , E_1 – предэкспоненциальный множитель и энергия активации пиролиза; m_{ic} – текущая масса коксика, получающегося при пиролизе ЛГМ; m_{in} – текущая масса сухого органического вещества в элементе ЛГМ в начальный момент времени.

Уравнения системы отображают законы сохранения исходного вещества и конечного продукта пиролиза в случае, когда характерное время процесса переноса в ЛГМ меньше характерного времени пиролиза.

Для массы сухого элемента ЛГМ справедливо выражение:

$$m_i = m_{io} + m_{ic} \quad (4)$$

Для данной системы, с учетом граничных условий и выражения для массы сухого элемента ЛГМ можно найти:

$$\begin{aligned} \alpha_c m_{io} + m_{ic} &= \alpha_c m_i \\ \frac{dm_i}{dt} &= -k_1 (m_i - \alpha_c m_{in}) \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

Если время процесса устремить в бесконечность, то текущая масса сухого органического вещества в элементе ЛГМ устремится к нулю.

Получаем:

$$\alpha_c = \frac{m_{ik}}{m_{in}} \quad (6)$$

где m_{ik} – конечная масса элемента ЛГМ после процесса пиролиза;

Таким образом, для времени пиролиза в [16] была получена формула:

$$t_n = \frac{1}{k_*} \ln 20 \left(\frac{m_n}{m_c} - 1 \right), \quad k_* = k_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \quad (7)$$

В литературе уже были опубликованы работы, посвященные изучению кинетики пиролиза ЛГМ и их компонентов в различных внешних средах [28,29]. В качестве образцов для исследований чаще всего использовались породы лесов Западной Европы и Средиземноморья. Интерес к процессу пиролиза также обусловлен тем, что полученные данные можно применить в области производства биотоплива. Чаще всего в исследованиях пользуются методом термогравиметрии, который предполагает регистрацию массы образца при изменении температуры.

В [30] отмечено, что не хватает исследований процесса пиролиза ЛГМ хвойных лесов. Данные исследования помогут в дальнейшей разработке систем прогнозирования пожаров. Исследования проводились с порошком ЛГМ. Исходными материалами был опад сосны (кора, хвонки, веточки). Материалы исследовались в инертной и окислительной средах. Учеными представлены модели для пиролиза ЛГМ при высоких и низких скоростях нагрева.

В результате исследований учеными были определены кинетические параметры реакции пиролиза ЛГМ в зависимости от среды и скорости нагрева. Выяснено, что для пиролиза в окислительной среде характерны более низкие значения энергии активации по сравнению с термическим разложением в инертной среде. Константа скорости второй стадии пиролиза в окислительной среде выше, чем в инертной среде при низкой скорости нагрева, но ниже при высоких скоростях нагрева наоборот.

Кинетические исследования также проводятся и другими группами ученых. В [31] представлены кинетические характеристики процесса пиролиза хвойных пород и углей, которые были получены при использовании EIPR (Extended Independent Parallel Reaction) модели, моделей Фридмана и Озава-Флинн-Уолла. Первая модель предполагает определение

кинетических характеристик для каждого компонента образца, а остальные модели используют данные результатов ТГ-исследований и определяют параметры при разных скоростях нагрева. Образцы находились в окислительной или инертной среде. При изучении пиролиза в инертной среде процесс описывался в виде трёх независимых, параллельно идущих реакций (выделение из лигнина, целлюлозы, гемицеллюлозы летучих веществ). В результате, полученные разными методами значения энергии активации и константы скорости химической реакции обладают удовлетворительной сходимостью. Это говорит о том, что представленные в [31] модели можно применять при изучении процесса пиролиза и получения адекватных результатов. Значения энергий активации для древесного топлива находятся в диапазоне от 62 ÷ 93 кДж/моль, причем в воздушной среде эти значения больше, чем в инертной.

В некоторых источниках литературы подчеркивается необходимость разработки унифицированной математической модели, описывающей процесс термического разложения биомассы. Подобные попытки были предприняты и описаны в [32]. Там также применяется метод, при котором процесс пиролиза представлен в виде параллельных реакций порядка n . Эта идея была взята на вооружение другими исследовательскими группами. Так, в работе [33] эта модель усовершенствована для конкретного типа ЛГМ – ветки сосны. При изучении процесса были получены кривые пиролиза образца в азоте с помощью метода термогравиметрии. Далее в модель [32] были добавлены необходимые условие и изменения и получены новые кривые процесса. Результаты, полученные с помощью этой кинетической модели, сравнены с соответствующими экспериментальными данными. Хорошее согласие экспериментальных и имитированных кривых подтвердило надежность предложенной кинетической модели. Новизна унифицированной кинетической модели заключается в том, что последовательные кинетические схемы с теми же пропорциями псевдокомпонентов используются для симуляции пиролитических реакций

при пиролизе и сжигании. Генетический алгоритм(GA) и алгоритм нелинейного фитинга объединяются для использования при поиске оптимизированных значений параметров.

Таким образом, в основных иностранных и российских источниках литературы [27-35] процесс пиролиза характеризуется тремя независимыми процессами, связанными с выделением летучих веществ из основных составляющих лесного горючего материала. Современные исследования направлены на разработку унифицированной модели процесса термического разложения, а также на получение необходимых кинетических параметров для различных типов ЛГМ в различных средах.

1.5 Зажигание лесных горючих материалов

Зажигание ЛГМ является одним из ключевых процессов, влияющих на уровень лесной пожарной опасности. В настоящее время изучение процесса зажигания обширно изучается в рамках химической физики. На данный момент разработаны различные модели зажигания в зависимости от свойств среды, источника нагрева, зажигаемого вещества. Рассмотрим основные закономерности зажигания лесных горючих материалов, сформулированные на данном этапе изучения этого процесса выводы.

Изучение процесса зажигания стоит начать с основных причин и механизмов, обуславливающих этот процесс. Всё это обусловлено окружающей средой и тем, какое вещество зажигается. В данном случае речь идёт о конденсированных и неконденсированных системах. Под конденсированными системами понимают вещества в твердом или жидком состоянии, для которых характерен ближний или дальний порядок расположения атомов (в зависимости от повторяемости в пространстве)[36]. Данное определение очень четко описывает ЛГМ, так как элементы имеют четко оформленную структуру и являются твердыми веществами. Механизмы зажигания конденсированных веществ могут быть

разнообразными, например, цепной, фотохимический, тепловой. Наиболее часто рассматривается тепловой механизм зажигания [37].

Зажигание конденсированных веществ может осуществляться тремя основными путями [37]:

1. кондуктивное зажигание – обусловленное контактом относительно холодного конденсированного вещества и неподвижной средой, нагретой до высокой температуры

2. лучистое зажигание – осуществляется за счёт передачи тепловой энергии от твердых раскаленных частиц или горячих газов

3. конвективное зажигание – происходящее за счёт конвекции горячих газов, которые, как правило, являются продуктами воспламенителя

На основе данных механизмов разработаны различные модели зажигания – гетерогенная, твердофазная, газофазная. Модели зажигания ЛГМ берут за основу именно эти модели.

Процесс зажигания на данный момент достаточно популярен в исследованиях. Достаточно много работ, посвященных численному и экспериментальному исследованию зажигания ЛГМ.

Активно проводятся экспериментальные исследования, посвященные изучению зажигания ЛГМ нагретыми частицами. В основном в роли нагретых частиц выступают частицы из стали или углеводородов. В [38] рассматриваются особенности зажигания хвои углеродистой частицей (графит). Проводились эксперименты в пламенном и беспламенном режиме. Выяснено, что в первом случае горящая частица попадает на ЛГМ, образец хвои прогревается преимущественно за счет конвективного и лучистого переноса теплоты. Затем происходит вдув газообразных горючих продуктов и ЛГМ зажигается по газофазному механизму. В момент зажигания на ЛГМ образуется второй факел пламени, затем факелы частицы и хвои объединяются, и пламя распространяется по слою ЛГМ. В случае беспламенного режима образец ЛГМ прогревается, термически разлагается с выделением продуктов пиролиза. Причем приповерхностный слой

практически полностью разлагается. Газообразные продукты фильтруются пористым слоем ЛГМ, смеиваются с окислителем, нагреваются, что и приводит к зажиганию и распространению пламени по частице. В ходе исследования также были установлены времена задержки зажигания для различных температур. Зависимость была аппроксимирована прямой линией. По мнению авторов, зажигание хвои сопровождается целым комплексом конвективных и диффузионных процессов над и в приповерхностном слое.

Подобные исследования проводились и с использованием в качестве источника нагрева частиц стали. В [39] рассматривается зажигание навески хвои нагретой до высокой температуры стальной частицы. В результате исследования были выделены предельные начальные температуры частицы и её размеры, при которых возможна реализация такого механизма возгорания нагретая металлическая частица - хвоя. Отмечено, что на время задержки зажигания также влияет пористость данного вида или слоя ЛГМ. Время задержки также аппроксимировано прямой линией. В ходе сравнительного анализа выявлено, что время задержки зажигания при воздействии углеродистой частицы 10-25% при зажигании элементов из стали [38,39]. При высоких температурах (более 1300 К) определяющим фактором является сама температура локального источника нагрева, в то время как материал, ее форма и размеры частицы существенно не влияют на время задержки процесса зажигания [38,39]. Исследования были усовершенствованы с учетом неоднородности структуру приповерхностного слоя ЛГМ [40]. В [40] на основе имеющихся экспериментальных данных была сформулирована математическая модель данного процесса. Отмечено хорошее согласование результатов эксперимента и математического моделирования в пределах погрешности экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования процесса зажигания ЛГМ также проводились и для лиственных пород. В [41] представлено исследование процесса зажигание травяной ветоши стальной частицы. Механизм зажигания достаточно схож с механизмом зажигания хвои. Однако отмечен

более интенсивный характер выделения продуктов пиролиза у травяной ветоши. По результатам эксперимента выявлена зависимость времени задержки зажигания от температуры нагретой частицы – линейная аппроксимация.

При исследованиях процесса зажигания в качестве ЛГМ также использовались листья березы. В [42,43] навеска из листьев березы зажигалась с помощью нагретой до высоких температур частицы графита или частицы металла соответственно. По результатам исследования была сформулирована физическая модель зажигания листа берёзы, состоящая из двух фаз. Первая фаза характеризует инертный прогрев образца ЛГМ частицей (беспламенный режим). Особенности протекания второй фазы зависит от того, на какую сторону листа упала нагретая частица. В случае попадания источника нагрева на тыльную сторону листа начинается процесс термического разложения листа с выделением газообразных продуктов пиролиза, которые фильтруются в микропористой структуре образца к поверхности контакта «лист-частица». Смесь окислителя и горючего нагревается. Далее происходит возгорание на некотором расстоянии от поверхности частицы. Иначе обстоит ситуация при попадании нагретой частицы на лицевую часть листа. В данном случае характерен процесс высокотемпературной газификации эфирных масел и терпеновых соединений из прогретого листа. Пары диффундируют в воздухе, что влечет за собой взрывоподобное зажигание смеси окислителя и горючего. Отмечено, что в ряде случаев зажигание может начаться до значительного термического разложения. Усиливают очаг горения вдуваемые при пиролизе газообразные продукты. Учеными было установлено, что попадание частицы на лицевую часть листа уменьшает время задержки зажигания по сравнению с тыльной стороной на 25%. При зажигании листа металлической частицей механизм воспламенения протекает аналогично и зависит стороны листа, на которую выпадает частица. По результатам исследований были построены графики зависимостей времени задержки зажигания от температуры [42,43] нагретой

частицы. Результаты экспериментальных исследований были аппроксимированы прямой линией. Поскольку теплофизические характеристики лиственных пород достаточно схожи, авторы предлагают применять не только для описания зажигания листьев березы. Отмечено, что при попадании частицы на кромку листа время задержки зажигания будет иметь промежуточное значение между характерными временами для тыльной или лицевой стороны.

Также при сравнении характеристик зажигания лиственных и хвойных ЛГМ замечено, что для листьев характерен меньший нижний предел зажигания по начальной температуре частицы. Это, скорее всего, объясняется тем, что поперечные размеры листьев существенно превышают размеры хвоинок. Различие в размерах приводит к различиям условий теплоотвода из зоны нагрева. Так, в случае с хвоинкой площадь нагрева в 3-4 раза меньше площади отвода теплоты. Для листа характерна обратная закономерность. Из чего можно сделать вывод, что рост температуры поверхности для листа достаточно более существенный, чем для хвоинки. В результате времена задержки зажигания отличаются в 2-2,5 раза [42,43]. Это значит, что опад лиственных пород может стать инициатором возгорания в смешанных лесах.

Наряду с разработкой физических моделей зажигания ведется разработка математических моделей, описывающих процесс зажигания различных ЛГМ, определяются основные способы переноса тепловой энергии и описывается механизм зажигания в целом в зависимости от типа ЛГМ и источника зажигания. Математические модели основываются на проведенных ранее экспериментальных исследованиях и проверяются на согласование данных. Численное моделирование позволяет рассмотреть условия и особенности зажигания ЛГМ от различных источников при малых финансовых затратах.

Так, воспламенение ЛГМ от нагретой частицы было исследованы и с точки зрения математического моделирования. В [44,45] отображены

результаты решения задачи о зажигании ЛГМ от такого источника энергии в рамках плоской постановки. Рассматривалось зажигание в газовой фазе. Процесс описывается уравнениями теплопроводности и диффузии. Параметрический анализ проводился на основе изменения температур частицы (углеродистой и стальной) и теплофизических свойств ЛГМ, рассмотрены особенности моменты в окрестностях частицы. Графически отражены особенности распределений концентраций кислорода и инертных газов в различных сечениях ЛГМ. Конкретно описаны особенности тепло- и массопереноса происходящего процесса. Полученные в результате моделирования данные хорошо согласуются с экспериментальными.

Помимо исследования процесса зажигания, причиной которого стала упавшая частица, было исследовано воспламенение ЛГМ под воздействием сфокусированного солнечного излучения [46,47]. При моделировании пренебрегалось наличием влаги в ЛГМ, что соответствует условиям катастрофической пожарной опасности. Воспламенения слоя ЛГМ описывалось уравнениями диффузии и нестационарной теплопроводности с начальными и граничными условиями. Задача решалась в рамках дву- и трехмерной постановки. По результатам моделирования была выявлена зависимость времени задержки зажигания от величины теплового потока солнечного излучения. При сценарном моделировании установлена минимальная величина теплового потока, при которой было возможно воспламенения слоя. Проведенные исследования позволили создать физическую и математическую модель данного процесса [47]. Также были сделаны выводы о влиянии размеров зоны солнечного излучения на время задержки зажигания [47].

На данный момент уже описан с математической точки зрения процесс зажигания древесины [48]. Процесс описывается законами сохранения энергии, массы и количества движения. Сочетание данной модели с экспериментальными данными способствует созданию более совершенной модели прогноза пожарной опасности. Также в литературе

изложена методология определения времени задержки зажигания [49]. Методика основывается на наблюдении о том, что время задержки зажигания пропорционально квадрату интеграла падающего теплового потока. Представлено решение для стационарных и нестационарных тепловых потоков. Особенность данной разработки в разделении расчетов зажигания в твердой и газовой фазе, что существенно упрощает процесс вычислений. Предложенная методика обеспечивает хорошее согласование с экспериментальными данными.

Таким образом, несмотря на пристальное внимание ученых к вопросу зажигания различных видов лесных горючих материалов по разным причинам, все ещё остаются недостаточно исследованные области в данном вопросе. Большая часть исследований имитирует картину низового пожара, в то время как имеют место и верховые пожары. Также, большинство исследований рассматривают зажигание хвойных пород. Необходимо уделить внимание особенностям зажигания листвы, поскольку время задержки зажигания листа значительно меньше по сравнению с хвоей. Этот факт говорит о повышенной пожарной опасности в смешанных лесах.

1.6 Горение лесных горючих материалов

После зажигания лесного горючего материала начинается реакция горения. Под горением подразумевается физико-химический процесс, для которого характерно интенсивное выделение энергии, а также тепло- и массообмен с окружающей средой [50]. Процесс горения очень часто используется в повседневной жизни человека. Однако горение лесных массивов наносит колоссальный вред окружающей среде. В данном разделе рассмотрим основные закономерности горения лесных горючих материалов.

В основе процесса горения лежит химическая реакция, которая может сопровождаться прогрессирующим самоускорением, образованием активных промежуточных продуктов, накоплением выделяющегося тепла.

В случае горения ЛГМ можно выделить следующую последовательность фаз[51]:

1. прогрев и подсушивание образца с выделением водяных паров (120°C)
2. высыхание и начало горения с выделением водяных паров и смол (260°C)
3. воспламенение газов (315-425°C) и пламенное горение, сопровождающееся выделением углекислого газа, дыма, водяных паров (650-1095°C) и т.д
4. обугливание и догорание углей ЛГМ

Данные процессы протекают во фронте лесного пожара – той части кромки, по которой наблюдается наибольшая скорость распространения лесного пожара[52]. Для атмосферы над зоной лесного пожара также характерна совокупность физико-химических процессов. Так, образовавшиеся при горении нагретые дисперсные и газообразные продукты поднимаются вверх в атмосферу, в зону пониженной температуры, где происходят процессы коагуляции частиц и конденсации влаги. Далее остывшие продукты оседают обратно на поверхность [53]. Стоит отметить, что если частицы недостаточно остыли, то они могут стать причиной нового пожара.

Процесс горения сопровождается активной передачей теплоты конвекцией, кондукцией и излучением. Помимо теплоты выбрасывается и достаточно большее количество загрязняющих веществ в атмосферу. Их количество определяется большой совокупностью факторов, таких как тип лесного пожара, тип ЛГМ, влагосодержание ЛГМ, метеоусловия, рельеф местности[51].

Рассмотрим основные свойства ЛГМ, влияющие на особенности процесса горения. Как уже было упомянуто ранее, лесные горючие материалы имеют в своем составе такие органические вещества как

целлюлоза, лигнин, гемицеллюлоза эфирные масла, смолы, таниды и т.д. Неорганическая часть состава представлена золой. Соотношение органической и неорганической составляющей в ЛГМ будет определять их способность к горению. Скорость распространения пожара напрямую зависит от класса сложения ЛГМ (от рыхлого к плотному). Наибольшая скорость характерна для хвои (200-18000 м/ч), а наименьшая для гумуса (0,015-0,5 м/ч). Теплотворная способность ЛГМ определяется величиной зольности, под которой подразумевается отношение масс золы и горючего. Теплотворная способность ЛГМ составляет порядка 20000 кДж/кг и зависит от типа материала [50]. Определение высшей и низшей теплоты сгорания также возможно по эмпирическим формулам, учитывающим содержание лигнина, влажность или элементный состав ЛГМ [54]:

$$Q_g = 17612,472 + 85,364X_l, \quad (8)$$

$$Q_n = 339,4C + 1257H - 108,9(O + N - S) - 25,1(9H + W), \quad (9)$$

где X_l – содержание лигнина,%; C, H, O, N, S – содержание соответствующих элементов, %; W – влажность, %.

Учеными отмечено, что элементный состав листьев, веточек и коры дерева напрямую зависит от типа почвы, на которой оно произрастает. Поэтому необходимо учитывать особенности климата, рельефа, загрязненности и параметров почвы при анализе реакции горения лесов [55].

Также большое значение имеет температура горения материалов. Теоретические исследования говорят о температуре около 1570-1605°C. Однако на практике температура лежит в промежутке 1070-1180°C. Различие в температурах обусловлено тепловыми потерями за счёт конвекции и излучения [50].

Очень остро стоит вопрос и о влиянии лесных пожаров на состояние атмосферы. Продукты горения существенно изменяют газовый состав атмосферы, что негативно влияет на экологическую обстановку и здоровье человека. При горении древесины и других ЛГМ довольно существенными

являются выбросы оксидов углерода в виде дымового аэрозоля. По оценкам, выход дымового аэрозоля составляет около 2-5% от массы сгоревшего ЛГМ. Высота подъёма дыма составляет порядка 2-3 километров. Также возможны завихрения конвективной струи дыма, которая будет способствовать его поднятию на 5-6 километров от места возгорания [56].

Процесс горения лесных горючих материалов также популярен в исследованиях. Изучение процесса горения позволит разработать практические рекомендации по нейтрализации данной реакции при пожаре. Так, в [57] представлены результаты экспериментального исследования распространения пламени по слою ЛГМ, принудительно воспламеняемом лучистым тепловым потоком. В качестве образцов использовались элементы опада сосны и ели, кора, листва, мох, мелкие ветки. При проведении экспериментов изучались особенности движения фронта пламени по ЛГМ различной влажности, определялась скорость распространения пламени, высота фронта пламени, коэффициент выгорания. Результаты систематизированы и сведены в таблицу. Установлено, что некоторые ЛГМ способны к самостоятельному поддержанию процесса горения (опад сосны, листва, мох), а другие являются плохими проводниками горения (опад ели, кора, мелкие ветки), которые горят только при большой тепловой нагрузке на них. Способность поддерживать пламенное горение обусловлено пористостью ЛГМ (и наличием воздуха в порах), а также размерами.

В дальнейших исследованиях [58] установлены сами особенности пламенного горения ЛГМ. Так, выяснено, что интенсивность прогрева ЛГМ и его дальнейшего пиролиза оказывают прямое влияние на высоту пламени, которая в свою очередь определяет скорость его распространения. Для каждого вида ЛГМ также свойственны особые зоны распространения пламени с характерными скоростями. Помимо проведения экспериментов в лаборатории были также проведены натурные эксперименты в реальном лесном массиве. Данные экспериментов хорошо согласуются, что позволяет

использовать полученные условия горения в системах прогноза и тушения лесных пожаров.

Помимо экспериментальных исследований также предпринимаются попытки описать процесс горения с математической точки зрения. Так, в [59] предлагается математическая модель низового пожара с учетом влияния приземного слоя на процесс горения. Моделирование осуществляется с учетом эмпирических зависимостей и усреднением по высоте слоя ЛГМ. Отмечено, что в случае малого запаса ЛГМ увеличение длины факела будет превосходить увеличение ширины противопожарного разрыва, чем в случае с большим запасом. На ширину противопожарного разрыва также оказывает влияние влагосодержание ЛГМ, условия конвективного теплообмена слоя ЛГМ с приземным слоем воздуха. Зависимости, отраженные в модели, могут быть использованы при оценке ширины противопожарных полос, скорости распространения пожара.

Также в [60] описана модель, позволяющая рассчитать и систематизировать в таблицы величину скорости распространения фронта лесного пожара от равновесной скорости ветра с учетом влагосодержания, плотности сухого органического вещества, минеральной части ЛГМ. Модель также позволяет получать картины температурных полей в зависимости от этих показателей. Модель построена на зависимостях объемных долей многофазной среды, массовых концентраций компонентов газовой фазы и температуры от времени и пространственных координат. Результаты расчета могут быть применены для усовершенствования методик прогноза пожарной опасности.

Таким образом, горение ЛГМ является достаточно сложным процессом, сопровождающимся активным выделением теплоты и продуктов сгорания. Изучение особенностей данной реакции для различных видов ЛГМ позволяет усовершенствовать системы прогноза пожарной опасности и схемы пожаротушения.

1.7 Системы и методы прогноза лесной пожарной опасности

На сегодняшний день в связи с активным ростом возгораний лесов остается актуальным вопрос о разработке и совершенствовании систем прогноза лесной пожарной опасности. Группами ученых предлагаются разные подходы к предсказанию возможного пожара с учетом различных параметров и эмпирических зависимостей. Рассмотрим наиболее распространенные методики прогноза лесной пожарной опасности.

Канадская система оценки опасности лесных пожаров CFFDRS (The Canadian Forest Fire Danger Rating System) – это всемирно известна система оценки риска пожаров в дикой природе [61]. Данная система формируется на основе различных исследований связанных с воспламенением и поведением пожаров в дикой природе на протяжении последних более чем 80 лет, и с каждым годом все больше стран (например, Франция, Индонезия, Мексика, Португалия, Испания и США) пополняет данную систему все новыми данными. Система CFFDRS включает четыре основных компонента, связь данных частей показана на рисунке 9. Система FWI (the fire weather index) и система FBP (the fire behavior prediction) являются базой при оценке лесного пожара во время оперативного принятия решений. Система AFI (the accessory fuel moisture) предоставляет ряд методов для оценки содержания влаги в различных видах лесного горючего материала в разное время суток. Риск возникновения пожара и ожидаемое количество пожаров рассматривается системой FOP (the fire occurrence prediction).

При прогнозировании система использует совокупность численных значений, характеризующих влажность подстилки ЛГМ, убыль влажности, среднее значение влажности, количество пригодного для горения ЛГМ, интенсивность и скорость распространения ожидаемого пожара. Решение систем соответствующих уравнений дает численное значение индекса пожарной опасности [62]. Данная система может оценить возможность возникновения пожара на площади в десятки и сотни тысяч гектаров. Такая

точность обусловлена большим массивом имеющихся данных, собранных на протяжении более 20 лет

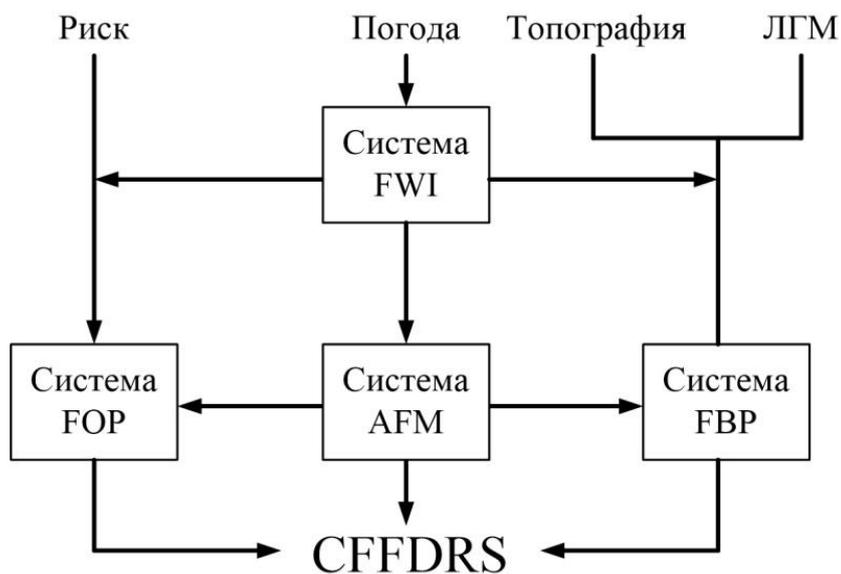


Рисунок 9 – Составляющие части CFFDRS

Эксперименты по определению эффективности данной системы в реальных условиях проведены на родине создания проекта в Канаде. Исследование проводилось в центре Британской Колумбии, где горный сосновый лубоед уничтожил 20 миллионов гектаров леса. Наблюдения за распространением пожара использованы для разработки моделей скорости распространения в соответствии с эмпирическим подходом Канадской системы оценки опасности лесных пожаров (CFFDRS). Исследовано 16 пожаров на участках леса, пострадавших от вредителя[63].

Также достаточно популярной и эффективной является Национальная система оценки пожарной опасности США (NFDRS). Эта система объединяет эффекты существующих и ожидаемых состояний отдельных факторов пожарной опасности в один или несколько качественных или числовых показателей, которые отражают потребности области в защите. Оценки пожарной опасности, как правило, отражают общие условия на обширной территории, часто десятки тысяч акров, влияющие на возникший пожар. Рейтинги могут быть разработаны для текущих (наблюдаемых) или будущих (прогнозируемых) ситуаций. Они могут использоваться для принятия

решений за два или три дня вперед (с учетом ограничений системы прогнозирования), а также для сравнения серьезности одного дня или сезона с другим. Национальная система оценки пожарной опасности – это совокупности различных факторов основанных на науке, технике и опыте, среди всего можно выделить пять основных компонентов системы [64]:

1. модели, представляющие взаимосвязи между лесным горючим материалом, погодой и топографией и их влияние на пожарную обстановку.

2. система для сбора данных, необходимых для получения рейтинговых чисел.

3. система обработки для преобразования входных данных в выходные и выполнения анализа данных.

4. система связи для обмена информацией о рейтинге пожарной опасности между предприятиями.

5. система хранения данных для исторической справки.

Рейтинг пожарной опасности представляет собой числовое масштабирование потенциала на большой площади для пожаров, при их возникновении, распространении и необходимости применения конкретных действий для подавления огня. Индекс получается путем применения локальных наблюдений за текущими или прогнозируемыми условиями ЛГМ, погодой и топографическими факторами к комплексу сложных научных уравнений. Выходные данные системы оценки пожарной опасности представляют собой числовые показатели пожарной активности, которые предоставляют инструмент, помогающий человеку, ответственному за пожарную безопасность принимать решения о дальнейших действиях.

В Европе для предсказания возгорания лесов применяется Европейская система информации о лесных пожарах (EFFIS). Она поддерживает службы, отвечающие за защиту лесов от пожаров в странах ЕС, и предоставляет службам Европейской комиссии и Европейскому парламенту обновленную и надежную информацию о пожарах в лесах Европы [65].

В настоящее время сеть EFFIS состоит из 40 стран Европы, Ближнего Востока и Северной Африки. EFFIS обеспечивает постоянный мониторинг пожарной ситуации в Европе и районе Средиземноморья, а также регулярно рассылает обновления в службы ЕС в течение всего пожароопасного сезона. Модуль EFFIS для оценки метеорологической опасности лесных пожаров создан основе канадской системы FWI, что позволяет проводить согласованную оценку ситуации с опасностью лесных пожаров в Европе и соседних странах [66].

Данная система включает себя несколько методик разных стран. Все методы представляют собой численный индекс, который увеличивается пропорционально величине пожарной опасности. Индекс рассчитывается с учетом совокупностей показателей. Так, французский метод использует значения температуры воздуха, скорости ветра, начального содержания влаги в почве, облачности, относительной влажности. Испанский метод основывается на ежедневных данных о температуре воздуха, скорости ветра, относительной влажности, освещенности солнцем, количестве осадков. Как видно, указанные методы учитывают метеорологические факторы. Эффективность методик была проверена с помощью имеющихся статистических данных о прошедших пожарах и площадях выгорания. Анализ данных показал удовлетворительное согласование модели и натуральных показателей. Численный индекс, полученный с помощью методик, соотносится со шкалой пожарной опасности, каждой уровень которой соответствует определенным практическим рекомендациям[67].

В России для мониторинга пожарной опасности активно применяется система ИСДМ-Рослесхоз. Она предполагает проведение космического мониторинга пожарной обстановки и унификации полученных данных по территории. Информация от данной системы позволяет оценивать пожарную опасность, контролировать вероятность возникновения и динамику лесного пожара, а также эффективность его ликвидации и анализ последствий.

Данные также формируют статистику о пожарах и могут быть использованы для систем инвентаризации лесных массивов [68].

Система ИСДМ-Рослесхоз состоит их подсистем, отвечающих за автоматический сбор данных, их архивацию, обработку, верификацию и её предоставление пользователю. Данные, полученные с помощью наземных и дистанционных наблюдений, регулярно сравниваются с целью повышения эффективности системы и унификации работы её подсистем [69].

Для оценки вероятности в системе предусмотрено использование детерминированно-вероятностная математическая модель, учитывающая антропогенную нагрузку и влияние природных явлений. При оценке анализируются ежедневные метеорологические данные и статистические данные о прошедших пожарах с указанием причин возгорания. Это позволяет не только оценить индекс пожарной опасности, но и оценить возможное влияние сопутствующих факторов [70]. На сегодняшний день ведутся работы по расширению функциональных возможностей данной системы и развитию её инфраструктуры.

Таким образом, в настоящее время системы прогноза пожарной опасности основываются на метеорологических сводках и статических данных о пожарах. Для повышения точности прогноза пожаров необходимо также учитывать особенности лесных горючих материалов, формирующих лесной массив.

1.8 Выводы по результатам обзора литературы

1. В области лесной пирологии нет единой системы классификации ЛГМ. Это можно объяснить как географическими особенностями (в разных странах свой особенный лесной фонд), так и целями создания классификации. Безусловно, этот факт затрудняет формализацию данных, используемых в сфере информационных технологий, препятствует унификации нормативно-справочного материала для дальнейшего применения. Значит, необходимо разработать физические основы теории классификации ЛГМ, которая будет способствовать унификации и систематизации накопленных учеными данных.

2. Исследование процесса сушки лесных горючих материалов является важным этапом в решении глобальной проблемы лесных пожаров. Связь между содержанием влаги в топливе и легкостью воспламенения может использоваться в системах оценки пожарной опасности. На данный момент проводятся исследования сушки ЛГМ при различных внешних условиях.

3. Изучение термического разложения лесных горючих материалов имеет большое значение при моделировании элемента ЛГМ. Пиролиз растений является фундаментальным шагом к выделению в окружающую среду летучих соединений, которые поддерживают воспламенение и горение ЛГМ.

4. В научной периодике имеется значительное число работ, посвященных зажиганию ЛГМ одиночной нагретой частицей металла или неметалла. Выпадение нагретых частиц является основным механизмом, в результате которого начинаются низовые лесные пожары. Это справедливо для лесных пожаров, обусловленных и грозовой активностью, и антропогенной нагрузкой. Однако, наиболее опасны верховые лесные пожары и актуально исследование процессов зажигания ЛГМ в высокотемпературной среде, которая бы имитировала воздействие фронта верхового лесного пожара.

5. Экспериментальное и математическое моделирование процесса горения лесных горючих материалов позволяет выявить ключевые особенности протекания этого процесса и его параметры при различных параметрах внешней среды и сжигаемых ЛГМ. Полученные закономерности и описанные зависимости могут быть использованы для создания новых или усовершенствования существующих систем прогноза пожарной опасности. Также знание особенностей процесса горения ЛГМ способствует поиску оптимальных схем тушения пожаров.

6. Наиболее популярные системы пожарной опасности базируются на анализе параметров окружающей лесной массив сред, а также статистические данные о произошедших ранее пожарах. Недостаточное внимание уделено особенностям лесных горючих материалов, из которых состоит массив. Их теплофизические и термокинетические свойства, способность к возгоранию и поддержанию горения также необходимо учитывать в системах прогноза, поскольку это позволит унифицировать системы, уйти от описательной основы к физическому обоснованию.

2 Объект и методы исследования

2.1 Объект исследования

Наиболее распространенным по всей лесной и лесостепной зоне европейской части России, Западной Сибири, Алтае, Северного Казахстана видом является береза бородавчатая. Именно поэтому листва от данного дерева была выбрана для исследований. Особенности данного вида березы также заключается в том, что она часто произрастает в смешанных насаждениях вместе с лиственными (осина, дуб, березой пушистая) и хвойными (сосна, ель, кедр) породами. Ранее проводимые исследования по изучению зажигание лиственных пород показали, что время задержки зажигания таких пород меньше, чем хвойных [71]. Значит, исследования механизма зажигания листвы данной породы особенно актуальны в связи с ее широким ареалом распространения.

Для данного вида березы характерны стволы длиной 30—35 м и диаметра 60—80 м. Кора белая, у основания ствола глубокотрещиноватая, черная. Зацветает в мае, когда распускаются листья. У молодого дерева ветви обычно направлены косо вверх, у более зрелого крона продолговато-цилиндрическая с длинными повислыми концами ветвей. Крона ажурная, что позволят пропускать достаточно большое количество света. Краснобурые молодые ветви обильно покрыты бородавками (смолистые железки). Листья могут иметь различную форму — от яйцевидно-ромбической до треугольно-яйцевидной. Верхушка листа длиннозаостренная, перистонервная, края двоякоострозубчатые. Черешки в 2-3 раза короче пластинки. По текстуре листья сначала клейкие, затем становятся гладкими или слегка шершавыми [71,72].

Морфологические характеристики объекта исследования: размеры типичного листа составляют 4 см в продольном направлении, 2,5 см – в поперечном (в самом широком сечении); толщина листа около 0,2 мм [72]. Типичный образец данного вида ЛГМ представлен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Лист березы бородавчатой

В работе рассматривался структурно-неоднородный лист березы, находящийся в высокотемпературной среде. Границей системы является воздух. При контакте с прогретым воздухом происходит инертный прогрев образца. Это физическое явление описывается процессом теплопередачи путем теплопроводности. Результатом исследования является распределение температур в рассматриваемом ЛГМ.

2.2 Метод конечных разностей

Наиболее применяемым численным методом решения задач в математических моделях является метод конечных разностей [73]. Суть этого метода заключается в том, что вместо производных в дифференциальном уравнении используются их конечно-разностные аппроксимации. Самое исследуемое тело представляют в виде совокупности узлов (накладывают на него конечно-разностную сетку) (рисунок 11). Аппроксимируя (заменяя) частные производные дифференциального уравнения конечными разностями получают систему линейных алгебраических уравнений для определения температуры, как локальной характеристики в каждом узле сетки. Полученная система является незамкнутой. Для её замыкания

используется разностное представление граничных условий. Полученную после данных операций замкнутую систему линейных алгебраических уравнений решают численными методами с помощью ЭВМ.

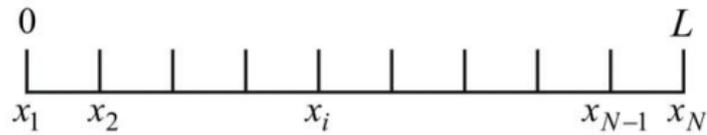


Рисунок 11 – Конечно-разностная сетка

$x_2, x_3 \dots x_{N-1}$ – координаты внутренних узлов; x_1, x_N – координаты граничных узлов

Итак, задачи решаются следующим образом:

- 1) Построение конечно-разностной сетки
- 2) Определение значения температуры в i -ом узле в момент времени

$$t = t_n = n \cdot \tau \quad (10)$$

где τ – шаг интегрирования по временной координате, n – номер шага

- 3) Замена дифференциальных операторов на их конечно-разностные аналоги
- 4) Получение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) как результат аппроксимации частных производных
- 5) Сведение полученной ранее СЛАУ к наиболее общему виду (трёхточному уравнению второго порядка)

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot T_{i-1}^{n+1} = F_i \quad (11)$$

и определить коэффициенты A_i, B_i, C_i, F_i .

При реализации данного метода решения задачи используются явные и неявные четырёхточные разностные шаблоны. При использовании неявной схемы три точки берутся на новом временном слое и одна со старого временного слоя, следовательно, температурное поле в данном случае представлено в неявной форме. Графическое изображение четырехточной схемы представлено на рисунке 12.

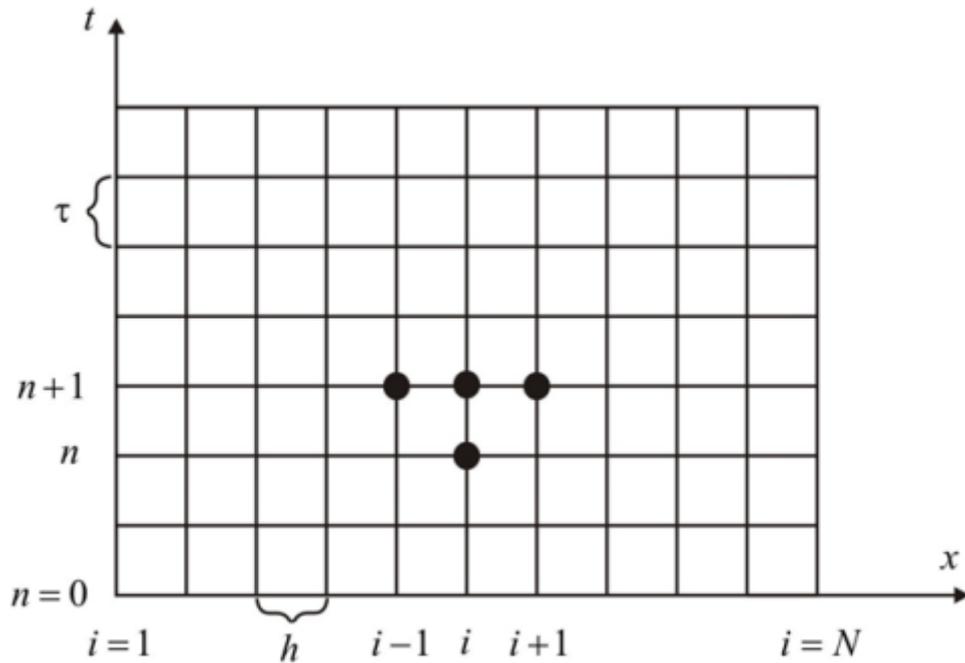


Рисунок 12 – Шаблон неявной четырехточечной разностной схемы

б) Преобразование трёхточечного уравнения к двухточечному уравнению первого порядка, имеющему вид:

$$T_{i+1}^{n+1} = \alpha \cdot T_i^{n+1} + \beta_i \quad (12)$$

7) Уменьшение индексов в уравнении из пункта б на единицу:

$$T_{i-1}^{n+1} = \alpha_{i-1} T_i^{n+1} + \beta_{i-1} \quad (13)$$

8) Подставить полученные в пунктах б и 7 уравнения в трёхточечное уравнение

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B \cdot T_i^{n+1} + C \cdot \alpha_{i-1} \cdot T_{i-1}^{n+1} + C_i \cdot \beta_{i-1} = F_i \quad (14)$$

где

$$A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}, B_i = \frac{2 \cdot \lambda}{h^2} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}, F_i = -\frac{\rho \cdot c}{\tau} T_i^n \quad (15)$$

где ρ – плотность вещества, λ – коэффициент теплопроводности вещества, c – теплоемкость вещества, h – шаг по координате.

9) Из уравнения в пункте (14) получается:

$$T_i^{n+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \cdot T_{i+1}^{n+1} + \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \quad (16)$$

Причем

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \quad (17)$$

10) Начальные коэффициенты α_1 и β_1 определяются исходя из краевых условий

11) В каждом узле разностной сетки необходимо определить значение прогоночных коэффициентов α_i и β_i . Затем, дойдя до узла N, в последнем узле определить значение температуры. После этого. Совершая обратную прогонку найти распределение температуры в области решения задачи.

Для определения температуры в каждой точке многослойного элемента (слои с разными теплофизическими характеристиками) используются следующая математическая постановка с граничными условиями (на примере двухслойной пластины):

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} & 0 < x < x^* \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} & x^* < x < L \end{cases} \quad (18)$$

$$t = 0 : T = T_0, 0 \leq x \leq L; \quad (19)$$

$$x = 0 : T = T_n, t > 0; \quad (20)$$

$$x = L : T = T_n, t > 0; \quad (21)$$

$$\begin{cases} T_1(t, x^*) = T_2(t, x^*) \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \end{cases} \quad (22)$$

Следует заметить, что для решения задачи используется граничное условие IV рода в месте контакта двух пластин. На границах $x=0$ и $x=L$ могут быть использованы граничные условия других родов. При решении используется неявная разностная схема. В процессе решения осуществляется аппроксимация дифференциального уравнения конечными разностями. Полученная при аппроксимации СЛАУ решается методом прогонки.

Прогоночные коэффициенты определяются для каждой среды и на границах сред.

При рассмотрении задачи теплопереноса в элементе, содержащем различные включения, строится математическая постановка, включающая в себя уравнения с соответствующими граничными условиями. Дискретизация этих уравнений проводится с помощью локально одномерной схемы А.А. Самарского. Решение полученной системы осуществляется методом прогонки с учетом неоднородностей в элементе. Они учитываются в прогоночных коэффициентах.

Решение включает в себя несколько этапов: вся область решения задачи делится на однородные части, для каждого такого однородного участка решится система СЛАУ. На границах участков теплофизические параметры равны среднему арифметическому параметров неоднородностей. После перехода через границу снова решается однородный участок задачи и т.д.[73]

2.3 Методика проведения эксперимента

Исследование проводилось с использованием печи НеваТерм, в канале которой температура изменялась до 1100 °С. Это максимальная температура, возможная во фронте верхового лесного пожара. Сбор материала был произведен в Тимирязевском лесничестве Томской области. Методика проведения эксперимента предполагает предварительное высушивание образца лесного горючего материала в сушильном шкафу с целью удаления влаги. Использовалась державка на подвижной основе, которая позволяла закрепить образец лесного горючего материала. Затем державка с образцом лесного горючего материала помещалась в канал печи до момента его воспламенения. С противоположной стороны канала печи устанавливалась высокоскоростная камера, которая позволяла проводить запись процесса воспламенения листовой пластины в канале печи. Камера была связана с персональным компьютером, на который передавался видеоряд. Было

проведено по шесть опытов с идентичным листом (по форме, размерам и толщине) при одной и той же температуре в канале печи. Все опыты проведены согласно описанной выше методике. Схема экспериментальной установки продемонстрирована на рисунке 13.

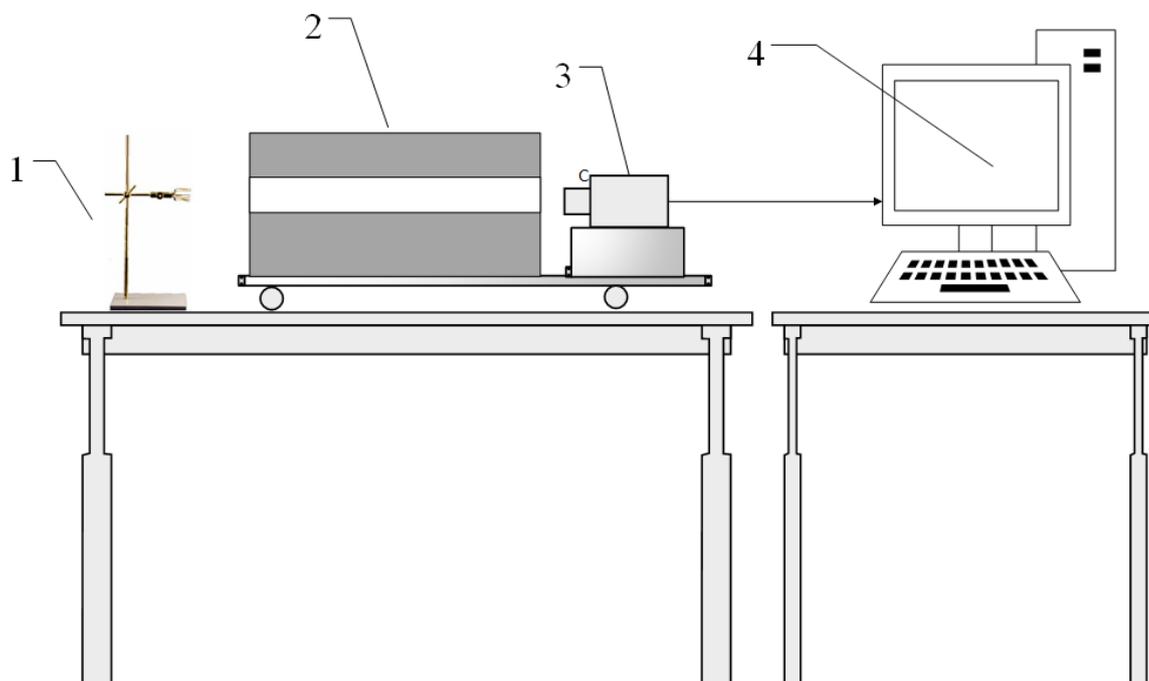


Рисунок 13 – Схема экспериментальной установки:

1 – державка на подвижной основе, 2 – печь с каналом, 3 – высокоскоростная камера 4 – персональный компьютер

Проведена статистическая обработка результатов опытов по зажиганию березового листа высокотемпературной средой. На рисунке 15 представлена зависимость времени задержки зажигания березового листа от температуры в канале печи. Приведены доверительные интервалы, рассчитанные с доверительной вероятностью $P=0,95$ [74].

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Б5Б	Кириенко Виктории Андреевне

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов, амортизационные отчисления, заработная плата научного руководителя и инженера</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Нормы амортизации, нормы премии по счету заработной платы.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Ставка по отчислениям во внебюджетные фонды.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Планирование работ научного исследования</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Составление бюджета НИР</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Анализ критериев ресурсоэффективности</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

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

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора Игнат Валерьевич	к.э.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б5Б	Кириенко Виктория Андреевна		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время основным критерием оценки перспективности научного открытия является коммерческая ценность разработки, поскольку затруднительно на первых этапах жизненного цикла оценить масштабность проекта. Коммерческая ценность предполагает не только более совершенные технические характеристики продукта по сравнению с уже имеющимися на рынке, но и ответ на вопросы о стоимости, востребованности, бюджете проекта, сроках выхода на рынок.

Цель данного раздела – проектирование и создание конкурентоспособной разработки, технологии, отвечающей современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Для достижения этой цели нужно решить следующие задачи:

1. оценить коммерческий потенциал и перспективы проведения исследования
2. осуществить планирование научно-исследовательской работы
3. определения эффективности исследования

4.1 Оценка конкурентоспособности разработки

Исследование посвящено изучению процесса тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала под воздействием высокотемпературной среды. Оценка конкурентоспособности проведем с помощью технологии QuaD[78]. Технология представляет собой инструмент измерения характеристик, описывающих качество разработки, перспективы на рынке, целесообразность вложения в неё средств. Результаты оценки приведем в виде таблицы 8.

Таблица 8 – QuaD анализ разработки

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
Энергоэффективность	0,06	90	100	0,9	5,4
Надежность	0,05	70	100	0,7	3,5
Унифицированность	0,12	50	100	0,5	6
Потребность в ресурсах памяти	0,05	90	100	0,9	4,5
Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,12	45	100	0,45	5,4
Простота эксплуатации	0,05	70	100	0,7	3,5
Качество интеллектуального интерфейса	0,05	80	100	0,8	4

Продолжение таблицы 8

Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
Конкурентоспособность продукта	0,15	70	100	0,7	10,5
Уровень проникновения на рынок	0,05	70	100	0,7	3,5
Перспективность рынка	0,06	80	100	0,8	4,8
Цена	0,07	80	100	0,8	5,6
Послепродажное обслуживание	0,05	90	100	0,9	4,5
Финансовая эффективность научной разработки	0,04	90	100	0,9	3,6
Срок выхода на рынок	0,04	80	100	0,8	3,2
Наличие сертификации разработки	0,04	40	100	0,4	1,6
Итого	1				69,6

Оценку качества и перспективности по технологии QuaD можно определить по следующей формуле:

$$P_{cp} = \sum V_i \cdot B_i,$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Определив значения показателя P_{cp} , можно судить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Значение показателя $P_{cp} = 69,6$. Это значит, что рассматриваемое исследование обладает перспективностью выше среднего значения, и для дальнейшего улучшения необходимо инвестирование в работу.

4.2 SWOT-анализ разработки

Проведение SWOT-анализа позволяет комплексно оценить научно-исследовательской разработки, изучить внутреннюю и внешнюю среду проекта.

SWOT-анализ проводится в три этапа. Первый этап предполагает выявление сильных и слабых сторон разработки через видимые возможности и угрозы, которые могут появиться во внешней среде. Второй этап определяет соответствие сильных и слабых сторон разрабатываемого проекта внешним условиям окружающей среды[78]. На третьем этапе составляется итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в данном разделе в таблице 9.

Таблица 9 – SWOT-анализ проекта

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	С1: Бесплатное программное обеспечение для математического моделирования	Сл1: Отсутствие прототипа научной разработки.
	С2: Наличие экспериментальной базы.	Сл2: Высокая стоимость программного обеспечения и оборудования для проведения экспериментов.
	С3: Наличие бюджетного финансирования.	Сл3: Отсутствие инжиниринговой компании, способной осуществить разработку модели.
	С4: Квалифицированный персонал.	
	С5: Малые трудовые ресурсы.	

		Сл4:Результаты исследования не были ранее опубликованы и оценены научным сообществом
<p>Возможности:</p> <p>В1:Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В2:Появление дополнительного спроса на данный продукт.</p> <p>В3:Повышение стоимости конкурентах разработок.</p> <p>В4: Улучшение методов моделирования</p>	<p>Описанные сильные стороны проекта позволяют осуществить возможности. Так, использование вычислительных мощностей и кадров ТПУ, позволит ускорить вычисления и повысить их качество, способствует повышению качества конечного продукта. Наличие бюджетного финансирования и способствует покупке более качественного оборудования для проведения экспериментов. Так как при создании математической модели используются</p>	<p>Слабые стороны, такие как высокая стоимость оборудования и отсутствие прототипа модели могут существенно затянуть сроки проекта, поскольку необходимо время для разработки качественного прототипа и методики эксперимента, а также для согласования финансовых вопросов.</p>

	экспериментальные данные для сравнения полученных результатов, то конечный продукт более качественный, что увеличит спрос.	
<p>Угрозы:</p> <p>У1: Отсутствие спроса на новые природоохранные технологии.</p> <p>У2: Введение дополнительных требований к программному обеспечению.</p> <p>У3: Несвоевременное финансирование проекта</p>	<p>Основная угроза проекта видится в отсутствии интереса на природоохранные технологии со стороны не государственных компаний, которые могут быть не востребованы при прогнозировании пожароопасной обстановки на территории России. Однако министерство по чрезвычайным ситуациям (МЧС России), заинтересовавшись данной разработкой, может внести данную разработку в реестр своих трат, и обеспечить финансирование проекта</p>	<p>Отсутствие достаточной базы знаний у людей, которые могут осуществить инвестирование данного проекта из-за новизны разработки, служит весомым фактором в неосознанности актуальности данной проблемы. Из-за чего финансовая составляющая работы будет не найдена и проект может быть заморожен</p>

Выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод о том, что у данного проекта существует масса преимуществ, основным из которых является дальнейшая перспектива прогнозирования пожара лесного массива задолго до видимых причин к его возникновению.

Основной сложностью данного проекта видится незаинтересованность не только частных лиц, но и государства в данной работе, что приведет к окончанию разработки модели.

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Данная часть экономического раздела выпускной квалификационной работы направлено на определение основных свойств совершаемых работ [78]:

- 1) Определение структуры работ в рамках научного исследования;
- 2) Определение участников каждого пункта работ;
- 3) Определение продолжительности работ;
- 4) Построение графика продолжительности проведенных работ.

Для начала определим перечень этапов, работ и распределим исполнителей на каждом этапе. Планирование проведение работ позволит разграничить обязанности каждого из исполнителей проекта, рассчитать заработную плату работников, а также гарантирует реализацию проекта в срок.

Основные задачи распределяются между двумя исполнителями проекта: руководителем проекта и инженером. Последовательность и содержание работ, а также распределение исполнителей представлено в таблице 10.

Таблица 10 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель проекта
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение теоретического материала по данной теме	Инженер
	3	Выбор направления исследований	Руководитель проекта, инженер
	4	Составление календарного плана работ	Руководитель проекта, инженер
Проведение исследование	5	Создание расчетной модели	Инженер
	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер
	7	Проведение экспериментального исследования	Инженер
	8	Анализ результатов и сопоставление теоретических и экспериментальных исследований	Инженер

Продолжение таблицы 11

Обобщение и оценка результатов	9	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер
Контроль и координирование проекта	10	Контроль качества выполнения проекта и консультирование инженера	Руководитель проекта
Оформление отчета по НИР	11	Составление пояснительной записки	Инженер

По результатам составления данной таблицы можно сделать вывод о том, что проект содержит 11 этапов, большую часть из которых выполняет инженер.

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Так как основной частью стоимости разработки проекта состоит из трудовых затрат, то очень важно определить трудоемкость работ каждого из участников проекта.

Определить ожидаемое (среднее) значение трудоемкости возможно по следующей формуле:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \text{ чел. – дн.},$$

где t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, чел.–дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, чел.–дн.;

Основываясь на ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях, учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Проведение данного расчета необходимо для обоснованного расчета заработной платы.

Продолжительность одной работы определяется по формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \text{ раб. дн.},$$

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

Для удобства построения графика продолжительности работ, длительность каждого из этапов работ следует перевести в календарные дни.

Для осуществления данного перевода существует следующая формула:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_k, \text{ к. дн.},$$

где k_k – коэффициент календарности, расчет которого осуществляется по следующей формуле:

$$k_k = \frac{T_k}{T_k - T_{вых} - T_{пр}},$$

где T_k – количество календарных дней в году;

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

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

В качестве примера приведем расчет для работы №1 «Составление и утверждение технического задания», выполнение которой осуществляет руководитель проекта

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости:

$$t_{ожi} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 7}{5} = 4 \text{ чел. - дн.}$$

Продолжительность одной работы определяется по формуле:

$$T_{pi} = \frac{4}{1} = 4 \text{ раб. дн.}$$

Для расчета коэффициента календарности примем, что руководитель проекта работает по шестидневной рабочей неделе, тогда:

$$k_k = \frac{365}{365 - 51 - 15} = 1,22.$$

Инженер работает по пяти дневной рабочей неделе, тогда:

$$k_k = \frac{365}{365 - 102 - 15} = 1,47.$$

Расчет количества календарных дней:

$$T_{ki} = 4 \cdot 1,22 \approx 5 \text{ к. дн.}$$

Для наглядности и простоты построения диаграммы Ганта занесем рассчитанные значения для каждого вида работ каждым исполнителем (руководитель проекта (Р) и инженер (И)) в таблицу 12. На основании данной таблицы построим календарный план-график (диаграмму Ганта), представленную на рисунке 37.

Таблица 12 – Временные показатели проведения работ

№ раб	Название работы	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих дня		Длительность работ в календарных дня	
		$t_{\min i}$, чел.-дн.		$t_{\max i}$, чел.-дн.		$t_{\text{ож}i}$, чел.-дн.		Р	И	Р	И
		Р	И	Р	И	Р	И				
1	Составление и утверждение технического задания	2	0	7	0	4	0	4	0	5	0
2	Подбор и изучение теоретического материала по данной теме	0	11	0	21	0	15	0	15	0	22
3	Выбор направления исследований	2	2	7	7	4	4	2	2	2	3
4	Составление календарного плана работ	2	2	7	7	4	4	2	2	2	3
5	Создание расчетной модели	0	3	0	8	0	5	0	5	0	7
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	0	4	0	9	0	6	0	6	0	9

Продолжение таблицы 12

7	Проведение экспериментального исследования	0	1	0	6	0	3	0	3	0	4
8	Анализ результатов и сопоставление теоретических и экспериментальных исследований	0	8	0	18	0	12	0	12	0	18
9	Оценка эффективности полученных результатов	0	5	0	10	0	7	0	7	0	10
10	Контроль качества выполнения проекта и консультирование инженера	2	0	7	0	4	0	4	0	5	0
11	Составление пояснительной записки	0	6	0	11	0	8	0	8	0	12

Рисунок 37 – Календарный план-график проведения проекта

№ раб.	Название работы	Исп.	Тк, дн	Февраль				Март				Апрель				Май			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Составление и утверждение технического задания	Р	5	■															
2	Подбор и изучение теоретического материала по данной теме	И	22	■	■	■	■												
3	Выбор направления исследования	Р	2					■											
		И	3					■											
4	Составление календарного плана работ	Р	2					■											
		И	3					■	■										
5	Создание расчетной модели	И	7						■	■									
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	И	9							■	■								
7	Проведение экспериментального исследования	И	4								■	■	■	■					
8	Анализ результатов и сопоставление теоретических и экспериментальных исследований	И	18									■	■	■	■				
9	Оценка эффективности полученных результатов	И	10											■	■				
10	Контроль качества выполнения проекта и консультирование инженера	Р	5													■			
11	Составление пояснительной записки	И	12														■	■	■

На основании построенного графика продолжительности реализации проекта можно заключить, что продолжительность работ по выполнению задания составит около 14 недель. Начало разработки проекта намечено на первую неделю февраля, а окончание на третью неделю мая.

Значение реальной продолжительности работ может быть как меньше (при благоприятных обстоятельствах) посчитанного значения, так и больше (при неблагоприятных обстоятельствах), так как трудоемкость носит вероятностный характер.

Общая длительность выполнения проекта в календарных днях составит 98 дней, из них инженер проработает 88 дней, а руководитель проекта 15 дней.

4.3.3 Бюджет затрат на проектирование

При планировании бюджета проекта необходимо учесть все виды расходов, которые связаны с его выполнением. Для формирования бюджета проекта используется следующая группа затрат [78]:

- 1) – материальные затраты проекта;
- 2) – затраты на оборудование;
- 3) – основная заработная плата исполнителей проекта;
- 4) – дополнительная заработная плата исполнителей проекта;
- 5) – отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- 6) – накладные расходы.

4.3.3.1 Расчет материальных затрат проекта

К материальным затратам относятся: приобретаемые со стороны сырье и материалы, покупные материалы, канцелярские принадлежности, картриджи и т.п. Список материальных затрат приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за единицу, руб	Затраты на материалы З _м , руб.
Краска для принтера	шт.	1	550	550
Бумага для принтера формат А4 (500 листов)	пачка	2	210	420
Ручка шариковая	шт.	6	40	240
Карандаш	шт.	2	30	60
Итого				1270

В сумме материальные затраты составили 1270 рублей. Цены приняты средние по городу Томск.

4.3.3.2 Расчет затрат на амортизацию специального оборудования для научных (экспериментальных) работ

Амортизация – процесс переноса стоимости оборудования на созданную при его участии продукцию и создание источника для простого производства [78].

К амортизируемому оборудованию относится оборудование, используемое для реализации данного проекта с первоначальной стоимостью более 10000 руб.

В качестве специального оборудования, стоимость которого необходимо амортизировать выступает печь, стоимость которой 150000 рублей, высокоскоростная камера, со стоимостью 250000 рублей, персональный компьютер, цену которого принимаем 30000 рублей.

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$Z_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.}}}{T_{\text{к.}}} \cdot Ц \cdot \frac{1}{T_{\text{сл.}}}, \text{руб./год,}$$

где $T_{\text{исп.}}$ – время использования оборудования, дней;

$T_{\text{к.}}$ – календарное время, принимается равным 365 дней;

$Ц$ – цена оборудования, руб.;

$T_{\text{сл.}}$ – срок службы оборудования, принимаем равным 5 лет;

Таким образом, амортизационные затраты на печь составляют:

$$Z_{\text{ам.п}} = \frac{4}{365} \cdot 150000 \cdot \frac{1}{5} = 328,8 \text{ руб./год,}$$

Амортизационные затраты на высокоскоростную камеру составляют:

$$Z_{\text{ам.кам.}} = \frac{4}{365} \cdot 250000 \cdot \frac{1}{5} = 547,9 \text{ руб./год,}$$

Амортизационные затраты на персональный компьютер составляют:

$$Z_{\text{ам.пк}} = \frac{98}{365} \cdot 30000 \cdot \frac{1}{5} = 1611 \text{ руб./год,}$$

Суммарные амортизационные затраты на оборудование составляют:

$$Z_{\text{ам}} = Z_{\text{ам.п}} + Z_{\text{ам.кам.}} + Z_{\text{ам.пк}}, \text{руб./год,}$$
$$Z_{\text{ам}} = 328,8 + 547,9 + 1611 = 2487,4 \text{ руб./год,}$$

Основная и дополнительная заработная плата исполнителей проекта

Статья включает в себя основную и дополнительную заработную плату

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \text{руб.}$$

Основная заработная плата для руководителя проекта и инженера рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \text{руб.,}$$

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \text{руб.,}$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 рабочих дня $M = 11,2$ месяца – пятидневная неделя;

при отпуске в 48 рабочих дня $M = 10,4$ месяца – шестидневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени работников, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \text{ руб.},$$

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

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_d – коэффициент доплат и надбавок, принимаем 0,2;

k_p – районный коэффициент, для города Томска равен 1,3;

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \text{ руб.},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, принимаем равным 0,135.

При расчете заработной платы каждого участника проекта оклады взяты в соответствии с занимаемыми должностями ТПУ.

Расчет заработной платы руководителя проекта, работающего по шестидневной рабочей неделе:

$$Z_M = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.},$$

$$Z_{дн} = \frac{51285 \cdot 10,4}{365 - 66 - 56} = 2194,9 \text{ руб.},$$

$$Z_{осн} = 2194,91 \cdot 15 = 32923,7 \text{ руб.},$$

$$Z_{доп} = 0,135 \cdot 32923,7 = 4444,7 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{зп}} = 32923,7 + 4444,7 = 37368,4 \text{ руб.}$$

Расчет заработной платы инженера проекта, работающего по пятидневной рабочей неделе:

$$Z_{\text{м}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.,}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{365 - 117 - 28} = 1687,6 \text{ руб.,}$$

$$Z_{\text{осн}} = 1687,6 \cdot 88 = 148508,8 \text{ руб.,}$$

$$Z_{\text{доп}} = 0,135 \cdot 148508,8 = 20048,7 \text{ руб.,}$$

$$Z_{\text{зп}} = 148508,8 + 20048,7 = 168557,5 \text{ руб.}$$

Результаты расчета заработной платы для руководителя и инженера проекта приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет заработной платы участников проекта

Исполнитель проекта	$Z_{\text{тс}}$, руб.	$Z_{\text{м}}$, руб.	$Z_{\text{дн}}$, руб	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб	$Z_{\text{доп}}$, руб	$Z_{\text{зп}}$, руб
Руководитель	26300	51285	2194,9	15	32923,7	4444,7	37368,4
Инженер	17000	33150	1687,6	88	148508,8	20048,7	168557,5

В результате данных расчетов посчитана основная заработная плата у исполнителей проекта. Из таблицы 14 видно, что ставка руководителя наибольшая, но итоговая основная заработная плата получилась наибольшей у инженера, так как основная заработная плата зависит от длительности работы проекта.

4.3.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды включают в себя установленные законодательством Российской Федерации нормы органов государственного социального страхования (ФСС), пенсионный фонд (ПФ) и медицинское страхование (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величину отчислений во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \text{руб.},$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На 2019 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ вводятся пониженные тарифы страховых взносов для отдельных категорий плательщиков (для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность) в переходный период 2011 – 2027 годов равный 28 %.

Таким образом, отчисления во внебюджетные фонды для руководителя проекта составят:

$$З_{\text{внеб}} = 0,28 \cdot (32923,7 + 4444,7) = 10463,2 \text{ руб.},$$

Отчисления во внебюджетные фонды для инженера проекта составят:

$$З_{\text{внеб}} = 0,28 \cdot (148508,8 + 20048,7) = 47196,1 \text{ руб.}$$

4.3.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы включают прочие затраты организации, которые не учтены в предыдущих статьях расходов: оплата услуг связи, электроэнергии, интернета и т.д. Накладные расходы проекта определяются по формуле:

$$З_{\text{накл}} = (З_{\text{м}} + З_{\text{об}} + \Sigma З_{\text{осн}} + \Sigma З_{\text{доп}} + \Sigma З_{\text{внеб}}) \cdot k_{\text{нр}}, \text{руб.},$$

$k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы, принимаем в размере 16 %.

$$\begin{aligned} З_{\text{накл}} &= (1270 + 2487,4 + 181432,5 + 24493,4 + 57659,3) \cdot 0,16 \\ &= 42774,8 \text{ руб.} \end{aligned}$$

4.3.3.5 Формирование затрат на проектирование

Определение бюджета затрат на проект приведено в таблице 15.

Таблица 15 – Бюджет затрат на проект

№	Наименование статьи	Сумма, руб.	В % к итогу
1	Материальные затраты проекта	1270	0,4
2	Затраты на оборудование	2487,4	0,8
3	Затраты по основной заработной плате	181432,5	58,5
4	Затраты по дополнительной заработной плате	24493,4	7,9
5	Отчисления во внебюджетные фонды	57659,3	18,6
6	Накладные расходы	42774,2	13,8
Бюджет затрат на проектирование		310105,8	100,00

Суммарный бюджет проекта равен 310105,8 рублей, где наибольший процент бюджета составляют затраты на покрытие основное заработной платы исполнителей в размере 181432,5 рублей или 58,51% к общей сумме бюджета.

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

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

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

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

Оценка ресурсоэффективности проводится для двух различных вариантов выполнения поставленной задачи. Первым вариантом исполнения является вариант с использованием программного продукта «Pascal». Вторым – с использованием «Ansys Fluent».

Отличие максимальной стоимости исполнения от стоимости i -го варианта обусловлено тем, что могут возникнуть дополнительные материальные затраты на приобретение ПО, если площадка, на которой проводится данное исследование, не обладает соответствующей лицензией.

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{310105,8}{400000} = 0,7753,$$

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}2} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{310105,8}{400000} = 0,7753.$$

В ходе оценки проекта с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения определяется его интегральный показатель ресурсоэффективности, позволяющий установить направление его дальнейшего улучшения и осуществления. Для этого были выбраны несколько критериев эффективности:

- 1) Технологичность;
- 2) Надежность;

- 3) Удобство в эксплуатации;
- 4) Экономичность;
- 5) Гибкость.

Определение ресурсоэффективности происходит на основе интегрального показателя ресурсоэффективности

$$I_{pi} = \Sigma(a_i \cdot b_i),$$

где a_i – весовой коэффициент проекта;

b_i – бальная оценка проекта, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

В таблице 16 наглядно показана значимость каждого критерия для данного проекта.

Таблица 16 – Сравнительная оценка характеристик разрабатываемого проекта

Критерий	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки	
		Исп. 1	Исп. 2
Технологичность	0,21	5	5
Надежность	0,12	4	3
Удобство в эксплуатации	0,23	5	4
Экономичность	0,14	4	4
Гибкость	0,3	5	4

Показатель ресурсоэффективности проекта в двух исполнениях

$$I_{p1} = 0,21 \cdot 5 + 0,12 \cdot 4 + 0,23 \cdot 5 + 0,14 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 = 4,74.$$

$$I_{p2} = 0,21 \cdot 5 + 0,12 \cdot 3 + 0,23 \cdot 4 + 0,14 \cdot 4 + 0,3 \cdot 4 = 4,09.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{pi}}{I_{\text{фин.}i}}$$

$$I_{\text{исп.}1} = \frac{4,74}{0,7753} = 6,11;$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{4,09}{0,7753} = 5,27;$$

С целью определения наиболее целесообразного варианта из предложенных сравним интегральные показатели эффективности вариантов исполнения разработки и определим сравнительную эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$)

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}},$$
$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{6,11}{5,27} = 1,16.$$

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволило понять, что более эффективным вариантом решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является выполнение работы по первому исполнению.

4.5 Заключение по разделу

В результате выполнения данного раздела выпускной квалификационной работы определены сильные и слабые стороны проекта, выявлены его угрозы и сильные стороны.

Построен календарный план-график проведения работ каждого исполнителя проекта. Общее количество дней на выполнение проектных работ составляет 98 дней. Затраты на проектирование составили 310105,8 рублей.

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволило понять, что более эффективным вариантом решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является выполнение работы по первому исполнению.

На основании полученных результатов данного раздела делаем вывод о том, что данный проект является экономически целесообразным и успешным.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Б5Б	Кириенко Виктории Андреевне

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	И.Н. Бутакова
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

Исследование тепломассопереноса при воспламенении типичного лесного горючего материала в высокотемпературной среде	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является процесс тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. 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.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– Поражение электрическим током – Возгорание – Недостаток естественного света – Повышенная температура воздуха в помещении – Шум – Воздействие электромагнитного поля
3. Экологическая безопасность:	Вторичное использование и утилизация офисной техники
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Наиболее вероятный тип ЧС – пожар

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сотникова Анна Александровна	–		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б5Б	Кириенко Виктория Андреевна		

5 Социальная ответственность

В рамках выпускной квалификационной работы рассматриваются особенности тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала, помещенного в высокотемпературную среду. В качестве объекта исследования рассматривался довольно распространенный лесной горючий материал – лист березы.

Закономерности тепломассопереноса выявлялись на основе математического и экспериментального моделирования. При проведении экспериментов наглядно исследовались особенности зажигания образца и фиксировались времена задержки зажигания для различных температур среды. Математическое моделирование позволило провести визуализацию температурного поля листа с течением времени. Данная работа востребована среди организаций, занимающихся прогнозом и предотвращением природных катастроф, поскольку результаты исследования позволят усовершенствовать системы прогноза лесной пожарной опасности. Так как основная задача автора ВКР заключалась в моделировании процессов и обработке экспериментальных данных, то ниже будет приведена необходимая информация о социальной ответственности человека, работающего с ПЭВМ.

Безусловно, проведение любого исследования влечёт за собой вопрос о его актуальности, социальной значимости и ответственности. В данном случае применение результатов исследования поможет сократить ущербы от лесных пожаров. Однако необходимо учитывать и угрозы, возникающие для человека при проведении исследования. Цель данного раздела – оценка возможных факторов риска и методов их предотвращения при проведении исследования.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Для каждой отрасли установлены свои требования по организации рабочих мест с учетом специфики трудовой функции, выполняемой работниками. Требования установлены к помещениям, в которых находятся рабочие места, к вентиляции и отоплению таких помещений. Определенным требованиям должна отвечать освещенность рабочих мест, а также их оснащенность оборудованием и инструментом.

Так как изучение процесса тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала проводилось с использованием компьютера (построение математической модели, просмотр и обработка экспериментальных значений), то рабочая зона должна быть оборудована в соответствии с требованиями для рабочих мест с ПЭВМ. В Российской Федерации данные требования регламентируются Трудовым кодексом, «Гигиеническими требованиями к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03), «Типовой инструкцией по охране труда при работе на персональном компьютере» (ТОИ Р-45-084-01).

Обратим внимание на особенности компоновки для рабочего места, оборудованного персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ). В соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) Рабочее место должно располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, преимущественно слева.
- 2) Искусственное освещение в помещениях для работы ПК должно обеспечиваться общей равномерной системой освещения.
- 3) В качестве источников искусственного освещения следует использовать люминесцентные лампы типа ЛБ и компактные люминесцентные лампы (КЛЛ).
- 4) При устройстве отраженного освещения в производственных и административных общественных помещениях разрешено использовать

металлогалогенные лампы. В светильниках местного освещения должны использоваться лампы накаливания, в том числе галогенные. Для того, чтобы обеспечить нормируемые значения освещенности в помещении с ПЭВМ должны проводиться уборки с чисткой стеклянных окон и светильников не реже двух раз в год. Окна в комнатах, в которых работают с компьютерами должны быть предпочтительно ориентированы на север и северо-восток.

5) Монитор, корпус компьютера и клавиатура должны находиться прямо перед оператором; высота рабочего стола с клавиатурой должна находиться в пределах от 680 до 800 мм надо уровнем пола, а высота нижней границы экрана от 900 до 1280 мм.

6) Монитор следует расположить на расстоянии 60-70 см на 20 градусов ниже уровня глаз оператора.

7) Пространство для ног должно отвечать следующим требованиям: высота – не менее 600 мм, ширина – не менее 500 мм, глубина – не менее 450 мм. Следует также предусмотреть подставку для ног работающего шириной не менее 300 мм с возможностью регулировки угла наклона. При работе ноги должны быть согнуты под прямым углом.

Следует отметить, что нормативными документами также предусмотрены промежутки времени для перерыва. Время перерыва зависит от вида и сложности осуществляемой работы путем деления на группы. Выделяют 3 группы: А (работа по считыванию информации с экрана компьютера с предварительным запросом), Б (работа по вводу информации), В (творческая работа в режиме диалога с компьютером). В целом, при работе за компьютером рекомендуется делать перерывы продолжительностью 10 минут через каждые 50 минут работы, а продолжительность непрерывной работы за компьютером должна составлять более 2 часов [79].

5.2 Производственная безопасность

Исследование теплопереноса при воспламенении типичного лесного горючего материала в высокотемпературной среде в основном связано с моделированием, то есть работа ведется за персональным компьютером, из-

за чего могут возникнуть различные факторы, влияющие на жизнь и здоровье человека (таблица 17).

Таблица 17 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разраб отка	Изгото вление	Эксплу атация	
1. Отсутствие или недостаток естественного света	+			– Требование к освещению рабочего места – СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03.
2.Повышенная температура воздуха в помещении	+			– Требование к микроклимату в помещении – СанПиН 2.2.4.548-96.
3.Превышение уровня шума	+			Требования к шуму в помещении – ГОСТ 12.1.003-83.
4.Воздействие электромагнитного поля	+			– Требования к излучению ЭМ полем – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.
5.Поражение электрическим током	+			– Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. – ГОСТ 12.1.038-82.
6. Возгорание	+			– Пожарная безопасность. Общие требования – ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т

Обеспечение комфортных условий труда особенно влияют на производительность труда и снижение профессиональных заболеваний. К ним относятся меры, связанные с исключением травматизма, антисанитарии и возгораний [80].

5.2.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов

В рамках данного раздела проанализируем основные особенности и влияние вредных производственных факторов на человека, выполняющего работу над проектом. К таким фактором относятся:

1. Недостаток естественного света

Одной из причин ухудшения самочувствия и здоровья рабочего может быть недостаток естественного света. Например, недостаток света приводит к

потере сна и ухудшению здоровья человека. Из чего следует логичный вывод, необходимо уделять особое внимание вопросу наличия естественного света на рабочем месте.

Согласно санитарно-гигиеническим требованиям рабочее место инженера должно освещаться естественным и искусственным светом.

При работе за персональным компьютером и работе с необходимой документацией минимальная искусственная освещенность рабочего места должна составлять 200 лк [81]. В данных условиях разряд зрительной работы – 4г (работа средней точности) [82]. Согласно [83], к рабочим местам, оборудованным персональным компьютером, применяются следующие требования (таблица 18).

Таблица 18 – Требования к освещению рабочего места, оборудованного ПК

Параметр	Значение параметра
Освещенность на рабочем столе, лк	300-500
Освещённость на экране, лк	не выше 300
Блики на экране, кд/м ²	не выше 40
Прямая блёскость источника света, кд/м ²	200
Показатель ослеплённости	не более 20
Показатель дискомфорта	не более 15
Отношение яркости между рабочими поверхностями	3:1-5:1
Отношение яркости между поверхностями стен и оборудования	10:1
Коэффициент пульсации, %	не более 5

2. Повышенная температура воздуха в помещении

Состояние микроклимата в рабочем помещении нормируется согласно [84]. Согласно классификации, работу, связанную с исследованием лесного пожара, которая включает работу за компьютером и изучение литературы, можно отнести к классу *Ia* - работа с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт), производимая сидя и сопровождающаяся незначительным

физическим напряжением. Таким образом, параметры микроклимата для данной категории работ должны соответствовать требованиям, представленным в таблице 19.

Таблица 19 – Допустимы параметры микроклимата рабочего помещения

Сезон года	Категория тяжести работ	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/сек
Холодный	Ia	(20÷25)	(15÷75)	0,1
Теплый		(21÷28)	(15÷75)	0,1

3. Шум

Шум может так же оказывать негативное влияние на организм человека. Данное раздражающее влияние из-за длительного воздействия может быть причиной учащенного пульса, дыхания, повышения артериального давления, возникновения головных болей, ослабления внимание и замедляются психические реакции, что в конечном итоге приводит к снижению работоспособности. В качестве источников шума можно выделить работу вытяжки при проведении экспериментальной части исследования, работу различных механизмов офисной техники, посторонний шум с улицы, из-за неплотно закрытого окна.

Для категории тяжести работ *Ia* уровень шума на рабочем месте трудящегося не должен превышать 50 Дб [85].

4. Электромагнитное поле

Главным источником электромагнитного поля, воздействующего на человека, является его главный рабочий инструмент – персональный компьютер. Электромагнитное поле своим воздействием может быть причиной учащенного пульса, дыхания, повышения артериального давления, возникновения головных болей, ослабления внимания и замедления реакции, что снижает работоспособности человека.

Электромагнитное поле, создаваемое персональным компьютером, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот от 0 Гц до 1000 МГц, и в том числе мощность экспозиционной дозы мягкого рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана при любых положениях ПК не должна превышать 100 мкР/ч [86]. Таким образом, время работы по санитарным нормам не должно превышать 4 часа.

5. Электробезопасность на рабочем месте

Поражение персонала электрическим током, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках. Все производственные помещения можно разделить на три категории по опасности поражения электрическим током [87]:

- Помещения с повышенной опасностью;
- Особо опасные помещения;
- Без повышенной опасности.

Помещение, в котором установлен ПЭВМ для моделирования относится к третьей группе помещений – помещение без повышенной опасности.

6. Пожаробезопасность на рабочем месте

Пожар относится к непреднамеренной чрезвычайной ситуации техногенного характера, так как связан с техническими объектами, в частности с ПЭВМ. [88]

Пожаробезопасность в производственном помещении предполагает сохранение материальных ценностей, жизни и здоровья людей от неконтролируемого процесса горения. Для определения способов осуществления пожаробезопасности необходимо определить категории помещений определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений и помещений и

характеристик проводимых в них технологических процессов [89]. Таким образом, рабочее помещение с персональным компьютером для моделирования можно отнести к классу Д – пониженная пожароопасность, так как в помещении находятся негорючие веществ и материалы в холодном состоянии.

5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия

Помимо анализа возможных вредных факторов необходимо разработать практические рекомендации, способствующие снижению негативного воздействия этих факторов на человека. Рассмотрим основные рекомендации и мероприятия в соответствии с выделенными ранее факторами:

1. Недостаток естественного света

Проблему отсутствия или недостатка естественного света на рабочем месте можно решить, используя следующие пункты [81]:

1) улучшение условий путем использования искусственного освещения;

2) защита временем, то есть сокращение продолжительности пребывания работников в помещении без естественного освещения;

3) профилактическое ультрафиолетовое облучение работников. В этом случае источники ультрафиолетового излучения устанавливаются рядом с обычными осветительными лампами, за счет чего достигается обогащение обычного искусственного освещения ультрафиолетовым излучением.

4) анализ степени загрязненности стекол в светопроемах, их очистка и дальнейшие контрольные измерения коэффициента естественной освещенности, который показывает, какая часть наружного освещения попадает на рабочие места производственного помещения;

5) при наличии в помещении зон с недостаточным и достаточным уровнем естественного освещения изменение размещения рабочих мест с их переносом в зону с достаточным уровнем естественного освещения;

б) косметический ремонт помещения с применением светлых отделочных материалов.

2. Микроклимат помещения

Поддержание оптимальных параметров микроклимата в помещении осуществляется путем отопления (в зимний период), кондиционирования (летний период) и вентиляции (круглогодично).

3. Шум

Из-за негативного влияния шумов от окружающих объектов в качестве борьбы с ними используют специальные приспособления непосредственно на офисных устройствах или шумопоглощающие экраны, предотвращающие распространение негативного воздействия по помещению.

4. Электромагнитное поле

В качестве основных способов защиты от негативного воздействия электромагнитного поля могут служить [90]:

1) Экранирование (активное и пассивное; источника электромагнитного излучения или же объекта защиты; комплексное экранирование).

2) Удаление источников из ближней зоны; из рабочей зоны.

3) Конструктивное совершенствование оборудования с целью снижения используемых уровней ЭМП, общей потребляемой и излучаемой мощности оборудования.

4) Ограничение времени пребывания операторов или населения в зоне действия ЭМП.

5. Электробезопасность на рабочем месте

В помещении с ПЭВМ, где происходит моделирование, необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты: изоляция проводов и её непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; защитное заземление и защитное отключение.

Современная система электробезопасности обеспечивает защиту от поражения при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования или при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением к электрической цепи стоит понимать прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в исправном состоянии электроустановки отсутствует электрический потенциал, но при возможных неисправностях, вызвавших нарушение изоляции или ее пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Для защиты человека от прямого прикосновения к токоведущим частям, согласно [91] применяется изоляция токоведущих частей, установка ограждений и оболочек, применение барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются защитное заземление и защитное зануление [91].

При поражении человека электрическим током необходимо освободить пострадавшего от его воздействия. Далее пострадавший должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья, при его нормальном самочувствии.

В случае если пострадавшего невозможно быстро отключить от вредного воздействия, освобождение от электричества пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

6. Пожаробезопасность на рабочем месте

Помещение, в которой проводилось моделирование процессов, оборудовано системой с дымовыми извещателями. Сигналы извещателей

включают систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей.

Выбор типа и расчет необходимого числа огнетушителей производится в зависимости от их огнетушащей способности. Из пяти таких классов, лаборатории подходит класс А (пожар твердых веществ) и класс Е (горение электроустановок) [87].

5.3 Экологическая безопасность проекта

Неправильная утилизации ПЭВМ, электропроводов, ламп может быть причиной экологического вреда для окружающей среды.

Элементы компьютерной техники содержат различные вредные вещества, такие как свинец, мышьяк и ртуть, а во время эксплуатации мониторов в них накапливается радиация, и исходя из этого их можно отнести к классу опасных отходов.

Снижение уровня отходов, состоящих из компонентов офисной техники возможно путем повторного их использования. Неисправное оборудование необходимо отправлять на переработки или утилизацию, которой могут заниматься только специализированные организации, обладающие лицензией.

В качестве объекта исследования как типичного горючего материала выбран лист, который загорался и сгорал в высокотемпературной среде. Так как лист это органическое соединение, состоящий в основном из соединений углерода и кислорода, то в результате сжигания выделяются следующие соединения: углекислый газ, азот, пары воды, окис углерода, сернистый газ. Однако так как проведено порядка 40 опытов, соответственно столько же и сожжено листьев, то количество данных соединений, выделившихся во время экспериментов, ничтожно мало, по сравнению с тем, что выделяется при лесном пожаре. Таким образом, исследование возгорания лесного горючего материала как раз таки направлено на то, чтобы наиболее точно

прогнозировать вероятные зоны возникновения лесного пожара, что даст возможность его предотвращения или быстрой локализации.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Пожар – как источник ЧС

Перегрузка проводов, короткое замыкание, искрение и неисправности оборудования могут послужить причиной возникновения пожара в рабочем помещении.

Исходя из [92] пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефонам 01, 101 или 112 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь

5.5 Заключение по разделу

Данный раздел выпускной квалификационной работы направлен на определение возможных вредных и опасных факторов для человека и окружающей среды. Выявлены факторы, которые могут воздействовать во время исследования на человека, и указаны способы предотвращения или минимизации негативного воздействия.

Указано нормативное расположение основного инструмента исследования – персонального компьютера. Рабочее помещение полностью удовлетворяло данным требованиям.

Угроза природе возможна лишь от неправильной утилизации или вторичного использования офисного оборудования. Напротив, одной из основных задач работы является предотвращение лесных пожаров, через исследование ЛГМ. Сжигая при исследовании небольшого количества лесного опада, возможно предотвратить серьезные пожары, охватывающие огромные территории и наносящие непоправимый вред планете.

Заключение

Таким образом, проведенные в рамках выпускной квалификационной работы экспериментальные и теоретические исследования позволяют дополнить существующие исследования и заполнить пробелы в области изучения свойств лесных горючих материалах.

В рамках данной работы на основе экспериментальных данных описаны особенности процесса воспламенения листа березы в высокотемпературной среде и определены характерные времена задержки зажигания. Рассмотрен физический механизм воздействия высокотемпературной среды на лесной горючий материал, разработана система допущений для математических моделей. Стоит отметить, что полученные значения меньше времен задержки зажигания по сравнению с хвойными ЛГМ при тех же температурах. Это говорит о том, что береза является более пожароопасной породой и её лист может стать причиной возгорания в смешанных лесах.

В рамках теоретического исследования были сформулированы математические модели тепломассопереноса в листе березы в одномерной и двумерной постановках с учетом характерных неоднородностей в элементе ЛГМ и его состава. Изучен массоперенос в рамках одномерной постановки, выявлена динамика изменения фазовых компонентов в листе в зависимости от геометрии.

Данные физические и математические модели могут быть использованы при моделировании лесных пожаров, в системах прогноза пожарной опасности и для разработки схем тушения лесных пожаров. Также описанные особенности тепломассопереноса могут стать базой для новой системы классификации лесных горючих материалов, которая будет иметь в основе физически обоснованные подходы, а не применять описательные методы.

Список использованных источников

1. Воробьев Ю. Л. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов; Под общ. ред. Ю. Л. Воробьева; МЧС России. — М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. — 312 с.
2. Бобко А.И. Пожары как геоэкологическая опасность // География и геоэкология на службе науки и инновационного образования: сборник трудов конференции. – Красноярск, 2014. – С. 219-222.
3. Иванова Л.М. Лесные пожары 2010 года - очередная причина изменений в лесном кодексе // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2011. – № 1(27). – С.103-108
4. Константинов А.В., В.В. Морковина. Лесные пожары как наиболее значимая угроза экономической безопасности лесного сектора // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016. – Т.4.–№ 2.–С.319-325
5. Валендик Э.Н, Матвеев П.М, Сафронов М.А Крупные лесные пожары. — М.: Наука, 1979. — 198 С.
6. Тушение лесных пожаров, Учебно-методическое пособие – Государственное бюджетное учреждение Архангельской области «Служба спасения». – Архангельск, 2013. – 106 с.
7. Пожарная безопасность. энциклопедия. - М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. – 416 с.
8. Гусев В.Г., Лопухова Е.Л., Дубовый В.К. Классификация и общие свойства лесных горючих материалов // Известия вузов. Лесной журнал. – 2012. – № 1. – С. 134-145.
9. Михалев Ю.А. Виды вероятных лесных пожаров на землях лесного фонда Сибири, методы их оценки // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2014. – № 10. – С. 132-137.
10. Ходаков В.Е, Жарикова М.В. Лесные пожары: методы исследования монография. – Херсон: Гринь Д.С., 2011,– 417 с.

11. Cohen J.D., Deeming J.E. The National Fire-Danger Rating System: basic equations. Gen. Tech. Rep. PSW-82. Berkeley, CA: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture; 1985.– 16 p.
12. Alexander, M.E.; Lawson, B.D.; Stocks, B.J.; Van Wagner, C.E. Environment Canada, User guide to the Canadian forest fire behavior prediction system: rate of spread relationships // Canadian Forestry Service, Northern Forest Research Centre, Edmonton, Alberta, Interim edition 1984.– 76 p.
13. Forestry Canada Fire Danger Group. Development of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System // Inf. Rep. ST-X-3. 1992. – p. 66.
14. Аникин А.С., Минаев В.Н., Беляева Н.В. Основы лесного хозяйства и таксация леса. СПб.: ООО Изд-во «Лань», 2008.– 372с.
15. Czeslaw Strumillo, Tadeusz Kudra Drying: Principles, Applications, and Design // CRC Press, 1986. – p. 448.
16. Гришин А.М Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / ред. Пененко, В. В. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение , 1992. – 404 с.
17. Robert E. Keane. Wildland Fuel Fundamentals and Applications – Springer International Publishing Switzerland 2015. – p. 191.
18. Viney N.R. A review of fine fuel moisture modelling // Int. J. Wildl. Fire. 1991. – Vol. 1. – № 4. – P. 215–234.
- 19 Кац А.Л., Гусев В.Л., Шабунина Т.А. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. – М.: Гидрометеиздат, 1975. – 16 с.
20. Голованов А. Н., Власова Т. М., Жмурко Т. С. Определение коэффициентов влагопроводности и влагоемкости некоторых лесных горючих материалов // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия: Материалы 4-й международной конференции,– Иркутск, 2001. – с. 31-33

21. Гришин А.М, Голованов А.Н, Катаева Л.Ю, Лобода Е.Л
Постановка и решение задачи о сушке лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва. – 2001 – т.37, №1 – с.65-76

22. Лобода Е.Л Экспериментальное исследование сушки слоя лесных горючих материалов в аэродинамической трубе // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия: Материалы 4-й международной конференции,– Иркутск, 2001. – с. 117-120

23. Гришин А.М, Голованов А.Н, Долгов А.А, Лобода Е.Л, Барановский Н.В., Русаков С.В. Экспериментальное и теоретическое исследование сушки лесных горючих материалов // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. — 2002. — Т. 305, вып. 2 – с. 31-43.

24. Барановский Н. В, Гришин А. М. Математическое моделирование сушки слоя лесных горючих материалов и проникновение солнечного излучения под полог древостоя // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : (Доклады III Всероссийской научной конференции). –Томск, 2002. – с. 271-272

25. Possell M., Bell T.L. The influence of fuel moisture content on the combustion of Eucalyptus foliage // International Journal of Wildland Fire. 2013.– № 22. – p.343–352

26. Schunk, C., Leutner, C., Leuchner, M., Wastl, C., Menzel, A. Equilibrium moisture content of dead fine fuels of selected central European tree species // International Journal of Wildland Fire.– 2013 – №22. – p. 797-809

27. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. – Томск: изд-во ТГУ, 1981. – 277с.

28. Leroy, V., Cancellieri, D., Leoni, E., Rossi, J.-L. Kinetic study of forest fuels by TGA: Model-free kinetic approach for the prediction of phenomena // Thermochimica Acta, 2010.–№ 497.– p.1–6

29. Park, W.C., Atreya, A., Baum, H.R. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis // *Combustion and Flame* – 2010. – №157. – p.481–494
30. Коробейничев О.П., Палецкий А.А., Гончикжапов М.Б., Шундрин И.К., Chen H., Liu N Пиролиз и горение лесных горючих материалов // *Горение твердого топлива: Доклады VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13-16 ноября 2012 г.* – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. – 115 докладов
31. Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Попова Е.И., Любов В.К. Кинетическое исследование древесного топлива, углей и гидролизного лигнина // *Современные наукоемкие технологии.* – 2015. – № 12-2. – С. 249-253;
32. Conesa JA, Domene A. Biomasses pyrolysis and combustion kinetics through n-th order parallel reactions // *Thermochim Acta*, 2011. – №523. – p.176–181.
33. Niu, H., Liu, N. Thermal decomposition of pine branch: Unified kinetic model on pyrolytic reactions in pyrolysis and combustion // *Fuel*, 2015. – №160. – p.339–345
34. Font, R., Conesa, J.A., Moltó, J., Muñoz, M. Kinetics of pyrolysis and combustion of pine needles and cones // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009. – №85. – p. 276–286
35. Benkorichi S., Fateha T., Richard F., Consalvi J.-L., Nadjai A. Investigation of thermal degradation of pine needles using multi-step reaction mechanisms // *Fire Safety Journal*, 2017. – № 91. – p. 811–819
36. Корсаков В. Г., Сычев М. М., Мякин С. В. Физическая химия конденсированных систем и высокоорганизованных веществ. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2013. – 177 с // 2013.
37. Виллюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ / В. Н. Виллюнов ; Отв. ред. В. Е. Зарко, А. Г. Мержанов. - Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние, 1984. - 189 с

38. Захаревич А.В., Барановский Н.В., Максимов В.И. Зажигание лесного горючего материала углеродистой нагретой до высоких температур частицей // Бутлеровские сообщения. 2012. Т. 29. № 2. С. 102 – 108
39. Захаревич А.В., Барановский Н.В., Максимов В.И. Зажигание лесных горючих материалов одиночными, нагретыми до высоких температур частицами // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 4. С. 13 – 16.
40. Барановский Н.В., Захаревич А.В., Максимов В.И. Условия зажигания слоя лесных горючих материалов при локальном нагреве // Химическая физика и мезоскопия. 2012. Т. 14. № 2. С. 175 – 180
41. Барановский Н.В., Захаревич А.В., Экспериментальное исследование зажигания травяной ветоши нагретой до высоких температур частицей углерода // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15. № 3. С. 323 – 328
42. Захаревич А.В., Барановский Н.В., Максимов В.И. Экспериментальное исследование процессов зажигания опада широколиственных пород деревьев источником ограниченной энергоемкости // Экологические системы и приборы. 2012. № 7. С. 18 – 23.
43. Захаревич А.В., Барановский Н.В., Максимов В.И. Зажигание типичных лесных горючих материалов опада лиственных пород локальным источником энергии // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 6. С. 23 – 28.
44. Барановский Н.В., Кузнецов Г.В. Численное исследование задачи о зажигании слоя лесного горючего материала нагретой до высоких температур частицей в плоской постановке // Химическая физика и мезоскопия. 2011. Т. 13. № 2. С. 173-181.
45. Гришин А. М., Долгов А. А., Зима В. П., Крючков Д. А., Рейно В. В., Субботин А. Н., Цвык Р. Ш. Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва. 1998. №6. С. 14-22

46. Барановский Н.В, Кузнецов Г.В Оценка условий зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения // Технологии техносферной безопасности. 2011. №4. С.1 – 9.
47. Барановский Н.В. Численное исследование зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения // Бутлеровские сообщения. 2011. Т. 26. № 11. С. 53 – 60.
48. Гришин А.М Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2010. № 2 . С. 60-70.
49. Reszka P. и др. A methodology for the estimation of ignition delay times in forest fire modelling // Combust. Flame. 2012. Т. 159. № 12. С. 3652–3657.
50. Каницкая Л. В. Лесная пирология: учеб. пособие / Л. В. Каницкая. – Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2013. – 206 с.
51. Щетинский Е.А Спутник руководителя тушения лесных пожаров. М: ВНИИЛМ,2003,96с.
52. ГОСТ 17.6.1.01-83 Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1984.
- 53.Чередова Т.В. Нормирование антропогенного воздействия на среду обитания: учеб. пособие. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2013 – 66 с.
54. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б., Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 1. С. 19-32.
55. Reimann, C; Arnoldussen, A; Finne, TE; Koller, F; Nordgulen, O; Englmaler, P Element contents in mountain birch leaves, bark and wood under different anthropogenic and geogenic conditions // Applied Geochemistry,2007. – V.22.–I.7. – p.1549-1566
56. Хасанов И.Р Параметры возмущений атмосферы при крупных лесных пожарах 9й международный семинар по структуре пламени Новосибирск Россия 10-14 июля 2017, 20с.

57. Гоман П.В Экспериментальное исследование процесса распространения пламени по слою лесного горючего материала // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация.2018.№43. С.65-76.
58. Гоман П.В Оценка способности наземного лесного горючего материала к воспламенению и поддержанию процесса горения по своей поверхности // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси,2018 Т. 2. № 4. С.446-454
59. Субботин А.Н Математическое моделирование распространения низового лесного пожара по опадку хвои с противоположными разрывами // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 8. С. 20-25.
60. Баровик Д. В, Корзюк В. И., Таранчук В. Б. К обоснованию математических моделей низовых лесных пожаров // Труды Института математики, 2013. Т.21. № 1. С. 3–14.
61. Wang, X., Wotton, B.M., Cantin, A.S., Parisien, M.-A., Anderson, K., Moore, B., Flannigan, M.D. CFFDRS: an R package for the Canadian Forest Fire Danger Rating System // Ecological processes,2017 6:5 – 11 p.
62. Canadian Forest Fire Danger Rating System / B.J. Stocks, M.E. Alexander, R.S. McAlpine et.al Canadian Forestry service,1987. – 500 p.
63. Perrakis, D.D.B., Lanoville, R.A., Taylor, S.W., Hicks, D. Modeling wildfire spread in mountain pine beetle-affected forest stands, British Columbia, Canada // Fire Ecology. 2014. № 2 (10).– p. 10–35.
64. Gaining an Understanding of the National Fire Danger Rating System A publication of the NWCG Fire Danger Working Team. – 2002.– 71 p.
65. European Forest Fire Information System [Электронный ресурс]: URL <http://effis.jrc.ec.europa.eu/> Дата обращения:01.05.2019.
66. J.San-Miguel-Ayanz J. Advance EFFIS Report on Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2018. / J. San-Miguel-Ayanz, T. Durrant, R. Voca, G. Libertà, A. Branco et al. – 2019.–36 p.

67. Viegas, D.X., Bovio, G., Ferreira, A., Nosenzo, A., Sol, B. Comparative Study of Various Methods of Fire Danger Evaluation in Southern Europe // International Journal of Wildland Fire, 2000. – 9(4) – p. 235-246

68. Барталев С.А. [и др.]. Основные Возможности и Структура Информационной Системы Дистанционного Мониторинга Лесных Пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (ИСДМ Рослесхоз) // Современные Проблемы Дистанционного Зондирования Земли Из Космоса.– 2010. Т.7 № 2 (7). С. 97-105

69. Лупян Е.А. [и др.]. Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2015. С. 222–250

70. Подольская А.С., Ершов Д.В., Шуляк П.П. Применение метода оценки вероятности возникновения лесных пожаров в ИСДМ-Рослесхоз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2011. С. 222–250

71. Бородина Н. А. и др. Деревья и кустарники СССР. — М.: Мысль, 1966. — С. 297—299

72. Абаимов В.Ф. Дендрология. М.: Академия, 2009. 368 С.

73. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. К 891 Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. — 172 с.

74. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1962. 560 с.

75. Гришин А.М., Сеницын С.П., Акимова И.В. Сравнительный анализ термокинетических постоянных сушки и пиролиза лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27. № 6. С. 17.

76. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Томск: Изд-во Том. унта, 2002. 122 с.

77. Волокитина А.В., Софронов М.А. Классификация растительных горючих материалов // Лесоведение. 1996. № 3. С. 38.

78. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.

79. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.201

80. ГОСТ 12.0.003-74 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация – М.: ИПК Издательство стандартов, 1992. – 4 с.

81. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 2003. – 37 с.

82. СП 52.13330.2011. Свод правил. Естественное и искусственное освещение. – М.: Минздрав России, 2011. – 43 с.

83. Назаренко О.Б. Расчет искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. – Томск: Изд. ТПУ, 2001. – 15 с

84. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Минздрав России, 1997. – 15 с.

85. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2008. – 11с.

86. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарные правила и нормы. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы – М.: Минздрав России, 2003. – 37с

87. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов – М.: Стандартиформ, 2001. – 4с.

88. Теоретические основы безопасности жизнедеятельности / Р. И. Айзман, С. В. Петров, В. М. Ширшова. — Новосибирск: АРТА, 2011. — 208 с. — (Серия «Безопасность жизнедеятельности»)

89. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – М.: МЧС России, 2009. – 35 с.

90. ГОСТ Р 50571.3-94 «Электроустановки зданий. Часть 4. Защита от поражения электрическим током» . – М.: Госстандарт России, 1995. – 28

91. ГОСТ 12.1.004-91, ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования». – М.: МВД России, 1992. – 25 с.