

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
 Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Математическое моделирование и экспериментальное исследование теплопереноса при воздействии высокотемпературной среды на типичный лесной горючий материал

УДК 519.876:66.021.3/4:630.431.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ94	Кириенко Виктория Андреевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Барановский Николай Викторович	к.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Пашков Евгений Николаевич	к.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Максимов Вячеслав Иванович	к.т.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен проектировать, методически и консультационно обеспечивать, организовывать и вести учебно-профессиональную, проектную, исследовательскую деятельность обучающихся, в том числе при подготовке выпускной квалификационной работы по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий
ПК(У)-2	Способен осуществлять планирование и научное руководство работ в соответствующей области знаний
ПК(У)-3	Способен осуществлять планирование и контроль работ по безопасной эксплуатации и своевременному ремонту оборудования, основываясь на анализе возможности проведения ремонтных и диагностических работ на технологических объектах с учетом режимов работы объектов
ПК(У)-4	Способен осуществлять проектирование и эксплуатацию теплотехнического, тепломеханического, теплообменного основного и вспомогательного оборудования, а также технологических установок, работающих под избыточным давлением, в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве, в теплоэнергетике, газовой, химической и атомной промышленности
ПК(У)-5	Способен осуществлять анализ режимов работы с формулированием предложений по повышению эффективности деятельности и модернизации предприятий с учетом современных инновационных подходов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
 Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Максимов В.И.  
 (Подпись)    (Дата)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ94	Кириенко Виктории Андреевны

Тема работы:

Математическое моделирование и экспериментальное исследование тепломассопереноса при воздействии высокотемпературной среды на типичный лесной горючий материал	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№119-21/с от 29.04.21

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2021
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования – лист березы. Требования к продукту – математическая модель тепломассопереноса в типичном лесном горючем материале, находящемся в высокотемпературной среде, с учетом процессов пиролиза и испарения влаги. Исходные данные: теплофизические свойства листа и характеристики высокотемпературной среды</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></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. Обсуждение результатов исследования. Экспериментальное исследование зажигания, находящегося в высокотемпературной среде. Формулировка выводов и заключения.</p>
--	---

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

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Киселева Елена Станиславовна, доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Пашков Евгений Николаевич
Раздел ВКР на АЯ	Шатохина Анастасия Олеговна

<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p> <p>Объекты и методы исследования; Результаты экспериментального исследования по определению времени задержки зажигания элемента ЛГМ</p>
--

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

**Задание выдал руководитель**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Барановский Николай Викторович	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ94	Кириенко Виктория Андреевна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 146 с., 25 рис., 19 табл., 152 источника, 1 прил.

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

Объектом исследования являются процессы тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала (листе березы).

Цель работы – численное и экспериментальное изучение процессов тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала при воздействии 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 в программной среде Delphi.

Степень внедрения: результаты работы внедрены в учебный процесс, использованы при проведении НИР РФФИ № 16-41-700831, РФФИ 20-31-51001.

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 полученные результаты исследований могут использоваться при усовершенствовании или разработке систем прогноза пожарной опасности и схем пожаротушения, применение которых позволит снизить ущерб от лесных пожаров.

В будущем планируется провести аналогичные исследования для других видов лесных горючих материалов и обобщить полученные результаты.

## Обозначения и сокращения

ЛГМ – лесной горючий материал.

## Оглавление

Введение.....	9
1. Современное состояние области исследований.....	12
1.1 Характеристика и классификация лесных пожаров .....	12
1.2 Существующие классификации лесных горючих материалов .....	15
1.3 Сушка лесных горючих материалов .....	20
1.4 Пиролиз лесных горючих материалов .....	26
1.5 Зажигание лесных горючих материалов.....	34
1.6 Выводы по результатам обзора литературы .....	41
2. Объекты и методы исследования .....	43
2.1 Объект исследования.....	43
2.2 Методика проведения экспериментов .....	44
2.3 Метод конечных разностей.....	46
3. Результаты проведенного исследования .....	49
3.1 Результаты экспериментального исследования по определению времени задержки зажигания элемента ЛГМ.....	49
3.2 Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала .....	52
3.2.1 Двумерная математическая модель.....	52
3.2.2 Трехмерная математическая модель .....	61
3.2.3 Трехмерная математическая модель с учетом испарения .....	67
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	80
4.1 Анализ конкурентных технических решений .....	81
4.2 SWOT-анализ.....	82
4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	85

4.4. Инициация проекта .....	87
4.5 Планирование управления научно-техническим проектом.....	90
4.6 Бюджет научного исследования .....	94
4.7 Оценка сравнительной эффективности исследования .....	98
4.8 Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	101
5. Социальная ответственность .....	105
5.1 Введение.....	105
5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	106
5.3 Производственная безопасность .....	108
5.3.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	109
5.3.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия.....	113
5.4 Экологическая безопасность.....	116
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	117
5.6 Заключение по разделу «Социальная ответственность» .....	118
Заключение .....	119
Список публикаций студента.....	121
Список использованных источников .....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	139

## Введение

Лесные экосистемы являются наиболее важным регулятором балансов парниковых газов, а также выполняют многие другие функции, которые необходимы как с точки зрения сохранения целостности экосистемы планеты, так и в контексте человеческого развития [1]. Без лесов невозможно гармоничное существование планеты в целом. Поэтому лесные пожары – огромная опасность для всего живого. Для обеспечения нормального дальнейшего функционирования многих биогеоценозов и планеты в целом необходимо проводить исследования по решению проблемы лесных пожаров.

Лесные пожары уже становятся обыденным явлениям для стран с большими лесными массивами по всему миру. К таким странам относятся как Россия, США, Канада, Португалия, Франция, Греция, Турция, Австралия, Тунис, Аргентина, Бразилия [2-8].

Ущерб от лесных пожаров затрагивает многие аспекты жизни природы и человека. Так, пожары способствуют снижению численности организмов в экосистеме, повышению вероятности заболеваний и нападения бактерий и насекомых. Помимо эрозии и разрушения физических и химических свойств почвы, пожары также изменяют физиологически растительность, препятствуют регенерации и повышают риск заболеваний и эпидемий [9]. Пожары также влекут за собой смерти людей и прямые финансовые затраты на восстановление инфраструктуры. По данным отчетов об убытках от пожаров за 1987-2014 года средний ущерб может составлять величину от 4,6 до 12,3 миллионов долларов. Однако в эту величину не входят затраты на тушение лесных пожаров и реабилитацию пострадавших [10].

Наиболее эффективным способом борьбы с лесными пожарами является их прогнозирование. Своевременный прогноз позволит сконцентрировать необходимые мощности в месте предполагаемого возгорания, что позволит предотвратить или вовремя локализовать и потушить пожар. Однако эффективное прогнозирование невозможно без физически обоснованной системы классификации лесных горючих материалов.

Целью данного исследования является численное и экспериментальное моделирование процессов тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала при воздействии высокотемпературной среды.

Объектом исследования является лист березы. Выбор объекта исследования обусловлен распространенностью данной лиственной породы на территории России и других государств. Выбор именно лиственной породы обусловлен пробелом в существующей картине знаний, касающейся закономерностей зажигания и пиролиза лиственных образцов. Опубликованные ранее исследования ученых в основном касались исследований образцов древесины, веточек и хвои. Знания об особенностях тепломассопереноса в лиственном элементе лесного горючего материала позволят получить более полную картину процессов, происходящих с лесными горючими материалами непосредственно перед лесным пожаром и во время него.

Предметом исследования являются процессы тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала (инертный прогрев, пиролиз, испарение влаги). Личный вклад автора состоит в проведении экспериментального и теоретического моделирования заявленных процессов. Полученная математическая модель не имеет аналогов в литературе. Разработанный программный продукт может быть использован в системах прогноза лесной пожарной опасности для сценария естественного возгорания элементов ЛГМ под воздействием высоких температур или при нахождении во фронте лесного пожара.

Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались на научных мероприятиях и публиковались в изданиях, индексируемых базами данных «Web of Science» и «Scopus». Исследования проводились в рамках проектов РФФИ 16-41-700831 «Разработка технологий мониторинга и прогнозирования лесопожарного состояния территории в условиях грозовой активности на примере Тимирязевского лесничества Томской области» и РФФИ 20-31-51001 Научное наставничество «Разработка гибридного подхода предиктивного анализа лесопожарных инцидентов вблизи объектов

инфраструктуры ОАО РЖД с использованием детерминированного математического моделирования, анализа данных и технологий искусственного интеллекта».

## 1. Современное состояние области исследований.

### 1.1 Характеристика и классификация лесных пожаров

Лесным пожаром называется процесс распространения неуправляемого горения по лесной площади [11]. Лесные пожары распространены во всех регионах планеты. При анализе статистических данных из 23 стран мира установлено, что около 1,7% от всех пожаров возникают в лесах, а 10,7% от мусора и свалок, которые могут находиться рядом с лесными массивами. При этом данный анализ не учитывает пожары от травы, которые тоже часто распространяются на лесные территории [12].

Существует ряд предпосылок, способствующих возникновению и распространению данного стихийного бедствия. Как правило, к возгоранию приводит совокупность нескольких причин, которые усиливаются различными факторами технического, организационного, хозяйственного характера. К основным факторам, являющимся причиной лесного пожара, относят климатические условия (высокая температура воздуха, периоды с отсутствием осадков, сильные ветры, низкая влажность), антропогенную нагрузку (урбанизация, сельскохозяйственная деятельность, близость мегаполисов, магистралей, промышленных предприятий к лесным насаждениям), грозовую активность [13].

В литературных источниках приведены различные классификации лесных пожаров. Рассмотрим наиболее применяемые классификации и выделим ключевые особенности каждого их пожаров.

Наиболее часто пожары разделяю по принципу воздействия огня на ярусы биогеоценозов. По такому критерию пожары можно разделить на низовые, верховые и почвенные. Также внутри этой классификации используется разделение пожаров на беглые и устойчивые, исходя из характера процесса горения и скорости распространения огня [12]. Приведем основные особенности, по которым можно определить тип пожара:

1. Низовые пожары являются наиболее распространенными и характеризуются возгоранием на нижних уровнях леса. Такой вид пожаров

характерен в середине лета. Чаще всего в данном случае обычно горит лесная подстилка, трава и подлесок. Как правило, дым имеет светло-серый цвета. Скорость распространения по ветру превышает в 6-10 раз скорость распространения против ветра. Активное распространение наблюдается в дневное время суток. Несмотря на то, что данный вид пожара способствует минерализации почв, этот вид пожара может распространяться на достаточно большие территории и перерасти в верховой пожар, который представляет большую опасность [14]-[16]. При устойчивом низовом пожаре напочвенный покров, лесная подстилка и нижние части деревьев (корни и кора) сгорают полностью. Скорость пламенного горения может варьироваться в широком диапазоне (от 12 до 180 м/ч). Высота пламени также варьируется в широких пределах (от 0,5 до 1,5 метров). В случае беглого низового пожара сгорает слой подстилки толщиной примерно 2-3 см. Пожар распространяется со скоростью примерно 180-300 м/ч. Пожар распространяется по лесному массиву мозаично, в результате чего часть массива может остаться неповрежденной [12,17].

2. Верховым считается пожар, который поднялся с земли в полог леса и распространяется через него, обычно в сочетании с поверхностным топливом [18]. Данный вид пожаров встречается реже, однако их чрезвычайная интенсивность и наносимый экологический урон довольно значительны, что привлекает к данному виду пожаров особое внимание ученых [19]. Ученый Van Wagner физический подход для инициирования и распространения коронного огня с помощью специальных критериев. Упрощенные критерии были выведены для начала сгорания короны и для минимальных скоростей распространения и передачи тепла в зону сгорания короны, в которой распространится огонь короны. Критерии основаны на предположении о том, что корона огня отчетливо отделена от поверхностного лесного горючего материала открытым пространством ствола и использовал высоту основания короны над землей в качестве ключевого параметра для своей модели. Коронные пожары классифицируются тремя способами в зависимости от степени зависимости коронной фазы пожара от фазы поверхности земли [20]. В соответствии с этими

рассуждениями верховые пожары подразделяются на пассивные, активные и независимые.

В случае пассивного верхового пожара выделяются отдельные или небольшие группы деревьев, но в кроне не сохраняется сплошное пламя [21]. Возникновение таких видов пожаров обусловлено либо случаем, когда высота основания объемная плотность выше и ниже полноценного пороговые значения коронации или в случае если влажности лесного горючего и скорости ветра недостаточно для полноценного коронирования [22].

В случае активного верхового пожара огонь на поверхности земли и огонь на кроне деревьев движутся как единое целое. Весь лесной горючий материал (как подстилочный, так и находящийся в кроне) горит и образуют сплошную стену пламени [21].

Независимый верховой пожар наступает непосредственно в кроне деревьев, не поддерживается за счет раннее образовавшегося поверхностного огня и распространяется самостоятельно. Обычно такие пожары не продолжительные и могут закончиться самостоятельно. Иногда независимый верховой пожар есть другая стадия активного пожара, в случае если огонь на кроне деревьев распространяется намного быстрее, чем огонь на поверхности земли [21].

3. Подземные пожары предполагают тлеющее или пылающее сгорание разложившихся органических материалов под поверхностью недавно упавших игл и листьев, глубоких органических почв и древесины большого диаметра, соприкасающейся с почвой [23]. В отличие от других видов подземные пожары характеризуются более низкими температурами, более низкими темпами распространения, и более длительными сроками [24]. Тлеющее горение лесных горючих материалов в данном случае может продолжаться несколько дней или месяцев после начального горения и возгорания [25]. Почвенный пожары также подразделяют на подземные (горят залежи торфа) и подстилочногумусные (горит лесная подстилка и гумусовые слой) [12].

Также пожары делятся на классы по площади, выраженной в гектарах. Так, для класса А эта величина составляет менее 0,1 для класса Б – от 0,1 до 5 для класса В – 5-150, для класса Г – 50-150, для класса Д – свыше 150. Класс Д характеризует очень крупные пожары. У этого класса есть 4 подкласса: подкласс Д<sub>1</sub> описывает пожары площадью 150-250 гектар, Д<sub>2</sub> – пожары площадью 250-1000 гектар, Д<sub>3</sub> – пожары площадью 1000-10000 гектар, Д<sub>4</sub> – свыше 10000 гектар [26].

Также учеными были разработаны более детальные классификации, учитывающие другие параметры пожаров. Примерами могут служить классификация М.А Сафронова, основывающаяся на ландшафте места возникновения и распространения возгорания, а также классификация Курбатского, предлагающая различать пожары на простые и сложные в зависимости от охватываемых биогеоценозов [26].

Как видно из описания различных видов лесных пожаров, каждый из них представляет достаточно серьезную опасность и наносит существенный вред окружающей среде. Поэтому необходимо пристальное внимание необходимо уделить изучению процессов, происходящих до и непосредственно во время зажигания и горения различных лесных горючих материалов.

## 1.2 Существующие классификации лесных горючих материалов

В данном разделе рассмотрим разработанные ранее системы классификации лесных горючих материалов.

Лесными горючими материалами называют растения лесов, а также их морфологические составляющие и разлагающиеся остатки, которые могут гореть при пожарах [27]. Значит, к ЛГМ можно отнести все живые и мертвые растения, лесную подстилку и опад, валежник, слои перегноя и торфа. Классификация ЛГМ может брать за основу различные уровни. В основном рассматривается три уровня: элементарных частей ЛГМ (включая подлесок, растения напочвенного покрова, невысокие кустарники, части деревьев), слоев ЛГМ и сложных комплексов ЛГМ [28]. Далее рассмотрим классификации, используемые различными странами для прогноза лесной пожарной опасности.

В Соединенных Штатах Америки для прогноза лесных пожаров используется своя Национальная система пожарной опасности. Система обрабатывает эффекты существующих и ожидаемых состояний выбранных факторов пожарной опасности и суммирует их в один или несколько качественных или числовых показателей. Значение уровня показателей позволяет принимать решение о необходимых мерах для того чтобы не допустить возгорание [29]. В рамках данной системы была разработана классификация ЛГМ, согласно которой все ЛГМ можно разделить на мертвые и живые топлива. Также выделяется так называемое «тонкое горючее», являющееся хорошим проводником горения. В мертвом топливе содержание влаги определяется внешними параметрами среды, такими как температура воздуха, уровень солнечного излучения, наличие и количество осадков, влажность воздуха. Содержание влаги в живом топливе регулируется за счет физиологических процессов в растении. В системе за стандартные условия воздушной среды приняты величины температура воздуха ( $26,5^{\circ}\text{C}$ ) и относительной влажности (20%) [30].

Живые ЛГМ в данном случае делятся на травы и травянистые растения и на морфологические части растений (листья, хвоя, небольшие ветки).

Мертвые ЛГМ подразделяются на подклассы в зависимости от влагосодержания, которое вычисляется с 1, 10, 100 и 1000 часовым временным лагом (сдвигом). Под временным лагом в данном случае понимается количество времени, которое потребовалось для испарения порядка 63% влаги от начального её содержания. По этому показателю мертвые ЛГМ можно отнести к одному из следующих подклассов [30,31]:

1. 1 класс – влагосодержание примерно равно влагосодержанию окружающей среды. К такому классу можно отнести мертвые травянистые растения, формирующие лесную подстилку, а также круглое древесное топливо диаметром до 6 мм.

2. 2 класс – влагосодержание составляет величину от 1 до 60%. В эту группу входит круглое древесное топливо диаметром в диапазоне  $6 \div 25$  мм или слой лесной подстилки толщиной до 20 мм.

3. 3 класс – влагосодержание составляет величину от 1 до 50%. К таким относится круглое древесное топливо диаметром от 25 до 75 мм, а также лесная подстилка толщиной 20-100 мм.

4. 4 класс – влагосодержание составляет величину от 1 до 40%. К таким относится древесное топливо диаметром от 75 до 203 мм, а также лесная подстилка толщиной более 100 мм.

Здесь следует отметить тот факт, что не все лесные горючие материалы можно классифицировать согласно этой системе. Так, мхи и лишайники не имеют способности к поддержанию влагосодержания [28]. Их высыхание и увлажнение происходит по механизму мертвых топлив. Значит, система имеет локальное применение и не подойдет для всех ландшафтов (например, для российских лесов).

Также существует классификация лесных горючих материалов, разработанная для прогноза лесных пожаров в Канаде. Канадская система прогноза лесной пожарной опасности (Canadian Forest Fire Danger Rating System) включает в себя 4 основных подсистемы [12]:

- 1) FWI – модуль выводит численные индексы для оценки лесной пожарной опасности по известным погодным условиям
- 2) FBP – модуль, прогнозирующий поведение лесного пожара
- 3) Модуль прогноза грозовой активности и деятельности человека
- 4) Подсистема оценки влагосодержания лесных горючих материалов

За классификацию ЛГМ в данной системе отвечает модуль FBP. Для прогноза поведения и распространения данных этому модулю необходим массив их входных данных. Для расчета модуль использует особенности рельефа местности, текущие параметры погодных условий, влажность и тип лесного горючего материала. Классификация ЛГМ была разработана для повышения

точности расчетов. Она включает в себя пять основных групп, которые включают в себя несколько подгрупп [32]:

1) Подгруппа хвойных ЛГМ включают в себя 7 видов хвойных пород и их морфологических частей. Данный топлива наиболее воспламеняемые

2) Подгруппа лиственных ЛГМ включает безлистные и зеленые типы ЛГМ. Отмечено, что прогноз пожара на территории с таким типом ЛГМ может быть весьма неточным.

3) Подгруппа смешанных топлив включает в себя 4 комбинации мертвых и живых хвойных и лиственных пород в различных процентных соотношениях. Это соответствует бореальным лесным массивам.

4) Подгруппа травяных топлив описывает лесную подстилку, характерную для весеннего и летнего сезонов.

5) Подгруппа рубленых топлив описывает типы ЛГМ, являющиеся следствием деятельности человека. В данную подгруппу относятся, например, остатки древесных пород после вырубки.

Также в рассматриваемой классификации можно выделяют три крупные группы почвенных (торф и гумус), напочвенных (лиственные и хвойный опад, кустарники и валеж) ЛГМ, а также кроновое горючее (ветки и сучья) [32].

В России наибольшую популярность в рамках этой тематики получили работы Н.П. Курбатского. По его мнению, все ЛГМ можно разделить на [33]:

1) Проводники горения – горение таких ЛГМ сопровождается выделением достаточно большого количества тепла, которого достаточно для дальнейшего поддержания и распространения процесса

2) Поддерживающие горение – ЛГМ с достаточно большим постоянным влагосодержанием и небольшой объемный вес. Такие ЛГМ будут гореть совместно с проводниками горения. В эту группу входят в основном живые растения, которые могут поддерживать влагосодержание.

3) Задерживающие горение – ЛГМ, которые не горят в естественном состоянии из-за своего высокого влагосодержания и особенностей своего строения. Для их воспламенения требуется подведения большого количества

тепла. Данные ЛГМ могут гореть совместно с проводниками горения, однако менее интенсивно. В эту группу входят некоторые виды кустарников и деревьев (например, бадан, липа).

В более поздних работах Курбатский объединил лесные горючие материалы на группы по сходным признакам и поведению при горении [33]:

1) 1 группа включает себя лишайники, мхи и опад. Данные ЛГМ имеют рыхлую структуру и способность к быстрому высыханию и увлажнению. Горение преимущественно пламенное.

2) 2 группа включает торф и лесную подстилку. Структура у ЛГМ преимущественно рыхлая с включениями из частиц. Горение преимущественно тлеющее.

3) 3 группа описывает пни и валежник. Характер горения зависит от степени разложения. Для гнилой древесины характерно беспламенное горение, а здоровые образцы горят с пламенем.

4) 4 группа объединяет самосев древесных пород, кустарнички и травы. Для ЛГМ этой группы характерна высокая влажность, поэтому они как правильно интенсивно горят только совместно с ЛГМ из первой группы.

5) 5 группа включает в себя хвойный и лиственный подрост и подлесок. ЛГМ из этой группы хорошо горят и могут усиливать горение других напочвенных ЛГМ. Отмечено, что хвойные породы поддерживают горение более интенсивно по сравнению с лиственными.

6) 6 группа объединяет в себе листву, хвою, а также небольшие ветки и сучья древостоя. Такие ЛГМ интенсивно горят совместно с подростом и подлеском.

Существуют также другие работы русских ученых, посвященные классификации ЛГМ. Так, Арцыбашев предлагал разделить ЛГМ в соответствии характером лесного пожара на подземные, наземные и надземные. Подземные ЛГМ включает в себя все органические компоненты, находящиеся ниже уровня земной поверхности, например, корневые системы растений, залежи торфа. Наземными называются ЛГМ, находящиеся в непосредственном контакте с

земной поверхностью. К классу надземных ЛГМ относятся верхние ярусы деревьев. Особенности структуры и горения ЛГМ описаны схоже с классификацией Курбатского [33].

### 1.3 Сушка лесных горючих материалов

Процесс сушки является одним из ключевых при изучении природы горения лесных горючих материалов. Этот этап является ключевым, поскольку после него следует процесс термического разложения вещества, что является одним из предвестников возможного возгорания и, как следствие, пожара. Изучение закономерностей испарения жидкости из ЛГМ позволит определить ряд мер, целесообразных для прекращения этого процесса.

Под сушкой ЛГМ понимается испарение воды из материала. В теории сушки применяются понятия свободной и связанной влаги. Свободная влага испаряется со скоростью равной скорости испарения воды со свободной поверхностью (давление насыщенного пара равно давлению насыщенного пара над поверхностью воды). Связанная влага испаряется со скоростью меньшей скорости испарения воды со свободной поверхностью (давление насыщенного пара меньше давлению насыщенного пара над поверхностью воды). Следовательно, связанная влага из-за наличия более крепких связей с материалом удаляется труднее. Процесс испарения такого вида влаги очень сложный и энергозатратный [34,35].

Форма связи существенно влияет на особенности процесса сушки. В связи с этим советским ученым П.А Ребиндером была разработана классификация связи влаги с материалом. В качестве основного критерия было принято количество затраченной работы для испарения 1 моля влаги. Итак, согласно данной классификации влага может быть связана с материалом [34,35]:

- 1) Механически – самый слабый вид связи, на разрыв которой требуется 100 Джоулей энергии. Механическая влага включает в себя влагу микро- и макрокапилляров. Макрокапилляры наполняются лишь при соприкосновении с материалом, а микрокапилляры могут также поглощать влагу из окружающей среды.

2) Физико-механически – на удаление влаги, связанной таким способом, требуется затратить 3000 Джоулей энергии. Данный тип связи включает в себя адсорбционно (прочно удерживающуюся на поверхности) и осмотически (находящуюся внутри клеток) связанную влагу.

3) Химически – самый сильный вид связи, на разрыв которой требуется 5000 Джоулей энергии. Для удаления влаги в этом случае требуется проведение химической реакции или нагрева до высоких температур. При обычной сушке такая влага не удаляется.

Выделяют кинетический и диффузионный режимы сушки. Кинетический режим сушки лимитируется испарением воды с внешней поверхности пористого влагосодержащего тела. Диффузионный режим сушки лимитируется переносом влаги или паров непосредственно внутри тела. Для лесных горючих материалов характерен кинетический режим сушки. Исключительным случаем является сушка толстых веточек при высоких температурах [36].

Ключевыми вопросами при исследовании сушки ЛГМ является определение термокинетических (энергия активации и предэкспоненциальный множитель) и теплофизических (теплоемкость и теплопроводность) свойств и влагосодержания исследуемого материала, а также типичных времен процесса.

Как уже упоминалось выше, влажность является ключевым показателем при изучении сушки. На этот показатель существенно влияют свойства и вид самого топлива. Ключевым свойством ЛГМ, отвечающим за способность притягивать и удерживать влагу, является гигроскопичность. На этот показатель существенно влияют особенности клеточного строения вещества. Следовательно, процесс испарения влаги из живых и мертвых топлив будет отличаться. В [37] описаны особенности протекания данного процесса. Так, в живом топливе влага продвигается к поверхностному слою за счет сил диффузии и капиллярных сил. Выход воды на саму поверхность происходит за счет вызванного потенциалом воды растягивающего давления. В случае мертвого топлива вода движется к поверхности за счет процессов диффузии и испарения

из клеточных стенок. В результате влага образует пленку на поверхности и затем начинает испаряться.

Влажность ЛГМ измеряется экспериментальным путем с помощью метода термогравиметрического анализа. Это метод предполагает получение термогравиметрических кривых – зависимостей потери массы (в граммах или процентах) от температуры среды. Эксперименты проводятся с помощью специального оборудования (термовесов), позволяющего регистрировать потерю массы образцов с течением времени [38]. Отмечено, что оптимальным режимом для получения адекватных результатов является длительная (около 72 часов) сушка при относительно низких температурах (порядка 80-85 °С) [37].

В литературе опубликованы различные исследования, посвященные определению значений влажности ЛГМ и описанию влияния этого фактора на процессы сушки и воспламенения. Так, в [39] экспериментально оценивалось влияние относительной влажности, температуры воздуха и скорости ветра на содержание влаги в мелком топливе с помощью специальной камеры с контролируемым климатом. Отмечено, что на начальном этапе потеря влаги довольно быстрая, затем процесс сушки стабилизируется до экспоненциального затухания. На основе полученных данных были разработаны уравнения прогнозирования, отражающие скорость изменения содержания влаги в мелкодисперсном топливе и равновесного содержания влаги в мелком топливе как для абсорбции, так и для десорбции.

В статье [40] представлены результаты исследования по определению зависимости влажности лесной подстилки от относительной влажности воздуха. Информация о влажности лесной подстилки важна для программного обеспечения для моделирования поведения при пожаре. Результаты анализа подтвердили, что коэффициент преобразования между относительной влажностью воздуха и влажностью лесной подстилки не может быть установлен, поскольку исходные данные сильно различаются. Значит, нужно продолжать исследования в этом направлении.

В работе [41] была проведена оценка влажности типичных лесных горючих материалов на начало пожароопасного сезона. В исследованиях испытывались ЛГМ, собранные в различных типах лесов с различными рельефами. По результатам исследований был сделан вывод о том, что влажность убывает в ряду «берёза-осина-сосна-дуб». Данные результаты объясняются различиями в структуре древесины этих пород. Также отмечено, что рельеф местности незначительно влияет на влажность образца.

В работе [42] приведены кинетические параметры сушки и пиролиза некоторых лесных горючих материалов, характерных для типичной таежной зоны на территории России. В ходе исследований были выявлены некоторые виды ЛГМ, для которых могут использоваться единые значения кинетических постоянных.

Также существует ряд работ, посвященных определению влажности в листьях или лесной подстилки с помощью моделей переноса излучения (radiative transfer model (RTM)). [43-46]. Данные исследования позволяют получать необходимые данные для картирования лесных территорий и для более точного прогнозирования лесной пожарной опасности.

Помимо определения показателя влажности топлива многие ученые занимаются математическим описанием данного процесса. Основой для моделирования является ранее полученная экспериментальная база. Рассмотрим основные математические модели сушки ЛГМ и полученные с их помощью результаты.

В [47] предложена одномерная математическая модель сушки лесного топлива, которая может быть использована для мониторинга лесной пожарной опасности с привлечением данных о параметрах окружающей среды в пожароопасный сезон. При моделировании решалось одномерное уравнение теплопроводности с учетом излучения Солнца, конвективно-кондуктивного теплообмена с приземным слоем атмосферы, испарения воды. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее полученными экспериментальными

значениями при тестировании установок для контроля параметров окружающей среды в целях мониторинга лесных пожаров.

В [48] на основе ранее проведенных экспериментальных исследований была получена математическая модель естественной сушки целых деревьев, уложенных пучками на лесосеке. Полученная математическая модель позволяет определить изменение средней влажности древесины в зависимости от диаметра ствола дерева, суммарного количества осадков, относительной влажности и температуры окружающей среды, средней скорости ветра и продолжительности естественного высыхания.

В [49] разработана физическая модель высыхания слоя ЛГМ в естественных условиях. Рассматривается задача сушки слоя высотой  $h$  из смеси ЛГМ, обдуваемого ветром со скоростью  $V_c$  и нагреваемого излучением от Солнца. Модель учитывает теплофизические параметры составляющих смеси, а также процессы переноса и испарения воды. Рассматривались сопряженная и раздельная постановки задачи. В рамках исследования определялось значение времени, после которого влагосодержания слоя ЛГМ становилось меньше критического значения. Исследования показали, что экспоненциальную зависимость убыли масса. После определенного времени убыль массы выходила на стационарное значение. Следовательно, с увеличением температуры скорость испарения воды возрастает и уменьшается время сушки. Математическое моделирование было выполнено для трех сценариев: катастрофической, средней и низкой пожарной опасности. Установлено, что математическая модель адекватна для качественного описания влияния метеорологических факторов (начальная влажность, температура почвы и воздуха) на сушку слоя.

Также данные о процессе сушки могут использоваться для формулирования критериев для оценки вероятности пожаров. Так, в России широко используется эмпирический индекс засухи Нестерова [50]. Этот индекс был создан в 1949 году для прогноза лесных пожаров в Советском союзе. Индекс основывается на синоптических дневных данных о температуре, влажности и суточных осадках. В основу заложена простая математическая

модель, которая представляет собой взвешенную разницу между температурой и точкой росы. Нестеров разделил шкалу потенциальной пожарной опасности на 5 уровней опасности от отсутствия риска пожара до чрезвычайного риска [50,51].

В Европе для оценки возможного потенциального возгорания используется индекс засухи Китч-Байрама (Keetch-Byram drought index KBDI). Это число, представляющее чистое влияние суммарного испарения и осадков на создание кумулятивного дефицита влаги в верхних слоях почвы. KBDI пытается измерить количество осадков, необходимое для восполнения почвы в поле. Предполагается, что режим влажности почвы колеблется от 0 до 20 см (0–8 дюймов) водяного столба, систематизируя этот диапазон по шкале от 0 до 800 единиц на 5 более мелких диапазонов. Ноль означает отсутствие дефицита влаги, а 800 означает максимальную засуху. KBDI рассчитывается на основе ежедневных наблюдений за количеством осадков и максимальной температурой воздуха. Значение KBDI каждого дня основывается на данных о предыдущем дне [52].

Для оценки пожарной опасности на Скандинавском полуострове в Швеции был разработан индекс Ангстрема. Индекс Ангстрема является одним из самых простых индексов засухи, используемых при оценке риска пожаров. Для расчета индекса используются только температура воздуха и относительная влажность, и он дает представление о вероятном количестве пожаров в любой день [53].

Также существует Канадская система погодных индексов лесных пожаров (FWI). Первоначально система создавалась для прогнозирования пожаров в канадских сосновых лесах, но вскоре приобрела популярность и на других территориях. Система FWI состоит из шести компонентов, рассчитываемых на основе метеорологических данных: температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность и суммарное количество осадков за 24 часа. Все метеорологические показатели измеряются в полдень по местному времени. Первые три компонента отражают влажности различных видов топлива: тонкого (подстилка), слабо уплотненный органический материал

(«duff») и более глубокие органические слои / топливо с большой поверхностью. На основе первых трех компонентов определяются следующие три «индекса поведения при пожаре». Индекс начального распространения (ISI) представляет собой потенциальную скорость распространения огня, индекс накопления (BUI) указывает общее количество доступного горючего топлива, а последний компонент «FWI» объединяет ISI и BUI для измерения потенциальной фронтальной интенсивности пожара [54].

На сегодняшний день активно ведутся исследования, направленные на выбор оптимального критерия для применения в системах прогноза лесной пожарной опасности для конкретной территории [53,55,56]. Так в [56] основные эмпирические индексы засухи были протестированы в условиях Европейского Средиземноморья по методу корреляции показателей с реальными данными о влажности топлива. Итоговый статистический анализ собранных данных показал, что индекс KBDI является наиболее подходящим индексом засухи для данной местности. Также сделаны дополнительные рекомендации по модифицированию индекса для конкретной территории и выработаны основные принципы использования любых эмпирических индексов засухи.

Таким образом, можно сделать вывод о важности исследования процесса сушки различных лесных горючих материалов. Данные экспериментальных и теоретических исследований могут быть использованы в системах прогноза лесной пожарной опасности.

#### 1.4 Пиролиз лесных горючих материалов

Изучение термического разложения лесных горючих материалов имеет большое значение при моделировании процессов тепломассопереноса в элементе ЛГМ. Процесс пиролиза является последней стадией перед непосредственным зажиганием ЛГМ. Именно в процессе пиролиза выделяются летучие соединения, которые впоследствии поддерживают горение вещества.

В общем случае под процессом пиролиза понимается превращение биомассы под действием тепла в инертной атмосфере в уголь, газ и жидкость, состоящие из смеси сотен кислородсодержащих органических соединений

[57,58]. Для пиролиза характерно протекания первичных реакций разрушения полимерных структур с выделением летучих соединений. Затем могут протекать вторичные реакции, в ходе которых осуществляется дальнейшие преобразования выделившихся летучих компонентов [59].

В биомассе, подлежащей пиролизу, можно выделить три важных компонента: 30–60% целлюлозы, 20–35% гемицеллюлозы (полисахариды) и 15–30% лигнина вместе с некоторыми смолами и минералами [59]. Это значит, что протекание процесса пиролиза, количество и состав выделяющихся при этом продуктов напрямую зависит от процентного соотношения этих компонентов, типичных реакций их разложения и температуры процесса.

Целлюлоза является основным компонентом клеточных стенок растений и состоит из ангидроглюкозных звеньев, связанных гликозидными связями. В зависимости от температурного фактора может осуществляться одна из трех первичных реакций [59]:

- 1) фрагментация до гидроксиацетальдегида и других карбонил, кислот и спиртов;
- 2) деполимеризация до левоглюкозана и других первичных ангидросахаров;
- 3) обезвоживание до полукокса, газов и воды.

Гемицеллюлоза способствует связыванию целлюлозных микрофибрилл клеточной стенки. Ее содержание варьируется по структуре и составу (в основном ксилан) и обладает низкой термостабильностью. Разложение этого вещества происходит аналогично целлюлозе: путем дегидратации при низких температурах (<553 К) и деполимеризации при более высоких температурах [59].

Лигнин представляет собой полимер гидрокси- и метоксизамещенных пропилфенольных звеньев. Это вещество является укрепляющим компонентом клеточной стенки и в основном присутствует в древесной биомассе [60]. Для вещества характерно структурное разнообразие полимеров, что говорит о способности выделять различные по составу продукты при пиролизе (катехины, ванилины, ароматические углеводы). При низких температурах (<773 К)

преобладает дегидратация, а при более высоких температурах образуется разнообразие мономеров лигнина. Выше 973 К мономеры разлагаются и попадают в паровую фазу. Лигнин термически более стабилен, чем целлюлоза и гемицеллюлоза, и дает больше полукокса и большую долю ароматических соединений [60].

При моделировании лесных пожаров лесной массив в основном рассматривается в качестве многофазной среды, состоящей из сухого органического вещества, связанной воды, газовой фазы и дисперсных частиц [61].

Для того чтобы изучать процесс пиролиза биомассы и иметь возможность в дальнейшем моделировать этот процесс необходимо создать экспериментальную базу данного процесса. Изучение пиролиза ведется с нескольких сторон.

Фундаментальным вопросом в моделировании пиролиза является первоначальное экспериментальное определение кинетических характеристик различных материалов. Наиболее применяемым методом исследования является термогравиметрия. Данные исследования позволяют установить численные значения кинетических констант веществ, а также их изменение во времени при воздействии факторов окружающей среды. Полученные результаты [62-66] позволяют составить базу параметров для дальнейших исследований.

В литературе также приведены экспериментальные исследования, направленные на изучение механизмов теплопереноса в различных ЛГМ. Без учета процесса пиролиза этого невозможно. Данные исследования позволяют классифицировать ЛГМ как виды топлива, а также исследовать динамику их возгорания и горения [67,68].

Также ведутся разработки по поиску оптимального механизма подавления реакции пиролиза. В рамках этого направления изучаются основные закономерности реакции разложения ЛГМ перед и при воспламенении [69]. Также определяется необходимое количество и состав тушащей жидкости, необходимой для подавления реакции пиролиза [70,71].

Экспериментальное изучение пиролиза веществ способствует расширению знаний о его механизме и предоставляет возможность для численного моделирования.

Моделирование процесса пиролиза является трудоемкой задачей. Необходимо учитывать химический состав биомассы и протекающие между компонентами химические реакции. Для лучшего понимания механизмов пиролиза моделирование этого процесса ведется на трёх уровнях: молекулы (mechanistic models), частицы (network models) и реакции (kinetic models)[72].

Механистические модели раскрывают механизм пиролиза с учетом различных путей реакций и образующихся компонентов. Для таких моделей характерно рассмотрение элементарных протекающих реакций без их группировок и обобщений [72]. Данное моделирование может брать за основу методе силового поля (или молекулярная механика) или расчете электронной структуры (или первопринципы или метод *ab initio*)[72].

Механистические модели не получили особого распространения в исследованиях. Поскольку в биомассе может содержаться достаточно большое количество полимерных структур, моделируется процесс пиролиза лишь отдельных компонентов. В литературы описаны результаты моделирования дегидратации целлюлозы с учетом структурных особенностей полимера и механизмов разрыва пиранового кольца [73,74]. Также в [75] описывается механистическое моделирование  $\alpha$ -циклодекстрина на основе экспериментального тонкопленочного пиролиза целлюлозы. Моделирование производилось с помощью метода *ab initio*. Данная разработка позволяет первичные принципы моделирования для идентификации химического состава пиролизной фазы в короткие сроки. Это позволило впервые выявить пути пиролиза конденсированной фазы целлюлозы. Также с помощью метода *ab initio* в [76] были выявлены основные особенности диполимеризации целлюлозы в интервале температур 327-600 °С. Это вносит свой вклад в понимание конденсированного пиролиза на молекулярном уровне. В работе по изучению быстрого пиролиза целлюлозы [77] отмечены закономерности разложения

целлюлозы, а также описаны производные глюкозы, играющие роли в образовании продуктов распада. Моделируется также процесс пиролиза и других компонентов.

Механистические модели позволяют спрогнозировать различные варианты процесса пиролиза на молекулярном уровне с учетом влияния различных неорганических включений. Недостатком данного вида моделирования можно считать отсутствие установленных взаимосвязей и взаимодействий между компонентами, основное внимание на газофазных реакциях и невозможность описания процесса пиролиза основного компонента биомассы (целлюлозы) из-за сложности протекающих реакций [72].

Сетевые модели в основном используются для изучения процесса высвобождения летучих веществ из углей. Как правило, пиролиз в данном случае представляется последовательностью следующих стадий: диполимеризации, реполимеризации, внешнего и внутреннего массопереноса. На данный момент сетевые модели модернизированы для других типов биомассы с учетом структурных изменений материала при пиролизе. Наиболее применяемыми среди сетевых являются Bio-FG-DVC (Functional Group Depolymerization Vaporization Crosslinking) model [78], Bio-FLASHCHAIN model [79] and Bio-CPD (Chemical Percolation Devolatilization) model [80]. Данные модели, основываясь на структурном составе полимеров, рассчитывают количество летучих компонентов, выделяющихся при пиролизе с течением времени при разных температурах. Преимуществом данных моделей является возможность количественного анализа летучих газов, смолы и кокса при пиролизе, рассмотрение структурных изменений вещества в ходе реакции. Недостатком данного вида моделирования является ограниченность применения моделей и отсутствие учета влияния неорганических примесей на пиролиз [72].

Наиболее часто для описания процесса пиролиза ЛГМ и биомассы в целом применяются кинетические модели. Преимуществом данного подхода является отсутствие необходимости обширных структурных данных, а необходимые кинетические параметры можно получить экспериментальным

путем. Однако в данном случае модель дает адекватные результаты только в пределах экспериментальных данных. Также данные модели хуже справляются с моделированием структурных изменений биомассы и прогнозом выхода летучих веществ [72]. Однако простота моделирования, возможность отслеживания основных закономерностей и хорошая сходимость результатов с экспериментальными значениями способствует появлению новых моделей. Рассмотрим наиболее популярные кинетические модели.

Простейшей моделью является одноступенчатая глобальная кинетическая модель [81]. В рамках этой модели рассматривается одностадийная реакция преобразования биомассы в полукокс и летучие вещества. Как правило, такая модель дополняется моделями теплопередачи и объемной реакции. Например, в [82] разработана одномерная математическая модель пиролиза с использованием глобальной кинетической модели. Модель учитывала вариабельность теплофизических свойств и радиационного теплового потока и произвольные граничные условия. Результаты моделирования хорошо согласуются только при небольших тепловых потоках. В случае моделирования реальных условий пожара согласование данных плохое, что говорит о необходимости усовершенствования модели. Глобальная кинетическая модель не способна полностью отразить реальную картину пиролиза, поэтому используется не часто.

Кинетические модели ссылаются к различным типам реакций, происходящих во время разложения биомассы. Эти модели делятся на две категории в зависимости от механизма реакции процесса пиролиза: сосредоточенные (lumped) и распределенные (distributed) модели. В сосредоточенных (lumped) моделях различные продукты реакции биомассы и отдельные компоненты биомассы объединены в три класса продуктов: gas, tar and char. Макроскопические кинетические модели предполагают, что биомасса преобразуется в эти три продукта посредством одношаговых или многошаговых реакций. В процессе построения модели структура биомассы не характеризуется.

Таким образом, эти модели не включают информацию о путях реакции и являются моделями черного ящика [83,84].

В распределенных (distributed) моделях считается, что продукты пиролиза образуются бесконечным числом независимых параллельных реакций, имеющих различные энергии активации, заданные с использованием функции распределения Гаусса. По сравнению с обычными методами подбора моделей, распределенная модель может моделировать потерю массы по всей скорости конверсии с гораздо более высокой точностью. Методы, используемые для расчета кинетических параметров для таких моделей, можно разделить на два типа: методы без распределения (distribution-free) и методы распределения (distribution-fitting). Методы распределения являются доминирующими, поскольку они способствуют достижению очень точной подгонки [83,84].

Для увеличения сходимости экспериментальных и расчетных данных и качественного прогноза состава и количества выделяющихся продуктов пиролиз стали рассматривать как совокупность параллельно протекающих реакций разложения основных трех компонентов биомассы [72]. Так, на основе термогравиметрического анализа продуктов пиролиза была разработана модель трех независимых реакций для летучих веществ при пиролизе древесины и опилок [85]. Показана зависимость выхода летучих веществ и смолы от скорости нагрева. В [86] модель параллельных реакций была модифицирована с учетом улетучивания продуктов реакций. Добавленные уравнения позволяют получить набор кинетических параметров для описания пиролиза в инертной и окислительной среде с учетом скорости нагрева и воспламенения вещества. Подобные исследования проводились и для других веществ с последующей корректировкой моделей и описанием основных закономерностей [87-89]. Однако вычисления становятся достаточно трудоемкими при использовании данной модели в совокупности с уравнениями тепломассопереноса и гидродинамики. Этот факт затрудняет использование данной модели [90].

Наиболее применяемой для описания пиролиза ЛГМ является модель конкурирующих реакций [81,91]. Модель представляет собой совокупность

первичных и вторичных реакций, объединенных в узком интервале температур с помощью трех конкурирующих реакций основных компонентов [92-94].

Помимо моделей, характеризующих пиролиз отдельных компонентов биомассы или узких ее видов, существуют также более общие модели пиролиза. Так в [95] приведена обобщенная модель пиролиза для твердых веществ. Конвективно-диффузионный решатель позволяет определить поток и состав летучих веществ, выходящих из твердого тела. Решение уравнений сохранения для фаз позволяет определить распределения температуры, частиц и давления внутри твердой частицы. Универсальность модели позволяет использовать её для изучения процесса пиролиза в неуглеродных полимерах [96], обуглившимся твердых веществах [97], тления в пористых средах [98].

В современных реалиях представляет интерес сравнивать различные подходы к моделированию пиролиза и подбирать наиболее удачные варианты для конкретного вида нагрева и ЛГМ. Так, в работе [99] оцениваются две конкурирующие модели, а именно линейная модель и модель Аррениуса, для пиролиза в физическом моделировании пожаров в травяном топливе (на примере сена люцерны *Lucerne hay*). Простая линейная модель делит скорость потери массы растительности на три части: ступенчатое изменение потери массы влаги при 373К, линейная скорость реакции пиролиза и незначительная скорость потери массы полукокса. Модель Аррениуса использует уравнение Аррениуса для определения кинетики реакции пиролиза. Линейная модель демонстрирует лучшие результаты, чем одношаговая. Результаты также показывают, что линейная модель довольно независима от оценки и межвидовой изменчивости. В статье [100] была оценена эффективность трех ранее предложенных схем реакций пиролиза древесины (берёза) при воспроизведении термогравиметрических экспериментов с древесиной березы, и были определены остальные параметры модели из небольших и лабораторных калориметрических экспериментов. Результаты показывают, что одностадийная схема реакции первого порядка может обеспечить такие же хорошие прогнозы скорости тепловыделения, что и более сложные схемы. Источник тепловых

параметров - прямое измерение или обратное моделирование - не оказал большого влияния на прогнозирующую способность. Численное моделирование проводилось с использованием программы пиролиза программного обеспечения имитатора динамики огня (FDS). Разработанный компьютерный код можно использовать как в качестве отдельного решения для пиролиза, чтобы моделировать поведение материала в небольших и лабораторных масштабах, так и для исследования явления сопряженного распространения пламени с учетом пространственно изменяющихся граничных условий.

Также в литературе существуют работы, посвященные изучению процесса пиролиза при испарении жидкости [101-103]. Данные разработки способствуют более глубокому пониманию физико-химических процессов, происходящих непосредственно при пиролизе и в ходе его подавления.

Таким образом, анализ современных исследований показывает интерес ученых по всему миру к проблеме моделированию процессов, предшествующих зажиганию лесных горючих материалов. Понимание механизмов данных процессов будет способствовать усовершенствованию систем лесной пожарной опасности.

### 1.5 Зажигание лесных горючих материалов

Зажигание лесного горючего материала - финальная стадия образования возгорания лесного пожара. Это один из ключевых процессов, влияющих на уровень лесной пожарной опасности. В настоящее время изучением процесса зажигания занимается механика многофазных реагирующих сред. На данный момент в литературе описаны различные модели зажигания ЛГМ, учитывающие свойства самого материала, параметры окружающей среды, а также особенности источника зажигания. Рассмотрим выявленные особенности зажигания лесных горючих материалов.

Процесс зажигания во многом обусловлен типом зажигаемого вещества и условиями окружающей среды. В случае зажигания лесных горючих материалов речь идет о зажигании конденсированных систем. Под конденсированное системой понимают вещество в жидком или твердом состоянии с ближним или

дальним порядком атомов [104]. Существует несколько путей зажигания конденсированных веществ. Кондуктивное зажигание описывает воспламенение при контакте высокотемпературной среды с относительно холодным веществом. При лучистом зажигании конденсированное вещество загорается при передаче энергии от раскаленных частиц или газов. Причиной конвективного зажигания является взаимодействие конденсированного вещества с горящими газами, которые часто являются продуктами термического разложения этого самого вещества [105]. С учетом закономерностей этих путей зажигания были построены различные модели, например, газофазная, гетерогенная и твердофазная. Рассмотрим основные экспериментальные и теоретические исследования

В исследовании [106] изучалось воспламенение различных лесных горючих материалов, характерных для средиземноморского региона. По результатам термического анализа установлено, что на воспламеняемость влияет несколько факторов. Определяющее значение имеет количества целлюлозы, разложившейся во время пиролиза между 320–370 °С. Задержка воспламенения увеличивается с увеличением количества термически разлагаемой целлюлозы. Также влияет и масса летучих веществ, образовавшаяся при температуре 120–160 °С.

В рамках исследования [107] изучается зажигание хвои сосны вида *pinus radiata* в различных её состояниях (живая хвоя, мертвая хвоя, смесь высушенной и повторно увлажненной хвои). Были проведены эксперименты с постоянным и прерывистым зажиганием. В результате получены времена задержки зажигания в зависимости от приложенного теплового потока для обоих случаев с соответствующими доверительными интервалами. Замечено, что в случае спонтанного непрерывного зажигания для живого топлива характерно большее время задержки зажигания и большее значение критического теплового потока. Также сделан вывод о роли повторного увлажнения образцов на значение критического теплового потока.

В [108] исследовано самопроизвольное воспламенение хвои сосны идеальным источником нагрева для понимания взаимосвязи между падающим радиационным тепловым потоком и временем до воспламенения. Получено квазилинейное поведение между обратным временем зажигания и падающим лучистым тепловым потоком как для термически тонкого твердого топлива. Обнаружено линейное поведение между скоростью потери массы и падающим тепловым потоком, где большая объемная доля образца приводит к большей потере массы в процессе пиролиза. Проанализированы изменение температур и скорости измерения массы при различных значениях тепловых потоков.

В работе [109] экспериментально изучался процесс воспламенения тонкого природного топлива (сосновой хвои) путем имитации разряда молнии с длительным током. Вероятность воспламенения была предсказана методом логистической регрессии. Было установлено, что в современных условиях эксперимента энергия имитируемого разряда, необходимая для зажигания хвои сосны, увеличивается с увеличением содержания влаги в топливе. Продолжительность горения в значительной степени зависит от содержания влаги в топливе, а содержание влаги доминирует над риском воспламенения от молнии, когда оно достаточно высокое. Визуальное наблюдение показало, что воспламенение проходило по совершенно особому процессу, включающему три стадии: стадию нагрева разряда, стадию термической обратной связи и стадию самоподдерживающегося пламени, отличную от зажигания от огненных брэндов или излучения пламени.

Экспериментальные исследования по зажиганию проводятся не только для хвойных пород, но и для различных других видов лесных горючих материалов чтобы определить их склонность к воспламенению [110]. Проводятся экспериментальные исследования зажигания различных лесных горючих материалов нагретыми частицами [111-114].

В [115] образцы хвои ели и листьев березы зажигались нагретой до высоких температур частицей. В результате экспериментов была определена зависимость времён задержки зажигания от начальной температуры частицы.

Отмечен линейный характер зависимости. При достижении температуры частицы значения 1300 К время задержки зажигания не зависит от размеров источника нагрева. Отмечено, что при воспламенении имеет место комплекс взаимосвязанных диффузионных и конвективных процессов как в пористой структуре материала, так и над ним.

Также в литературе встречаются статьи, сочетающие экспериментальное и математическое исследование процесса зажигания твердыми частицами [116-118]. Так в [118] рассматривается зажигание лесного топлива нагретыми частицами из нержавеющей стали и алюминия с целью определить тип зажигания (пламенное, тлеющее или его отсутствие). Исследование снабжено видеogramмой процесса поверхностного тления слоя лесного горючего материала после выпадения на него частицы. Подчеркнуто, что на воспламенение влияет как вид топлива, так и параметры частицы и окружающей среды. Подобные исследования проведены и для древесины [119,120].

В [121] рассматривается зажигание лесных топлив нагретой металлической частицей уже в рамках математической модели. Предполагается, что сухой слой лесного горючего материала с неоднородными включениями древесины расположен на поверхности почвы. На данный слой выпадает нагретая частица. Задача теплопроводности решается в рамках двумерной постановки с соответствующими граничными условиями с учетом реакций пиролиза в материале. В результате получена типичная картина изменения температуры в области решения задачи, а также оценена динамика нагрева поверхностного и более глубинного слоя. Отмечено, что прогрев вызван в основном теплопередачей по вертикальной координате от нагретой до высоких температур частицы в поверхностном слое. Наличие же включений что наличие включений не оказывает существенного влияния на процессы теплообмена.

В [122] на основе экспериментов построена трехмерная математическая модель воспламенения слоя лесного горючего материала другим нагретым элементом лесного горючего материала (сосновые веточки и сосновая кора). Анализ результатов показал, что длина элемента является основным фактором в

начале воспламенения. Отмечено, что в данных условиях сосновая веточка представляет большую угрозу для начала пожара, чем сосновая кора. Сравнение расчетного и наблюдаемого времени зажигания слоя показало хорошее согласование с экспериментальными результатами. Также воспламенения слоя лесного горючего материала исследуется в [123].

Значительно меньше работ посвящено возгоранию образцов листьев при различных видах нагрева [124,125]. На основании данных исследований было охарактеризовано поведение образца при различных видах нагрева с описанием последовательно протекающих стадий, оценено влияние начальной влажности на воспламенения, получены типичные картины распределения температур и изменения убыли массы от времени. Эти данные позволяют дополнить имеющиеся данные о возгорании ЛГМ. Также есть модели теплообмена в элементе растительного горючего материала, позволяющие изучить поведения образца при различных сценариях лесного пожара и особенности изменения температуры в образце [126].

В работе [127] был проведен качественный и количественный анализ горения репрезентативных образцов Калифорнии чапараль (*manzanita*, *scrub oak*, *hoaryleaf ceanothus*, and *chamise*). Экспериментальная установка имитировала ситуацию нахождения ЛГМ во фронте лесного пожара. Принималось, что тепловая энергия от фронта пожара передавалась двумя путями – конвекцией и излучением. Процесс зажигания и горения фиксировался с помощью видеокамеры. Данные о температуре поверхности образцов (кроме образца *Adenostoma flaviculatum*) были получены с помощью термопар типа К. В рамках качественного анализа исследовалось влияние формы и ориентации образца на воспламенение. Образцы породы *chamise* были исследованы отдельно из широких листьев при изучении эффектов формы и ориентации. Было обнаружено, что листья сжигаются по аналогичной схеме для широколиственных видов при разрезании в похожих формах. Образцы круглой формы воспламеняются по периметру образца, затем распространяются к центру. Образцы квадратной формы зажигались сначала по углам, затем

распространялись по периметру, а затем горели в середине. Замечено и значительное влияние ориентации образца. Широкие листья, удерживаемые горизонтально, демонстрируют совершенно иной характер сгорания, чем при вертикальном положении. Когда листья были ориентированы вертикально над плоскостью горелка пламени, листья воспламеняются на краю, ближайшем к пламени, и распространяются на верхний край листа независимо от различий в форме. Маленькие пузырьки наблюдались в центральной часть горизонтально ориентированных образцов широких листьев до возгорания. Когда содержание влаги в образце *manzanita* превысила 100%, эти пузырьки лопнули до начала горения с образованием кратера на поверхности образца. Растение *chamise* состоит из маленьких иголок и стебля. При воспламенении сначала зажигались кончики иголок, а затем стебель. В случае вертикального положения сначала зажигались иголки в непосредственной близости к источнику возгорания и затем пламя продвигалось вверх.

Качественные эксперименты позволили определить приблизительное место воспламенения, куда в дальнейшем располагались термопары для количественного анализа. В рамках качественного анализа удалось определить температуру воспламенения и времена задержки зажигания для образцов *manzanita* и *scrub oak*. Распределение температуры воспламенения, соответствует нормальному распределению. Отмечено влияние влажности образца на температуру воспламенения и время задержки зажигания.

Работа [128] также описывает экспериментальные исследования зажигания 14 видах живых (с высоким содержанием влаги) образцов, фокусируясь на воздействии влаги при сгорании. Чтобы лучше проанализировать последствия испарения влаги из образца топлива, масса, выпущенная при воспламенении, сравнивалась исходной массы влаги для нескольких видов топлива. Отмечено, что зажигание образцов в основном происходило в конце местного, но не глобального испарения. Одна из причин, по которой в образце осталась влага, связана с локальным воспламенением, показывающим, что сгорание и испарение происходят одновременно в

глобальном масштабе. Воспламенение могло произойти на кончике или игле, в то время как основная масса влаги оставалась во внутренних слоях образца. Другая причина оставшейся влаги может быть связана с особенностями физической природы живых образцов. Влага не могла вырваться за внешние границы образца, поскольку внешние клетки сначала должны были подвергнуться пиролизу. Были построены и проанализированы профили изменения масс и температур. Температурные профили показали плато при 200–300 °C на периметр листа, а не при 100 °C, а также плато 140 °C для внутренней части листа. Все это позволяет сделать вывод о том, что влага остается в листе после возгорания для всех живых видов, что противоречит классической модели горения.

В работе [129] проведено математическое моделирование пиролиза и горения вертикально ориентированный лист манзанита (*Arctostaphylos glandulosa*). При моделировании варьировалась влажность образца, что соответствовало различным состояниям листа (живое и мертвое). При исследовании топливо подвергалось воздействию потока горячих газов, что соответствовало реально экспериментальной установке. Наблюдается хорошее согласование с ранее опубликованными экспериментальными данными. Изучение динамики скорости тепловыделения подтвердило, что увеличение влажности задерживает время зажигания. Моделирование показало, что тепловые, импульсные и концентрационные пограничные слои образуются на гранях листа. Пограничные слои сыграли значительную роль в нагреве, последующем испарении влаги и пиролиз листьев. Внутри листьев был обнаружен фронт испарения, распространяющийся внутрь от краев. Значительное количество жидкой влаги осталось в листе после возгорания. Приведен анализ изменения массы образцов температуры и динамики изменения фаз.

В [130] представлена методика оценки времени воспламенения твердых материалов. Она основана на наблюдении, что время до воспламенения пропорционально квадрату интеграла времени от падающего теплового потока.

Эта связь может быть легко продемонстрирована для классических решений для времени зажигания, которые учитывают постоянные падающие тепловые потоки. Таким образом, время зажигания может быть рассчитано только с учетом падающего теплового потока на образец (расчеты газовой фазы) и результатах экспериментального зажигания. Предлагаемый подход может оказаться эффективным при его использовании в рамках моделирования зажигания при лесном пожаре.

Важно отметить, что современные исследования показывают различия в нижних пределах хвойных и лиственных лесных горючих материалах. По предположениям ученых этот факт объясняется различием поперечных размеров единичных элементов ЛГМ (хвоинок и листьев). Так, площадь листа значительно превышает площадь хвоинки, что ведет к разнице в площадях отвода теплоты. Это приводит к различиям во временах задержки зажигания примерно в 2,5 раза [131,132]. Значит, лиственный элемент ЛГМ, помещенный в подстилку, состоящую преимущественно из хвои, может стать причиной возгорания и развития лесного пожара. Следовательно, важно уделить внимание особенностям зажигания лиственных ЛГМ.

Таким образом, анализ современных исследований показывает, что воспламенение листа березы изучено недостаточно. В литературе отсутствуют данные о зажигании листа березы в условиях верхового пожара.

#### 1.6 Выводы по результатам обзора литературы

1. Анализ источников литературы, посвященных описанию различных видов пожаров показал, что лесные пожары могут различаться в зависимости от скорости распространения, затрагиваемой площади, типа яруса, который страдает от огня. Однако любой пожар наносит колоссальный ущерб лесным массивам. Следовательно, необходимо совершенствовать системы прогноза лесной пожарной опасности для сохранения лесного фонда планеты.

2. Рассмотрение существующих систем классификации лесных горючих материалов показало, что все эти классификации носят описательный характер. Также некоторые из них применимы только в некоторых регионах

планеты, следовательно, они не являются универсальными. Это препятствует унификации данных для дальнейшего их применения в информационных системах прогноза лесной пожарной опасности. Целесообразно разработать более универсальную классификацию лесных горючих материалов, которая может быть распространена на любой лесной массив

3. Современные исследовательские работы, посвященные изучению процессу сушки, говорят о непосредственной связи между влагосодержанием лесных горючих материалов и возможностью их зажигания. Среди основных направлений текущих исследований можно выделить определение параметров данного процесса для различных типов ЛГМ, а также разработка математических моделей сушки.

4. В ходе процесса пиролиза в атмосферу выделяются газообразные продукты разложения вещества, которые впоследствии являются причиной зажигания ЛГМ и поддерживают их горения. Исследователи отмечают, что особенности пиролиза напрямую зависит от состава биомассы. Также в литературе ведутся дискуссии о математическом описании проходящих в ходе данного процесса реакций, а также ведутся исследования по определению теплофизических и кинетических параметров этого процесса для различных видов ЛГМ.

5. Зажигание лесных горючих материалов служит началом возникновения лесного пожара. В настоящее время проводятся экспериментальные и теоретические исследования этого процесса. В работах ученых отмечено, что различные виды ЛГМ зажигаются по-разному. Поэтому целесообразно продолжать исследования в данном направлении для получения полноценной картины закономерностей зажигания для разных случаев.

## 2. Объекты и методы исследования

### 2.1 Объект исследования

В качестве объекта исследования был выбран элемент лесного горючего материала – лист березы повислой. Выбор обусловлен широким ареалом распространения этого вида в различных регионах планеты. Так, данный вид произрастает на территории средней полосы России, в лесах Западной Сибири, Алтайского края, вблизи озера Байкал, лесных массивах Северного Казахстана, в странах Европы, расположенных на Пиренейском полуострове. Также этот вид можно встретить в некоторых странах Азии (Центральная часть) и Африки (прохладные регионы ЮАР, горы Марокко) [133]. Стоит отметить, что данный вид часто произрастает в смешанных лесах, состоящих из других хвойных и лиственных пород. Как было отмечено ранее, закономерности процесса зажигания у разных видов ЛГМ могут существенно отличаться, в том числе и непосредственно время задержки зажигания. Значит, образец листа березы данного вида может стать причиной возможного лесного пожара.

Рассмотрим морфологические характеристики выбранного образца. Длина образца составляет величину порядка 4-6 сантиметров, ширина варьируется в диапазоне 3-5 сантиметров, а толщина равна примерно 0,2 миллиметра. Форма листа может быть ромбовидной, треугольно-яйцевидной или ромбовидной. Вершина листа вытянутая, часто бывает загнута в бок. Основание листа чаще всего ширококлиновидное, иногда бывает плоско срезанным. Черешок обычно имеет длину около 2-3 сантиметров [133,134]. Типичный образец рассматриваемого листа березы приведен на рисунке 1.

В рамках исследований предполагалось, что образец листа был помещен в высокотемпературную среду. Рассматривается система «элемент ЛГМ – воздух». При контакте с высокотемпературной средой образец прогревается за счет механизма теплопроводности, затем из образца испаряется свободная влага, далее следует стадия термического разложения вещества с образованием газообразных продуктов пиролиза. После нагрева выделившихся продуктов происходит воспламенение образца в газовой фазе.



Рисунок 1 – Типичный лист вида берёзы повислой

## 2.2 Методика проведения экспериментов

В рамках магистерской диссертации проводилось экспериментальное исследование процесса зажигание березового листа в высокотемпературной среде. В качестве образцов использовались образцы, собранные в Тимирязевском лесничестве Томской области. В данном лесничестве береза является одной из типичных пород, наравне с сосной и осиной. Также в лесном массиве были представлены такие породы как ель, пихта, лиственница, кедр. Поэтому в данном случае правомерно считать собранные образцы типичными для данного смешанного лесного массива.

Эксперименты проводились с использованием муфельной печи марки НеваТерм. Температура в канале печи варьировалась в диапазоне от 700 до 1000 °С. Эти значения температур характерны для фронтов различных видов лесных пожаров. Температура задавалась с помощью терморегулятора ВАРТА ТП703. Данный регулятор позволяет поддерживать температуру в канале печи с точностью 1°С [135]. Перед проведением экспериментов образцы помещались в сушильный шкаф для удаления лишней влаги. После этого образцы выдерживались на открытом воздухе для достижения равенства температуры

поверхности и температуры воздуха в лаборатории. Перед проведением исследований измерительная система программного обеспечения камеры была откалибрована. В начале эксперимента образец (лист берёзы) закреплялся на специальной державке. Далее эта державка помещалась непосредственно в канал печи, где и происходило зажигание образца. Свет в исследуемую область подводился благодаря закрепленному на штативе прожектору. Регистрация процесса осуществлялась за счет высокоскоростной камеры FASTCAM SA 1.1 Model 675K – M1, установленной на противоположной стороне канала печи. Видеозапись с камеры передавалась непосредственно на персональный компьютер. Дымовые газы удалялись из области эксперимента с помощью вытяжной установки с канальным вентилятором. По описанной методике проводилось по 6 экспериментов с идентичными по форме и размерам образцами для каждого значения температуры среды. Схема экспериментального стенда приведена на рисунке 2.

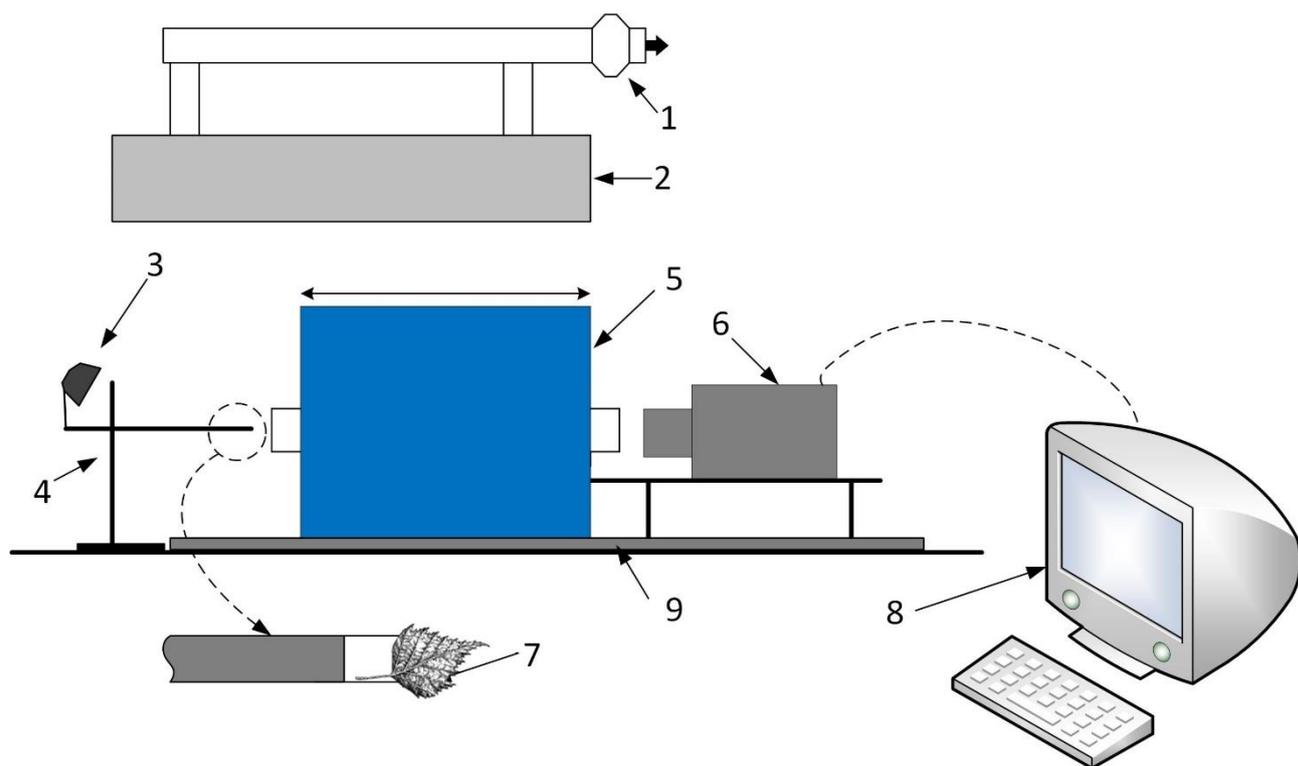


Рисунок 2 – Схема экспериментального стенда:

1 – вентилятор; 2 – вытяжка; 3 – прожектор; 4 – штатив; 5 – муфельная печь; 6 – высокоскоростная камера; 7 – исследуемые образцы; 8 – ПК; 9 – рельсы стенда.

Изображение с камеры обрабатывалось при помощи программного обеспечения Photron Fastcam Viewer. При просмотре полученных видеозаписей определялось время задержки зажигания по формуле:

$$\tau = \frac{n_k - n_n}{f}, \text{ с}, \quad (1)$$

где  $n_k$  – номер кадра, характеризующий начало зажигания летучих веществ;

$n_n$  – номер кадра, характеризующий начало теплового воздействия;

$f$  – скорость съемки высокоскоростной камеры, кадров/с.

После проведения экспериментов была проведена статистическая обработка полученных результатов. В результате была получена зависимость времени задержки зажигания образца от температуры среды с указанными доверительными интервалами. Значение доверительной вероятности было равно  $P=0,95$ .

### 2.3 Метод конечных разностей

В ходе математического моделирования для решения дифференциальных уравнений применялся метод конечных разностей. Этот метод заключается в замене частных производных дифференциального уравнения на их конечно-разностные аппроксимации. На область решения задачи накладывается конечно-разностная сетка, в результате чего тело представляет собой совокупность узлов. В результате замены частных производных на конечные разности получается незамкнутая система линейных алгебраических уравнений для вычисления температуры, как локальной характеристики каждого узла сетки. Полученную систему замыкают с помощью разностных аппроксимаций для граничных условий и решают численным методом [136].

Рассмотрим алгоритм решения типичной задачи. На первом этапе необходимо построить конечно-разностную сетку. Затем определяется значение температуры  $i$ -го узла в момент времени  $t$ . После этого следует заменить дифференциальные производные на их конечно-разностный аналоги, в результате чего получится система линейных алгебраических уравнений.

Аппроксимации можно проводить явным или неявным способом. Явный способ аппроксимации предполагает вычисление температуры на новом временном слое на основе данных с трех точек предыдущего слоя. В случае неявного способа значение температуры используются три точки на новом временном слое и одна точка на старом временном слое. Отмечено, что применение неявной схемы аппроксимации более предпочтительно, поскольку явная схема может быть неустойчивой в некоторых случаях [136].

Итак, полученная в ходе аппроксимации система линейных алгебраических уравнений сводится к общему виду, а именно трехточному уравнению второго порядка:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot T_{i-1}^{n+1} = F_i \quad (2)$$

и определить коэффициенты  $A_i, B_i, C_i, T_i$ .

Далее уравнение (2) преобразуется в двухточное уравнение вида:

$$T_i^{n+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{n+1} + \beta_i \quad (3)$$

В полученном уравнении (3) значение индексов необходимо уменьшить на единицу:

$$T_{i-1}^{n+1} = \alpha_{i-1} T_i^{n+1} + \beta_{i-1} \quad (4)$$

Подставим уравнения (3) и (4) в уравнение (2). В результате имеем:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot \alpha_{i-1} \cdot T_{i-1}^{n+1} + C_i \cdot \beta_{i-1} = F_i, \quad (5)$$

где

$$A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}, B_i = \frac{2 \cdot \lambda}{h^2} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}, F_i = -\frac{\rho \cdot c}{\tau} T_i^n, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность вещества,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности вещества,  $c$  – теплоемкость вещества,  $h$  – шаг по координате.

Из уравнения (5) получаем:

$$T_i^{n+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \cdot T_{i+1}^{n+1} + \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \quad (7)$$

Причем

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \quad (8)$$

Для определения  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  необходимо знать значения  $\alpha_1$  и  $\beta_1$ . Значения этих коэффициентов определяется исходя левого граничного условия. Также задается значение температуры на другой границы области с помощью правого граничного условия. Затем для каждого узла разностной сетки необходимо определить значения прогоночных коэффициентов  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ . После этого запускается процесс обратной прогонки, в ходе которого вычисляется распределение температуры в области решения [136].

Поскольку в ходе математического моделирования рассматривались задачи, в которых область решения представляла собой разнородную структуру, стоит отметить, что в данном случае описания границы контакта использовалось граничное условие четвертого рода. На границе двух материалов задавались значения коэффициентов  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ . Дискретизация уравнений проводилась с помощью локально одномерной схемы А.А. Самарского. Решение полученной системы осуществляется методом прогонки с учетом неоднородностей в элементе.

Реализация вычислений осуществлялась с помощью программного пакета RAD Studio. Все графические результаты обрабатывались с помощью программного пакета OriginPro.

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

Студенту:

Группа 5БМ94	ФИО Кириенко Виктории Андреевне
-----------------	------------------------------------

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	-30% премии; 20% надбавки; 30% районный коэффициент.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2%

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

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Анализ конкурентных технических решений; SWOT – анализ; Оценка готовности проекта к коммерциализации
2. Разработка устава научно-технического проекта	Цели и результат проекта; Организационная структура проекта; Ограничения и допущения проекта.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Планирование управление НТИ: – определение структуры работ; – определение участников пунктов работ; – определение продолжительности работ; – построение диаграммы Гантта. Формирование бюджета затрат НТИ: – материальные затраты проекта; – затраты на оборудование; – основная заработная плата исполнителей – отчисления во внебюджетные фонды;
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Оценка сравнительной эффективности НТИ: – определение интегрального финансового показателя разработки; – определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; – определение сравнительной эффективности проекта

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

1. Анализ конкурентных технических решений
2. Матрица SWOT
3. Оценка готовности проекта к коммерциализации
4. График проведения и бюджет НТИ
5. Оценка сравнительной эффективности НТИ

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ94	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.

Целью выпускной квалификационной работы является 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. Полученная база результатов может быть использована при прогнозе и ликвидации лесных пожаров. Для математического моделирования использовалась среда программирования RAD Studio. Все графические результаты обрабатывались с помощью программного пакета OriginPro.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта по созданию математической модели тепломассопереноса в образце листа березы. Для достижения этой цели нужно решить следующие задачи:

1. провести анализ конкурентных технических решений
2. провести SWOT-анализ
3. оценить степень готовности научной разработки к коммерциализации
4. разработать устав научно-технического проекта
5. осуществить планирование научно-исследовательской работы
6. определить бюджет научного исследования
7. определить эффективность исследования

#### 4.1 Анализ конкурентных технических решений

В процессе написания магистерской диссертации потенциал разработки был оценен с помощью различных техник. Детальный анализ конкурирующих разработок позволяет оценить текущие тенденции в данной области, выявить основные преимущества и недостатки существующих разработок, наметить курс дальнейшего развития научного исследования.

Разработанная математическая модель тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала может быть использована для различных систем геомониторинга. Существует схожая математическая модель для другого вида лесного горючего материала. В конечном итоге она будет выбрана в качестве конкурирующего решения.

Проведем анализ конкурентного решения с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к</sub>
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Энергоэффективность	0,06	5	5	0,3	0,3
Надежность	0,05	5	4	0,25	0,2
Унифицированность	0,12	5	3	0,6	0,36
Потребность в ресурсах памяти	0,05	3	4	0,15	0,2
Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,12	4	3	0,48	0,36
Простота эксплуатации	0,05	5	4	0,25	0,2

Качество интеллектуального интерфейса	0,05	5	5	0,25	0,25
Экономические критерии эффективности					
Конкурентоспособность продукта	0,15	5	3	0,75	0,45
Уровень проникновения на рынок	0,05	3	3	0,15	0,15
Перспективность рынка	0,1	5	5	0,5	0,5
Цена	0,07	3	4	0,21	0,28
Послепродажное обслуживание	0,05	3	3	0,15	0,15
Финансирование научной разработки	0,04	3	4	0,12	0,16
Срок выхода на рынок	0,04	5	4	0,2	0,16
Итого	1	59	54	4,36	3,72

Позиция разработки и конкурентов оценивается по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (50)$$

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

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что рассматриваемая разработка по многим показателям является наиболее предпочтительной по сравнению с конкурентом, поскольку значение 4,36 больше значения 3,72.

#### 4.2 SWOT-анализ

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. На третьем этапе составляется итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в данном разделе в таблице 2.

Таблица 2 – SWOT-анализ проекта

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1: Бесплатное программное обеспечение для математического моделирования</p> <p>С2: Наличие экспериментальной базы.</p> <p>С3: Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С4: Квалифицированный персонал.</p> <p>С5: Малые трудовые ресурсы.</p> <p>С6: Промежуточные результаты исследования были ранее опубликованы и оценены научным сообществом</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1:Отсутствие прототипа научной разработки.</p> <p>Сл2: Высокая стоимость программного обеспечения и оборудования для проведения экспериментов.</p> <p>Сл3:Отсутствие инжиниринговой компании, способной осуществить разработку модели.</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1:Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В2:Появление дополнительного</p>	<p>Описанные сильные стороны проекта позволяют осуществить возможности. Так, использование вычислительных мощностей и кадров ТПУ, позволит ускорить вычисления и повысить их</p>	<p>Слабые стороны, такие как высокая стоимость оборудования и отсутствие прототипа модели могут существенно затянуть сроки проекта, поскольку необходимо</p>

<p>спроса на данный продукт.</p> <p>В3:Повышение стоимости конкурентах разработок.</p> <p>В4: Улучшение методов моделирования</p>	<p>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 экспериментальные данные для сравнения полученных результатов, то конечный продукт более качественный, что увеличит спрос.</p>	<p>время для разработки качественного прототипа и методики эксперимента, а также для согласования финансовых вопросов.</p>
<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</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>

	обеспечить финансирование проекта	
--	--------------------------------------	--

Таким образом, выполненный SWOT-анализ позволяет 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. Основная сложность данного проекта видится в незаинтересованности не только частных лиц, но и государства в данной работе, что приведет к прекращению разработки модели.

#### 4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Целесообразно оценить степень готовности научной разработки к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для её проведения. Это позволяет адекватно оценить текущее состояние дел, выявить и в дальнейшем устранить существующие пробелы. Данная оценка проводится с помощью заполнения специальной формы (таблица 4).

При проведении анализа по таблице по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

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

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (51)$$

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

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение  $B_{\text{сум}}$  получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Заполним бланк оценки для рассматриваемого научного проекта.

Таблица 3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	3
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	3
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1

8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	3
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	4	3
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	5	5
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	Итого баллов	50	50

Таким образом, анализ результатов оценки готовности к коммерциализации показал, что перспективность проекта находится на среднем уровне. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта, которая включает в себя анализ рынков сбыта, разработку детального бизнес-плана и разработку стратегии продвижения и реализации научной разработки.

#### 4.4. Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются

внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Устав научно-исследовательского проекта имеет следующую структуру:

#### 1. Цели и результаты проекта

В данном разделе приводится информация о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представим в таблице 4.

Таблица 4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Государство	Углубление имеющихся знаний о теплопереносе в элементе лесного горючего материала, разработка мер по предотвращению лесных пожаров, создание программ для геомониторинга лесных массивов на основе результатов работы
ТПУ	Участие в конференциях, публикации в высокорейтинговых журналах.

Представим информацию об иерархии целей проекта и критериях достижения целей в таблице 5.

Таблица 5 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Разработать математическую модель теплопереноса в элементе лесного горючего материала, находящегося под воздействием высокотемпературной среды
Ожидаемые результаты проекта:	Успешное внедрение модели для геомониторинга лесных массивов
Критерии приемки результата проекта:	Сравнение полученных результатов с предыдущими и подобными

	исследованиями
Требования к результату проекта:	Требование:
	Выполнение проекта строго в последовательности на основе рекомендаций.
	Достоверность экспериментальных данных
	Достоверность математической модели

## 2. Организационная структура проекта

Определим участников рабочей группы данного проекта, роль каждого участника в данном проекте, а также функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Представим эту информацию в таблице 6.

Таблица 6 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Барановский Н.В ТПУ, доцент	Руководитель проекта	Координация и контроль выполнения работ по проекту	48
2	Кириенко В.А., ТПУ, инженер	Исполнитель проекта	Выполнение работ по проекту	704
ИТОГО:				752

## 3. Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Данные сведения приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
2.3.1. Бюджет проекта	2874373,6 рублей
2.3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
2.3.2. Сроки проекта:	5 месяцев
2.3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.02.2021
2.3.2.2. Дата завершения проекта	11.05.2021

Таким образом, установлены цели и результаты проекта, рассмотрена организационная структура проекта, определены ограничения и допущения проекта. Данная информация закрепляется в уставе проекта.

#### 4.5 Планирование управления научно-техническим проектом

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

- 1) определение структуры работ;
- 2) определение участников пунктов работ;
- 3) определение продолжительности работ;
- 4) построение диаграммы Ганта.

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 8.

Таблица 8 – 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
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.

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Календарный план проекта представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение технического задания	5	01.02.21	05.02.21	Барановский Н.В
2	Подбор и изучение теоретического материала по данной теме	22	06.02.21	28.02.21	Кириенко В.А.
3	Выбор направления исследований	3	01.03.21	03.03.21	Кириенко В.А. Барановский Н.В
4	Составление календарного плана работ	3	04.03.21	06.03.21	Кириенко В.А. Барановский Н.В
5	Создание расчетной модели	7	07.03.21	14.03.21	Кириенко В.А.
6	Проведение теоретических	9	15.03.21	23.03.21	Кириенко В.А.

	расчетов и обоснований				
7	Проведение экспериментального исследования	4	24.03.21	27.03.21	Кириенко В.А.
8	Анализ результатов и сопоставление теоретических и экспериментальных исследований	18	28.03.21	14.04.21	Кириенко В.А.
9	Оценка эффективности полученных результатов	10	15.04.21	24.04.21	Кириенко В.А.
10	Контроль качества выполнения проекта и консультирование инженера	5	25.04.21	30.04.21	Барановский Н.В
11	Составление пояснительной записки	12	01.05.21	11.05.21	Кириенко В.А.
Итого			98		

Диаграмма Гантта – тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы 6 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного 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															■	■

Рисунок 25 – Календарный план-график проведения проекта

Таким образом, на основании построенного графика продолжительности реализации проекта можно заключить, что продолжительность работ по выполнению задания составит около 98 дней. Начало разработки проекта намечено на первую неделю февраля, а окончание на третью неделю мая.

#### 4.6 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета проекта необходимо учесть все виды расходов, которые связаны с его выполнением. Для формирования бюджета проекта используется следующие группы затрат:

- 1) материальные затраты проекта;
- 2) затраты на оборудование;
- 3) основная заработная плата исполнителей проекта;
- 4) отчисления во внебюджетные фонды;

К материальным затратам относятся: приобретаемые со стороны сырье и материалы, покупные материалы, канцелярские принадлежности, картриджи и т.п. Список материальных затрат приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за единицу, руб	Затраты на материалы З <sub>м</sub> , 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

Статья затрат на оборудование включает все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ. В данном случае таковым оборудованием являются составные части экспериментального стенда. Сводные данные по стоимости необходимого оборудования представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименования оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб	Общая стоимость оборудования, тыс.руб
1	Трубчатая печь	1	150	150
2	Высокоскоростная камера	1	2500	2500
3	Персональный компьютер	1	50	50

4	Штатив	1	1,5	1,5
Итого				2701,5

Рассчитаем основную заработную плату исполнителей проекта. Основная заработная плата для руководителя проекта и инженера рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \text{ руб.}, \quad (52)$$

где  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d}, \text{ руб.}, \quad (53)$$

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.

Таблица 12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск	48	48
– невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника вычисляется по формуле:

$$Z_M = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p, \text{ руб.}, \quad (54)$$

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

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

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

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

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$Z_m = 35120 \cdot (1 + 0,2 + 0,3) \cdot 1,3 = 68484 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{68484 \cdot 10,4}{251} = 2837,6 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 2837,6 \cdot 16 = 45401,6 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для инженера:

$$Z_m = 12151 \cdot (1 + 0,2 + 0,3) \cdot 1,3 = 23694,5 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{23694,5 \cdot 10,4}{251} = 981,8 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 981,8 \cdot 88 = 86398,4 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведем в таблице 13.

Таблица 13 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Руководитель	35120	0,3	0,2	1,3	68484	2837,6	16	45401,6
Инженер	12151	0,3	0,2	1,3	23694,5	981,8	88	86398,4
Итого:								131800

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{осн}}, \text{ руб} \quad (55)$$

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

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды приведем в таблице 14.

Таблица 14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.
Руководитель	45401,6
Инженер	86398,4
Коэффициент отчислений	0,302
Итого:	39803,6

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 15.

Таблица 15 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты	1270
2. Расходы на оборудование	2701500
3. Основная заработная плата	131800
4. Отчисления во внебюджетные фонды	39803,6
Бюджет затрат:	2874373,6

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления). Бюджет затрат составил 2874373,6 рублей.

#### 4.7 Оценка сравнительной 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:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (56)$$

где  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – 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 «RAD Studio». 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.

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{2854832,13}{3280000} = 0,870,$$
$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}2} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{3280000}{3280000} = 1.$$

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

$$I_{pi} = \Sigma(a_i \cdot b_i), \quad (57)$$

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:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{pi}}{I_{\text{фин.}i}} \quad (58)$$

$$I_{\text{исп.}1} = \frac{4,74}{0,870} = 5,45;$$

$$I_{\text{исп.}2} = \frac{4,09}{1} = 4,09;$$

С целью определения наиболее целесообразного варианта из предложенных сравним интегральные показатели эффективности вариантов

исполнения разработки и определим сравнительную эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ )

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}}, \quad (59)$$
$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{5,45}{4,09} = 1,34.$$

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

Таким образом, на основании рассчитанных показателей эффективности, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

#### 4.8 Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

1. В результате анализа конкурентных технических решений было установлено, что рассматриваемая разработка по многим показателям является наиболее предпочтительной по сравнению с конкурентной.

2. В ходе SWOT-анализа были определены сильные и слабые стороны проекта, основные возможности и угрозы. Основным преимуществом является дальнейшая перспектива прогнозирования пожара лесного массива задолго до видимых причин к его возникновению. Основная сложность данного проекта видится в незаинтересованности не только частных лиц, но и государства в данной работе, что приведет к прекращению разработки модели

3. Оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации показала, что перспективность проекта находится на среднем уровне. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта.

4. В рамках проработки подраздела «Инициация проекта» были определены основные цели и результаты проекта, основные заинтересованные стороны, выявлены ограничения и допущения проекта.

5. При планировании научно-техническим проектом был построен календарный план-график проведения работ каждого исполнителя проекта. Общее количество дней на выполнение проектных работ составляет 98 дней.

6. При определении бюджета проекта были посчитаны материальные затраты проекта, затраты на оборудование и заработную плату исполнителей, а также отчисления во внебюджетные фонды. Суммарные затраты на проектирование составили 2874373,6 рублей.

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

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

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5БМ94	Кириенко Виктории Андреевне

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>НОЦ И.Н. Бутакова</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

<b>Математическое моделирование и экспериментальное исследование тепломассопереноса при воздействии высокотемпературной среды на типичный лесной горючий материал</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: элемент лесного горючего материала. Область применения: прогнозирование лесных пожаров, математическое моделирование лесных пожаров.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021)</li> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</li> <li>– ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</li> <li>– ГОСТ Р 50923-96. Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<b>Вредные факторы:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Повышенный уровень шума</li> <li>– Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении</li> <li>– Недостаточная освещенность рабочей зоны</li> </ul> <b>Опасные факторы:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Опасные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий</li> <li>– Чрезмерно высокая температура объекта, способная вызвать ожоги тканей организма человека</li> </ul>

<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Атмосфера: выброс углекислого газа при горении Гидросфера: загрязнение водоемов твердыми бытовыми отходами Литосфера: эрозия почв, загрязнение почв твердыми бытовыми отходами
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	– Возможные ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения – обрушение здания, аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения населения, пожар – Наиболее типичная ЧС - пожар.

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пашков Е.Н.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ94	Кириенко Виктория Андреевна		

## 5. Социальная ответственность

### 5.1 Введение

При проведении исследований в рамках магистерской диссертации изучались особенности процессов тепломассопереноса в элементе лесного горючего материала при воздействии на него высокотемпературной среды. Объектом исследования является элемент лесного горючего материала – лист березы.

Исследования осуществлялись с применением технологий математического и физического эксперимента. При проведении физического эксперимента были исследованы основные закономерности зажигания образца, а также фиксировались времена задержки зажигания для различных температур среды. Результаты эксперимента позволили определить физико-химический механизм зажигания элемента лесного горючего материала. Математическое моделирование позволило получить картины температурных полей листа в различные моменты времени и при различных параметрах высокотемпературной среды. Поскольку основная задача исследований заключалась в моделировании процессов на основе экспериментальных данных, то ниже будет приведена необходимая информация о социальной ответственности человека, работающего с ПЭВМ.

Безусловно, проведение любого научного 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 непосредственно при проведении исследования. Цель данного раздела – оценка возможных факторов риска и методов их предотвращения при проведении исследования.

В данном разделе будут проанализированы особенности обеспечения правовой и производственной безопасности исследователя, а также рассмотрены вопросы экологической безопасности и безопасности в чрезвычайных ситуациях.

## 5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Права и обязанности работника и работодателя, вопросы охраны труда, профподготовки, переподготовки и повышения квалификации, трудоустройства, социального партнерства устанавливаются Трудовым кодексом Российской Федерации [136]. Также в кодексе закреплены правила оплаты и нормирования труда, порядок разрешения трудовых споров.

Согласно Трудовому кодексу, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю [137]. Также статья 100 ТК РФ говорит о том, что режим рабочего времени должен предусматривать продолжительность рабочей недели [137]. Для преподавателей и студентов ТПУ правила внутреннего распорядка организации устанавливают шестидневную рабочую неделю с одним выходным днем.

Так как изучение процессов 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.

При работе с персональным компьютером большое внимание уделяется организации рабочего места сотрудника. В данном случае работа выполняется сидя. Эргономические требования к такому рабочему месту регламентируются соответствующим международным стандартом [138]. Согласно данному стандарту, конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации и т.д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы. При проектировании оборудования и организации рабочего места следует учитывать антропометрические показатели работающего. Оптимальное положение рабочего достигается регулированием и высоты рабочей поверхности [138].

Взаимное расположение элементов рабочего места регламентируется ГОСТ 22269-76. Данный нормативный документ регламентирует рабочую позу

человека оператора, пространство для его размещения, возможность обзора элементов рабочего места и пространства за его пределами, возможность ведения записей, размещения документации и материалов, используемых человеком-оператором. Взаимное расположение элементов рабочего места должно способствовать оптимальному режиму труда и отдыха, снижению утомления оператора, предупреждению появления ошибочных действий [139].

Поскольку проведение рассматриваемого исследования предполагает обработку большого количества данных, то необходимо рассмотреть требования к рабочим местам с дисплеями. Они регламентируются с помощью ГОСТ Р 50923-96. Приведем основные выдержки к организации такого рабочего места [140]:

1. Конструкция рабочего стола должна обеспечивать возможность размещения на рабочей поверхности необходимого комплекта оборудования и документов с учетом характера выполняемой работы.

2. Размеры рабочей поверхности стола должны быть: глубина - не менее 600(800) мм, ширина - не менее 1200(1600) мм.

3. Рабочий стул (кресло) должен обеспечивать поддержание физиологически рациональной рабочей позы оператора в процессе трудовой деятельности, создавать условия для изменения позы с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины, а также для исключения нарушения циркуляции крови в нижних конечностях

4. Дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову

5. Освещенность рабочего места оператора на рабочем столе в горизонтальной плоскости от общего искусственного освещения должна быть от 300 до 500 лк.

6. Для освещения зоны расположения документов допускается установка светильников местного освещения.

7. Отношение яркостей в зоне наблюдения (экран, документ, поверхность стола) должно быть не более 10:1.

8. Температура воздуха на рабочем месте в холодный период года должна быть от 22 до 24 °С, в теплый период года - от 23 до 25 °С.

Часть исследований предполагает нахождения в лаборатории для проведения экспериментов. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях описана в ПНД Ф 12.13.1-03 [141]. Перед проведением исследований сотрудник должен пройти все необходимый инструктажи по соблюдению мер безопасности, изучить все необходимые инструкции лаборатории, а также соблюдать все меры предосторожности.

### 5.3 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 [142]. Возможные опасные и вредные факторы приведены в таблице 17.

Таблица 17 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ	Нормативные документы
	Разработка	
1.Повышенный уровень шума	+	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [7].
2. Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении	+	СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [8].
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [9].

4. Поражение электрическим током	+	ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [11].
5. Чрезмерно высокая температура объекта, способная вызвать ожоги тканей организма человека	+	ГОСТ Р 51337-99 Безопасность машин температуры касаемых поверхностей. Эргономические данные для установления предельных величин горячих поверхностей [12].

Обеспечение комфортных условий труда особенно влияют на производительность труда и снижение профессиональных заболеваний. К ним относятся меры, связанные с исключением травматизма, антисанитарии и возгораний [142].

Рассмотрим подробнее выявленные факторы и мероприятия по снижению их воздействия.

### 5.3.1 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 факторам относятся:

#### 1. Повышенный уровень шума

Шум может оказывать негативное влияние на организм человека. Данное раздражающее влияние из-за длительного воздействия может быть причиной учащенного пульса, дыхания, повышения артериального давления, возникновение головных болей, ослабление внимания 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 [143].

#### 2. Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении

Состояние микроклимата в рабочем помещении нормируется согласно [144]. 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 18.

Таблица 18 – Допустимы параметры микроклимата рабочего помещения

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/сек
Холодный	Ia (до 139)	22-24	21-25	40-60	0,1
Теплый		23-25	22-26	40-60	0,1

### 3. Недостаточная освещенность рабочей зоны

Одной из причин ухудшения самочувствия и здоровья рабочего может быть недостаток естественного света. Например, недостаток света приводит к потере сна и ухудшению здоровья человека. Следовательно, 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. В данных условиях разряд зрительной работы – 4г (работа средней точности) [145]. Согласно [146], к рабочим местам, оборудованным персональным компьютером, применяются следующие требования, приведенные в таблице 19.

Таблица 19 – 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 <sup>2</sup>	не выше 40
Прямая блёскость источника света, кд/м <sup>2</sup>	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

Выполним расчет общего равномерного искусственного люминесцентного освещения по методу светового потока для компьютерного класса длиной  $A=5,7$  м шириной  $B=5,7$  м, высотой  $H=3,5$  м. Необходимо создать освещенность  $E_H = 300$  лк. Высота рабочей поверхности над полом составляет  $h_{рп} = 0,8$  м. Коэффициент отражения стен  $\rho_c = 30$  % (оклеенные светлыми обоями), потолка  $\rho_n = 50$  % (чистый бетонный) [146]. Коэффициент запаса  $K_3=1,5$  (помещения с малым выделением пыли), коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп  $Z = 1,1$  [146].

Выбираем светильник типа ОД,  $\lambda=1,4$ . Принимаем  $h_c = 0,5$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = H - h_c - h_{рп} = 3,5 - 0,5 - 0,8 = 2,2 \text{ м.}$$

Расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,2 = 3,08$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$\frac{L}{3} = \frac{3,08}{3} = 1 \text{ м.}$$

Определим количество рядов светильников и количество светильников в ряду:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3}L)}{L} + 1 = \frac{(5,7 - \frac{2}{3} \cdot 3,08)}{3,08} + 1 \approx 2.$$

$$n_{\text{св}} = \frac{(A - \frac{2}{3}L)}{l_{\text{св}} + 0,5} + 1 = \frac{(5,7 - \frac{2}{3} \cdot 3,08)}{1,23 + 0,5} + 1 \approx 3$$

Размещаем светильники в 2 ряда. В каждом ряду можно установить 3 светильника типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной 1,23 м). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении  $N_{\text{л}} = 12$ .

Индекс помещения равен:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{5,7 \cdot 5,7}{2,2 \cdot (5,7 + 5,7)} = 1,3.$$

где  $S$  – площадь освещаемого помещения,  $\text{м}^2$

По известным значениям  $\rho_{\text{ст}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$  и  $i$ , определяем значение коэффициента использования светового потока по [145]:

$$\eta = 50\%.$$

Световой поток ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_{\text{н}} \cdot S \cdot K_{\text{з}} \cdot Z \cdot 100}{N_{\text{л}} \cdot \eta}, \text{ лм,}$$

где  $E_{\text{н}}$  – нормируемая минимальная освещенность [145]

$$\Phi = \frac{300 \cdot 5,7 \cdot 5,7 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 100}{12 \cdot 50} = 2680 \text{ лм,}$$

По [145] выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛХБ-40 с потоком 2700 лм.

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \left[ \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \right] \cdot 100\% \leq +20\%,$$

$$-10\% \leq \left[ \frac{2700 - 2680}{2700} \right] \cdot 100\% \leq +20\%,$$

$$-10\% \leq 0,74\% \leq +20\%.$$

Световой поток лампы не выходит за пределы диапазона ( $-10\% \div +20\%$ ), поэтому нет необходимости далее корректировать число светильников и ламп.

#### 4. Поражение электрическим током

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 [147]:

- 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.

#### 5. Чрезмерно высокая температура объекта, способная вызвать ожоги тканей организма человека

Работы над исследованием предполагали присутствие в лаборатории с работающей трубчатой печью, нагретой до высоких температур. Горячие поверхности печи, доступные оператору, являются причиной риска ожогов. Прикосновение к горячей поверхности может быть преднамеренным, (например, при прикосновении к рукоятке), или непреднамеренным, если человек находится близко от машины. Степень ожога зависит от температуры и материала поверхности, а также от продолжительности контакта кожи с поверхностью. В [148] приведены данные об области ожоговых порогов для различных поверхностей. Корпус печи металлический, поскольку при проведении экспериментов температура внутри печи составляет величину  $800^{\circ}\text{C}$  и более, ожог может наступить даже при малом времени контакта кожи с поверхностью корпуса.

##### 5.3.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия

Рассмотрим основные рекомендации и мероприятия, способствующие снижению негативного воздействия выделенных ранее факторами:

### 1. Повышенный уровень шума

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.

### 2. Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении

Поддержание оптимальных параметров микроклимата в помещении осуществляется путем отопления (в зимний период), кондиционирования (летний период) и вентиляции (круглогодично) [149].

### 3. Недостаточная освещенность рабочей зоны

Проблему отсутствия или недостатка естественного света на рабочем месте можно решить, используя следующие пункты [150]:

1) улучшение условий путем использования искусственного освещения;

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

3) 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;

4) 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;

5) косметический ремонт помещения с применением светлых отделочных материалов.

### 4. Поражение электрическим током

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 [151] 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 [151].

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.

5. Чрезмерно высокая температура объекта, способная вызвать ожоги тканей организма человека

К мерам защит от ожогов в рассматриваемом случае можно отнести [148]:

1) Конструктивные меры (снижение температуры поверхности; изоляция (например, из дерева, пробки, фибры); ограждение (экран или барьер); конфигурирование поверхности (придание шероховатости, использование ребер)).

2) Организационные меры (предупредительные (предупредительные сигналы, индикация и звуковые сигналы тревоги); инструктаж, обучение; техническая документация).

с) Меры персональной защиты (индивидуальное защитное снаряжение, например, перчатки, специальная защитная одежда, изготавливаемая из прорезиненных и других тканей изолирующего типа).

#### 5.4 Экологическая безопасность

В данном разделе рассмотрим оказываемое на экологию влияние при проведении исследования.

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 был выбран лист березы, который зажигался и сгорал в высокотемпературной среде. Поскольку лист является органическим соединением, состоящим 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, а также не превышает предельно допустимую концентрацию [150]. Таким образом, исследование возгорания лесного горючего материала направлено на то, чтобы наиболее точно прогнозировать вероятные зоны возникновения лесного пожара, что даст возможность его предотвращения или быстрой локализации.

### 5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

К возможным чрезвычайным ситуациям в рассматриваемом случае можно отнести внезапное обрушение здания, аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения населения, пожар.

С учетом специфики рассматриваемого рабочего места наиболее вероятной ЧС можно считать пожар. К возгоранию может привести перегрузка проводов, короткое замыкание, искрение и неисправности оборудования.

Исходя из [152] профилактика пожаров 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

## 5.6 Заключение по разделу «Социальная ответственность»

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, результаты проведенных в рамках магистерской диссертации экспериментальных и теоретических исследований вносят свой вклад в формирование более полной картины знаний о закономерностях процессов, проходящих в типичном лесном горючем материале (лист берёзы повислой) непосредственно перед и во время лесного пожара.

Анализ современных литературных источников по данной тематике показал наличие заинтересованности ученых по всему миру в изучении как особенностей различных лесных пожаров, так и характеристик ЛГМ, произрастающих в различных лесных массивах.

Проведение экспериментов позволило зафиксировать особенности закономерности зажигания листа берёзы. В результате был описан физико-химический механизм процессов, происходящих с образцом при его попадании в высокотемпературную среду. Также были определены характерные времена задержки для различных значений температур среды. Установлено, что полученная зависимость удовлетворительно описывается прямой.

Теоретическое исследование предполагало формулирование математических моделей теплопереноса в одиночном листе берёзы. При сценарном моделировании были получены количественные и качественные характеристики процессов инертного прогрева, сушки и пиролиза в рассматриваемом лесном горючем материале. Полученные результаты позволяют анализировать температурный режим и соотношение газовой и твердой фазы образца. Поскольку после выделения газообразных продуктов происходит их дальнейшее смешение с окислителем (кислородом воздуха) и нагретый образец воспламеняется, данная модель поможет в определении количества времени процесса возгорания.

Разработанные математические модели позволяют использовать их в системах прогноза лесных пожаров, поскольку можно получить данные и для других листовых ЛГМ, изменяя в модели геометрические размеры, теплофизические параметры и параметры окружающей среды. Полученные

значения времен задержки зажигания можно также использовать в системах прогноза, а также они могут стать основой для более фундаментальной системы классификации лесных горючих материалов, в основе которой будут лежать физические обоснованные подходы и которая будет более универсальной.

### Список публикаций студента

1. Baranovsky N. V., Kirienko V. A. Mathematical Simulation of Heat and Mass Transfer During Forest Fuel Pyrolysis Caused by High Temperature from Crown Forest Fire // International Review on Modelling and Simulations. - 2020 - Vol. 13 - №. 4. - p. 223-233. doi: 10.15866/iremos.v13i4.18841
2. Baranovsky N. V., Kirienko V. A. Mathematical simulation of forest fuel element at the crown forest fire impact taking into account multiphase reactive media mechanics fundamentals // International Review of Mechanical Engineering (IREME). - 2020 - Vol. 14 - №. 8. - p. 504-515. doi: 10.15866/ireme.v14i8.19655
3. Baranovsky N. V., Kirienko V. A. Ignition of forest combustible materials in a high-temperature medium // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. - 2020 - Vol. 93 - №. 5. - p. 1266-1271. doi: 10.1007/s10891-020-02230-4
4. Volkov R. S., Zhdanova A. O., Kirienko V. A. Water drops passing through a forest fuel bed without its burning and during its thermal decomposition // MATEC Web of Conferences. - 2017 - Vol. 110, Article number 01082. - p. 1-5
5. Шлегель Н. Е., Валиуллин Т. Р., Кириенко В. А. Определение теплофизических свойств лесных горючих материалов при оценке скорости распространения импульса тепла в толще образца [Электронный ресурс] // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25-28 Апреля 2017. - Томск: ТПУ, 2017 - Т. 1. Физика - С. 450-452. - Режим доступа: [http://science-persp.tpu.ru/Arch/Proceedings\\_2017\\_vol\\_1.pdf](http://science-persp.tpu.ru/Arch/Proceedings_2017_vol_1.pdf)

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pyzhev A.I., Sharafutdinov R.A., Borisova I.V. Ecological and Economic Modelling of the Forestry Problems of Russia//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Vol. 753, P. 082004.
2. Westerling A.L. Increasing western US forest wildfire activity: sensitivity to changes in the timing of spring//Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2016, Vol. 371, Increasing western US forest wildfire activity, No. 1696, P. 20150178.
3. Eugenio F.C., Santos A.R. dos, Pedra B.D., Macedo Pezzopane J.E., Mafia R.G., Loureiro E.B., Martins L.D., Saito N.S. Causal, temporal and spatial statistics of wildfires in areas of planted forests in Brazil//Agricultural and Forest Meteorology, 2019, Vols. 266-267, P. 157-172.
4. Molina-Terrén D.M., Xanthopoulos G., Diakakis M., Ribeiro L., Caballero D., Delogu G.M., Viegas D.X., Silva C.A., Cardil A. Analysis of forest fire fatalities in Southern Europe: Spain, Portugal, Greece and Sardinia (Italy)//International Journal of Wildland Fire, 2019, Vol. 28, Analysis of forest fire fatalities in Southern Europe, No. 2, P. 85-98.
5. Read S., Howell C. National 'state of the forests' reporting in Australia//Australian Forestry, 2019, Vol. 82, No. 2, P. 53-55.
6. Stocks B.J., L M. Forest fire management expenditures in Canada: 1970–2013//The Forestry Chronicle, 2016, Forest fire management expenditures in Canada.
7. Barhoumi C., Peyron O., Joannin S., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Girardin M.P., Brossier B., Paradis L., Pastor T., Alleaume S., Ali A.A. Gradually increasing forest fire activity during the Holocene in the northern Ural region (Komi Republic, Russia)//The Holocene, 2019, Vol. 29, No. 12, P. 1906-1920.
8. Belhadj-Khedher C., Koutsias N., Karamitsou A., EI-Melki T., Ouelhazi B., Hamdi A., Nouri H., Mouillot F. A Revised Historical Fire Regime Analysis in Tunisia (1985–2010) from a Critical Analysis of the National Fire Database and Remote Sensing//Forests, 2018, Vol. 9, No. 2, P. 59.

9. Adams M.A. Mega-fires, tipping points and ecosystem services: Managing forests and woodlands in an uncertain future//Forest Ecology and Management, 2013, Vol. 294, Mega-fires, tipping points and ecosystem services, P. 250-261.

10. Doerr S.H., Santín C. Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world//Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2016, Vol. 371, Global trends in wildfire and its impacts, No. 1696, P. 20150345.

11. Каницкая Л.В. Лесная пирология: учебное пособие. – 2013. – Иркутск : Изд-во БГУЭП, . – 206 с.

12. Brushlinsky N.N, Ahrens M, Sokolov S.V, Wagner P. World fire statistics // International sddociation of fire and rescue services, 2019, №24, 68p.

13. Valderrama L., Contreras-Reyes J.E., Carrasco R. Ecological Impact of Forest Fires and Subsequent Restoration in Chile//Resources, 2018, Vol. 7, No. 2, P. 26

14. Drapalyuk M., Stupnikov D., Druchinin D., Pozdnyakov E. Forest fires: methods and means for their suppression//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, Vol. 226, P. 012061.

15. FAO International handbook on forest fire protection. Technical guide for the countries of the Mediterranean basin, 2001, 163p.

16. Satendra, A. D. Kaushik Forest fire disaster management 1st edition, New Delhi: National Institute of Disaster Management, Ministry of Home Affairs, Govt. of India, 2014.

17. Тушение лесных пожаров, Учебно-методической пособие – Государственное бюджетное учреждение Архангельской области «Служба спасения». – Архангельск, 2013. – 106 с.

18. Xanthopoulos G., Athanasiou M. Crown Fire//Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires, 2020, P. 183-197.

19. Werth P., Potter B., Clements C., Finney M., Forthofer J., McAllister S., Goodrick S., Alexander M., Cruz M. Synthesis of Knowledge of Extreme Fire

Behavior: Volume I for Fire Managers//JFSP Synthesis Reports,2011, Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior.

20. Wagner C.E.V. Conditions for the start and spread of crown fire//Canadian Journal of Forest Research, 2011.

21. Scott J.H. Assessing Crown Fire Potential by Linking Models of Surface and Crown Fire Behavior / Google-Books-ID: KSxGhrIaMcoC. – U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2001. – 68 p.

22. Alexander M. E., Cruz M. G., Vaillant N. M, Peterson D.L. Crown fire behavior characteristics and prediction in conifer forests: a state-of-knowledge synthesis // Joint Fire Science Program Research Project Reports, 2013, 39p.

23. Reardon J. Ground Fire // Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires // ed. S.L. Manzello. – Cham: Springer International Publishing, 2019. – P. 1-6.

24. Butler B., Cohen J., Latham D., Schuette R., Sopko P., Shannon K., Jimenez D., Bradshaw L. Measurements of radiant emission power and temperature in crown fires//Canadian Journal of Forest Research, 2004, Vol. 34, p. 1577-1587.

25. Wein R.W. Fire behavior and ecological effects in organic terrain//The role of fire in Northern Circumpolar Ecosystem, 1983, p. 81–95.

26. Залесов А.С. Классификация лесных пожаров: методические указания. – 2011. – Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ. – 15 с.

27 Пожарная безопасность. энциклопедия. - М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. – 416 с.

28. 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.

29. Cibola National Forest and National Grasslands - Resource Management. - URL:<https://www.fs.usda.gov/detail/cibola/landmanagement/resourcemanagement/?cid=stelprdb5368839> (дата обращения: 16.05.2021).

30. The 1978 National Fire-Danger Rating System: technical documentation : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range

Experiment Station / рук. Bradshaw L.S., Deeming J.E., Burgan R.E., Cohen J.D. - Ogden, UT, 1984. - INT-GTR-169 p.

31. Губенко, И. М. Сравнительный анализ методов расчета индексов пожарной опасности / И. М. Губенко, К. Г. Рубинштейн // Гидрометцентр России. Труды. Вып.347. - 2012. - С. 207-222. - Библиогр. в конце ст.

32. Forestry Canada Fire Danger Group. Development of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System // Inf. Rep. ST-X-3. 1992. – p. 66.

33. Иванов В.А. Лесные горючие материалы и пожароопасность насаждений Сибири: справочник учебный / В.А. Иванов, Г.А. Иванова, С.А. Москальченко, Н.А. Коршунов; СибГУ им М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2017, – 93 с.

34. Czeslaw Strumillo, Tadeusz Kudra Drying: Principles, Applications, and Design // CRC Press, 1986. – p. 448.

35. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. «Химия», 1973.

36. Гришин А.М Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / ред. Пененко, В. В. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение , 1992. – 404

37. Robert E. Keane. Wildland Fuel Fundamentals and Applications – Springer International Publishing Switzerland 2015. – p. 191

38. Хабас Т.А., Кулинич Е.А., Егорова Е.Ю. Термогравиметрический метод анализа силикатных материалов: Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по курсам «Физикохимия твердого тела» и «Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» для студентов направления подготовки бакалавров 240100 «Химическая технология и биотехнология» и специальности 240304 «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» дневной и заочной формы обучения // Томск: Изд. ТПУ, 2007.- 20 с.

39. Britton C.M., Countryman C.M., Wright H.A., Walvekar A.G. The effect of humidity, air temperature, and wind speed on fine fuel moisture content//Fire Technology, 1973, Vol. 9, No. 1, P. 46-55.

40 Majlingová A., Schallerová D. Preliminary results of statistical analysis focused on the dependence between forest litter moisture and relative air humidity//Journal of Forest Science, 2016, Vol. 62, No. No. 11, P. 493-500.

41. Горбунов Н.Б. Оценка влажности лесных горючих материалов на начало пожароопасного сезона // Вавиловские чтения – 2014: Сборник статей межд. науч.-практ. конф., посвященной 127-й годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова. – Саратов, 2014. – 380 с .

42. Гришин А.М., Сеницын С.П., Акимова И.В. Сравнительный анализ термокинетических постоянных сушки и пиролиза лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва, 1991, №6, с.17-24.

43 Quan X., He B., Yebra M., Yin C., Liao Z., Li X. Retrieval of forest fuel moisture content using a coupled radiative transfer model//Environmental Modelling & Software, 2017, Vol. 95, P. 290-302.

44. X. Zhu, A. K. Skidmore, R. Darvishzadeh, and T. Wang, “Estimation of forest leaf water content through inversion of a radiative transfer model from LiDAR and hyperspectral data,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 74, pp. 120–129, Feb. 2019

45. Luo K., Quan X., He B., Yebra M. Effects of Live Fuel Moisture Content on Wildfire Occurrence in Fire-Prone Regions over Southwest China//Forests, 2019, Vol. 10, No. 10, P. 887.

46. Luo K., He B., Quan X., Liu X., Wen C. Preliminary Analysis of the Relation Between Satellite Derived Fuel Moisture Content and Wildfire Activity in Southwestern China // IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium / IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – 2019. – С. 9906-9909.

47. Baranovskiy N.V., Bazarov A.V. Technologies of Physical Monitoring and Mathematical Modeling for Estimation of Ground Forest Fuel Fire Condition//EPJ Web of Conferences, 2016, Vol. 110, P. 01006.

48. Anisimov P., Onuchin E., Vishnevskaja M. Modeling Pine and Birch Whole Tree Drying in Bunches in the Cutting Area//Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 2017, Vol. 38, No. 1, P. 11-17.

49. Grishin A.M., Golovanov A.N., Kataeva L.Yu., Loboda E.L. Formulation and Solution of the Problem of Drying of a Layer of Combustible Forest Materials//Combustion, Explosion and Shock Waves, 2001, Vol. 37, No. 1, P. 57-66.

50. Ostapenko A., Morkovin V., Manmareva V., Manmarev D. Risk analysis in the management of forest fire in Russia//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, Vol. 392, P. 012074.

51. Hamadeh N., Karouni A., Daya B., Chauvet P. Using correlative data analysis to develop weather index that estimates the risk of forest fires in Lebanon & Mediterranean: Assessment versus prevalent meteorological indices//Case Studies in Fire Safety, 2017, Vol. 7, Using correlative data analysis to develop weather index that estimates the risk of forest fires in Lebanon & Mediterranean, P. 8-22.

52. Dimitrakopoulos A.P., Bemmerzouk A.M. Predicting live herbaceous moisture content from a seasonal drought index//International Journal of Biometeorology, 2003, Vol. 47, No. 2, P. 73-79.

53. Ganatsas P., Marianthi T., Antonis M. Development of an adapted empirical drought index to the Mediterranean conditions for use in forestry//Agricultural and Forest Meteorology, 2011, Vol. 151, No. 2., p. 241-250.

54. Jong M.C. de, Wooster M.J., Kitchen K., Manley C., Gazzard R., McCall F.F. Calibration and evaluation of the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System for improved wildland fire danger rating in the United Kingdom//Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, T. 16, N 5, p. 1217-1237.

55. Hadisuwito A.S., Hassan F.H. A Comparative Study of the Forest Fire Danger Index Calculation Methods Using Backpropagation//Journal of Physics: Conference Series, 2020, Vol. 1529, P. 052051.

56. Suresh Babu K. V., Arijit Roy, Ramachandra Prasad P. "Forest fire danger index based on modifying Nesterov Index, fuel, and anthropogenic activities using MODIS TERRA, AQUA and TRMM satellite datasets", Proc. SPIE 9877, Land Surface and Cryosphere Remote Sensing III, 98771A (5 May 2016); <https://doi.org/10.1117/12.2222738>

57. M.Garcia-Pereza, H.Chaala, H.Pakdel, D.Kretschmer, C.Roy Characterization of bio-oils in chemical families // Biomass and Bioenergy Volume 31, Issue 4, April 2007, Pages 222-242.

58. Collard F.-X., Blin J. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin//Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, Vol. 38, P. 594-608.

59. Van de Velden M., Baeyens J., Brems A., Janssens B., Dewil R. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction//Renewable Energy, 2010, Vol. 35, No. 1, P. 232-242.

60. Demirbaş A. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass//Energy Conversion and Management, 2000, Vol. 41, No. 6, P. 633-646.

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

62. Liu H., Wang C., Zhao W., Yang S., Hou X. Pyrolysis characteristics and kinetic modeling of *Artemisia apiacea* by thermogravimetric analysis//Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, Vol. 131, No. 2, P. 1783-1792.

63. Wadhvani R., Sutherland D., Moinuddin K.A.M., Joseph P. Kinetics of pyrolysis of litter materials from pine and eucalyptus forests//Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, Vol. 130, No. 3, P. 2035-2046.

64. Mishra G., Kumar J., Bhaskar T. Kinetic studies on the pyrolysis of pinewood//Bioresource Technology, 2015, Vol. 182, P. 282-288.

65. Reina J., Velo E., Puigjaner L. Kinetic Study of the Pyrolysis of Waste Wood//Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998, T. 37, N 11, C. 4290-4295.
66. Slopiecka K., Bartocci P., Fantozzi F. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis: Energy Solutions for a Sustainable World - Proceedings of the Third International Conference on Applied Energy, May 16-18, 2011 - Perugia, Italy//Applied Energy, 2012, Vol. 97, P. 491-497.
67. Bartoli P., Simeoni A., Biteau H., Torero J.L., Santoni P.A. Determination of the main parameters influencing forest fuel combustion dynamics: Forest Fires//Fire Safety Journal, 2011, Vol. 46, No. 1, P. 27-33.
68. Thomas J.C., Hadden R.M., Simeoni A. Experimental investigation of the impact of oxygen flux on the burning dynamics of forest fuel beds: Fire Safety Science: Proceedings of the 12th International Symposium//Fire Safety Journal, 2017, Vol. 91, P. 855-863.
69. McAllister S. Critical mass flux for flaming ignition of wet wood//Fire Safety Journal, 2013, Vol. 61, P. 200-206.
70. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Volkov R.S., Zhdanova A.O. Amount of Water Sufficient to Suppress Thermal Decomposition of Forest Fuel//Journal of Mechanics, 2017, T. 33, N 5, C. 703-711.
71. Antonov D.V., Volkov R.S., Voitkov I.S., Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V. Influence of Special Additives in a Water Aerosol on the Suppression of a Forest Fire with it//Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2018, Vol. 91, No. 5, P. 1250-1259.
72. Hameed S., Sharma A., Pareek V., Wu H., Yu Y. A review on biomass pyrolysis models: Kinetic, network and mechanistic models//Biomass and Bioenergy, 2019, Vol. 123, A review on biomass pyrolysis models, P. 104-122.
73. Zhang M., Geng Z., Yu Y. Density Functional Theory (DFT) Study on the Dehydration of Cellulose//Energy & Fuels, 2011, T. 25, N 6, C. 2664-2670.
74. Zhang M., Geng Z., Yu Y. Density Functional Theory (DFT) study on the pyrolysis of cellulose: The pyran ring breaking mechanism//Computational and

Theoretical Chemistry, 2015, Vol. 1067, Density Functional Theory (DFT) study on the pyrolysis of cellulose, P. 13-23.

75. Mettler M. S. , Mushrif S. H. , Paulsen A. D. , Javadekar A. D. , Vlachos D. G. , Dauenhauer P. J. Revealing pyrolysis chemistry for biofuels production: Conversion of cellulose to furans and small oxygenates//Energy & Environmental Science, 2012, Vol. 5, Revealing pyrolysis chemistry for biofuels production, No. 1, P. 5414-5424.

76. Agarwal V., Dauenhauer P.J., Huber G.W., Auerbach S.M. Ab Initio Dynamics of Cellulose Pyrolysis: Nascent Decomposition Pathways at 327 and 600 °C//Journal of the American Chemical Society, 2012, T. 134, Ab Initio Dynamics of Cellulose Pyrolysis, N 36, C. 14958-14972.

77. Lu Q., Hu B., Zhang Z., Wu Y., Cui M., Liu D., Dong C., Yang Y. Mechanism of cellulose fast pyrolysis: The role of characteristic chain ends and dehydrated units//Combustion and Flame, 2018, Vol. 198, Mechanism of cellulose fast pyrolysis, P. 267-277.

78. Solomon P.R., Hamblen D.G., Carangelo R.M., Serio M.A., Deshpande G.V. General model of coal devolatilization // Energy Fuels, 1988, Vol.2, I.4, p. 405-422.

79. Niksa S. Predicting the rapid devolatilization of diverse forms of biomass with bio-flashchain//Proceedings of the Combustion Institute, 2000, Vol. 28, No. 2, P. 2727-2733.

80. Vizzini G., Bardi A. alessio, Biagini E., Falcitelli M., Tognotti L. Prediction Of Rapid Biomass Devolatilization Yields With An Upgraded Version Of The Bio-CPD Model//Proceedings of the Combustion Institute, Italian Section, Turin, 2008.

81. Prakash N., Karunanithi T. Kinetic modeling in biomass pyrolysis - a review // Journal of Applied Sciences Research, 2008, Vol.4, I.12, p. 1627–1636.

82. Kansa E.J., Perlee H.E., Chaiken R.F. Mathematical model of wood pyrolysis including internal forced convection//Combustion and Flame, 1977, Vol. 29, P. 311-83. Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis—A review of

modelling, process parameters and catalytic studies//Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, Vol. 50, P. 1081-1096.

84. Wang S., Dai G., Haiping Y., Luo Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review//Progress in Energy and Combustion Science, 2017, Vol. 62, P. 33-86.

85. Radmanesh R., Courbariaux Y., Chaouki J., Guy C. A unified lumped approach in kinetic modeling of biomass pyrolysis//Fuel, 2006, Vol. 85, No. 9, P. 1211-1220.

86. Barneto A.G., Carmona J.A., Alfonso J.E.M., Serrano R.S. Simulation of the thermogravimetry analysis of three non-wood pulps//Bioresource Technology, 2010, Vol. 101, No. 9, P. 3220-3229.

87. Manyà J.J., Velo E., Puigjaner L. Kinetics of Biomass Pyrolysis: a Reformulated Three-Parallel-Reactions Model//Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, Vol. 42, Kinetics of Biomass Pyrolysis, No. 3, P. 434-441.

88. Orfão J.J.M., Antunes F.J.A., Figueiredo J.L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials—three independent reactions model//Fuel, 1999, Vol. 78, No. 3, P. 349-358.

89. Chen T., Zhang J., Wu J. Kinetic and energy production analysis of pyrolysis of lignocellulosic biomass using a three-parallel Gaussian reaction model//Bioresource Technology, 2016, Vol. 211, P. 502-508.

90. Papari S., Hawboldt K. A review on the pyrolysis of woody biomass to bio-oil: Focus on kinetic models//Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, Vol. 52, A review on the pyrolysis of woody biomass to bio-oil, P. 1580-1595.

91. Thurner F., Mann U. Kinetic investigation of wood pyrolysis. // Industrial and Engineering Chemical Process Design and Development, 20: 482-488

92. Chan W.-C.R., Kelbon M., Krieger B.B. Modelling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of a large biomass particle//Fuel, 1985, Vol. 64, No. 11, P. 1505-1513.

93. Di Blasi C., Branca C. Kinetics of Primary Product Formation from Wood Pyrolysis//Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001, Vol. 40, No. 23, P. 5547-5556.
94. Wagenaar B.M., Prins W., Swaaij W.P.M. van Flash pyrolysis kinetics of pine wood: Third International Rolduc Symposium on Coal Science and Technology and Related Processes//Fuel Processing Technology, 1993, Vol. 36, No. 1, P. 291-298.
95. Lautenberger C., Fernandez-Pello C. Generalized pyrolysis model for combustible solids//Fire Safety Journal, 2009, Vol. 44, No. 6, P. 819-839.
96. Staggs J. E. J. Modelling thermal degradation of polymers using single-step first-order kinetics // Fire Safety Journal, 1999, Vol. 32, Is.1, P.17-34.
97. Kuo J.T., Hsi C.-L. Pyrolysis and ignition of single wooden spheres heated in high-temperature streams of air//Combustion and Flame, 2005, Vol. 142, No. 4, P. 401-412.
98. Leach S.V., Rein G., Ellzey J.L., Ezekoye O.A., Torero J.L. Kinetic and fuel property effects on forward smoldering combustion//Combustion and Flame, 2000, Vol. 120, No. 3, P. 346-358.
99. Wadhvani R., Sutherland D., Moinuddin K. Suitable pyrolysis model for physics-based bushfire simulation, // 11th Asia-Pacific Conference on Combustion, The University of Sydney, NSW Australia 10th -14th December 2017. 4p.
100. Hostikka S., Matala A. Pyrolysis Model for Predicting the Heat Release Rate of Birch Wood//Combustion Science and Technology, 2017, Vol. 189, No. 8, P. 1373-1393.
101. Kuznetsov G., Strizhak P. Heat and Mass Transfer in Quenching the Reaction of Thermal Decomposition of a Forest Combustible Material with a Group of Water Drops//Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2014, Vol. 87, P. 608-617.
102. Zhdanova A., Kuznetsov G., Strizhak P. Numerical Investigation of Physicochemical Processes Occurring During Water Evaporation in the Surface Layer

Pores of a Forest Combustible Material//Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2014, Vol. 87, P. 773-781.

103. Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Legros J.C., Strizhak P.A. Thermal conditions for stopping pyrolysis of forest combustible material and applications to firefighting//Thermal Science, 2017, Vol. 21, No. 6 Part A, P. 2565-2577.

104. Корсаков В. Г., Сычев М. М., Мякин С. В. Физическая химия конденсированных систем и высокоорганизованных веществ. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2013. – 177 с // 2013.

105. Вилюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ / В. Н. Вилюнов ; Отв. ред. В. Е. Зарко, А. Г. Мержанов. - Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние, 1984. - 189 с

106. Liidakis S., Bakirtzis D., Dimitrakopoulos A. Ignition characteristics of forest species in relation to thermal analysis data//Thermochimica Acta, 2002, Vol. 390, No. 1, P. 83-91.

107. Reszka P., Cruz J.J., Valdivia J., González F., Rivera J., Carvajal C., Fuentes A. Ignition delay times of live and dead pinus radiata needles//Fire Safety Journal, 2020, Vol. 112, P. 102948.

108. Hernández N., Fuentes A., Consalvi J.L., Elicer-Cortés J.C. Spontaneous ignition of wildland fuel by idealized firebrands: Tenth Mediterranean Combustion Symposium//Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, Vol. 95, P. 88-95.

109. Zhang H., Qiao Y., Chen H., Liu N., Zhang L., Xie X. Experimental study on flaming ignition of pine needles by simulated lightning discharge: Fire Safety Science: Proceedings of the 13th International Symposium//Fire Safety Journal, 2021, Vol. 120, P. 103029.

110. Grishin A.M., Zima V.P., Kuznetsov V.T., Skorik A.I. Ignition of Combustible Forest Materials by a Radiant Energy Flux//Combustion, Explosion and Shock Waves, 2002, Vol. 38, No. 1, P. 24-29.

111. Fernandez-Pello A.C., Lautenberger C., Rich D., Zak C., Urban J., Hadden R., Scott S., Fereres S. Spot Fire Ignition of Natural Fuel Beds by Hot Metal

Particles, Embers, and Sparks//Combustion Science and Technology, 2015, Vol. 187, No. 1-2, P. 269-295.

112. 1. Urban J.L., Zak C.D., Fernandez-Pello C. Spot Fire Ignition of Natural Fuels by Hot Aluminum Particles//Fire Technology, 2018, Vol. 54, No. 3, P. 797-808.

113. Wang S., Huang X., Chen H., Liu N., Wang S., Huang X., Chen H., Liu N. Interaction between flaming and smouldering in hot-particle ignition of forest fuels and effects of moisture and wind//International Journal of Wildland Fire, 2016, Vol. 26, No. 1, P. 71-81.

114. Urban J.L. Spot Ignition of Natural Fuels by Hot Metal Particles / J.L. Urban. – UC Berkeley, 2017.

115. Baranovskiy N.V., Zakharevich A.V. Experimental investigation of processes of typical forest fuel ignition by a high-temperature steel particle//Heat Transfer Research, 2016, Vol. 47, No. 7.

116. Hadden R.M., Scott S., Lautenberger C., Fernandez-Pello A.C. Ignition of Combustible Fuel Beds by Hot Particles: An Experimental and Theoretical Study//Fire Technology, 2011, Vol. 47, No. 2, P. 341-355.

117. Altamirova E., Perminov V.A. Mathematical Modeling of Forest Canopy Ignition by Thermal Radiation from a Hydrocarbon Explosion//Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2019, Vol. 55, No. 5, P. 574-579.

118. Urban J. L., Zak C. D., Song J., Fernandez-Pello C., Smoldering spot ignition of natural fuels by a hot metal particle, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 36, n. 2, p. 3211–3218.

119. Kuznetsov G.V., Salomatov V.V., Syrodoy S.V. Ignition of Particles of Wet Woody Biomass under Convective Diffusion of Water Vapor in the Near-Wall Region//Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2018, Vol. 54, No. 3, P. 325-336.

120. Hollis J.J., McCaw W.L., Cruz M.G., Hollis J.J., McCaw W.L., Cruz M.G. The effect of woody fuel characteristics on fuel ignition and consumption: a case study

from a eucalypt forest in south-west Western Australia//International Journal of Wildland Fire, 2018, Vol. 27, No. 5, P. 363-375.

121. Baranovskiy N.V., Naumkin A.S. Mathematical Simulation of Heat Transfer in Heterogenous Forest Fuel Layer Influenced by Heated Up to High Temperatures Steel Particle//MATEC Web of Conferences, 2014, Vol. 19, P. 01036.

122. Matvienko O.V., Kasymov D.P., Filkov A.I., Daneyko O.I., Gorbatov D.A., Matvienko O.V., Kasymov D.P., Filkov A.I., Daneyko O.I., Gorbatov D.A. Simulation of fuel bed ignition by wildland firebrands//International Journal of Wildland Fire, 2018, Vol. 27, No. 8, P. 550-561.

123. Grishin A.M., Dolgov A.A., Zima V.P., Kryuchkov D.A., Reino V.V., Subbotin A.N., Tsvyk R.Sh. Ignition of a layer of combustible forest materials//Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1998, Vol. 34, No. 6, P. 613-620.

124. Shotorban B., Yashwanth B.L., Mahalingam S., Haring D.J. An investigation of pyrolysis and ignition of moist leaf-like fuel subject to convective heating//Combustion and Flame, 2018, Vol. 190, P. 25-35.

125. Yashwanth B.L., Shotorban B., Mahalingam S., Lautenberger C.W., Weise D.R. A numerical investigation of the influence of radiation and moisture content on pyrolysis and ignition of a leaf-like fuel element//Combustion and Flame, 2016, Vol. 163, P. 301-316.

126. Baranovskiy N., Demikhova A. Mathematical Modeling of Heat Transfer in an Element of Combustible Plant Material When Exposed to Radiation from a Forest Fire//Safety, 2019, Vol. 5, No. 3, P. 56.

127. Engstrom J.D., Butler J.K., Smith S.G., Baxter L.L., Fletcher T.H., Weise D.R. Ignition behavior of live california chaparral leaves//Combustion Science and Technology, 2004, Vol. 176, No. 9, P. 1577-1591.

128. Pickett B.M., Isackson C., Wunder R., Fletcher T.H., Butler B.W., Weise D.R. Experimental measurements during combustion of moist individual foliage samplesA//International Journal of Wildland Fire, 2010, Vol. 19, No. 2, P. 153-162.

129. Borujerdi P.R., Shotorban B., Mahalingam S. A computational study of burning of vertically oriented leaves with various fuel moisture contents by upward convective heating//Fuel, 2020, Vol. 276, P. 118030.

130. Reszka P., Borowiec P., Steinhaus T., Torero J.L. A methodology for the estimation of ignition delay times in forest fire modelling//Combustion and Flame, 2012, Vol. 159, No. 12, P. 3652-3657.

131. Барановский Н.В., Захаревич А.В., Экспериментальное исследования зажигания травяной ветоши нагретой до высоких температур частицей углерода // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15. № 3. С. 323 – 328

132. 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.

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

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

135. Программный терморегулятор ТП703 [Электронный доступ]: <http://www.varta-spb.ru/catalogue/37/103.html>

136. 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.

137. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (с изменениями на 5 апреля 2021 года).

138. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

139. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.

140. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

141. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).

142. ГОСТ 12.0.003-15 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация – М.: ИПК Издательство стандартов, 2017. – 10 с.

143. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

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

145. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.

146. 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

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

148. ГОСТ Р 51337-99 Безопасность машин температуры касаемых поверхностей. Эргономические данные для установления предельных величин горячих поверхностей

149. СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003

150. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания

151. ГОСТ Р 50571.3-2009 Электроустановки низковольтные Часть 4-41  
Требования для обеспечения безопасности. Защита от поражения электрическим  
током

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

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

### **Methodology of experimental and theoretical studies on the study of heat and mass transfer processes in forest fuel material in a high-temperature environment**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ94	Кириенко Виктория Андреевна		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Барановский Николай Викторович	к.ф.-м.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шатохина Анастасия Олеговна	к.ф.н.		

## **Objects and research methods**

### **Object of the study**

An element of forest fuel material (a leaf of a *Betula pendula*) was chosen as the object of research. The choice is due to the wide distribution area of this species in different regions of the planet. This species grows on the territory of central Russia, forests of Western Siberia, Altai Territory, near Lake Baikal, Northern Kazakhstan, in European countries located on the Iberian Peninsula. Also, this species can be found in some countries of Asia (Central part) and Africa (cool regions of South Africa, mountains of Morocco) [1]. It should be noted that this species of birch often grows in mixed forests, consisting of other coniferous and deciduous species. As noted earlier, the regularities of the ignition process for different types of forest fuels can differ significantly, including the ignition delay time itself. This means that a birch leaf can cause a possible forest fire.

Let's consider the morphological characteristics of the selected sample. The sample length is about 4-6 centimeters, the width varies in the range of 3-5 centimeters, and the thickness is about 0.2 millimeters. The leaf shape can be diamond-shaped, triangular-ovoid or diamond-shaped. The top of the leaf is elongated, often bent to the side. The base of the leaf is most often wide-wedge-shaped, sometimes flat-cut. The petiole is usually about 2-3 centimeters long [1,2]. A typical sample under consideration is shown in Figure 1.

When doing the research, it was assumed that the leaf sample was placed in a high-temperature environment. The system "forest fuel element - air" is considered. Upon contact with a high-temperature medium, the sample heats up due to the thermal conductivity mechanism. Then the pyrolysis process starts. It is followed by the gaseous pyrolysis products formation. After heating the emitted gas products, the sample ignites in the gas phase.



Figure 1 – A typical leaf of a *Betula pendula*

### **Experimental setup and technique**

During the master degree researches, an experimental study a birch leaf ignition in a high-temperature environment was carried out. The samples were collected in the Timiryazevskoe forestry of the Tomsk region. In this forestry, birch is one of the typical species, along with pine and aspen. Also in the forest were represented such species as spruce, fir, larch, cedar. Therefore, in this case, it is legitimate to consider the collected samples as typical for this mixed forest area.

The experiments were carried out using a NevaTerm muffle furnace. The temperature in the furnace channel varied in the range from 700 to 1000 °C. These temperature values are usual for the typical forest fire fronts. The temperature was set using a VARTA TP703 thermostat. This regulator allows maintaining the temperature in the furnace channel with an accuracy of 1 ° C [3]. Before the experiments, the samples were placed in a drying chamber to remove excess moisture. After that, the samples were kept in the open air to achieve equality of the surface temperature and the air temperature in the laboratory. Before carrying out experiments on the samples under study, the measuring system of the camera software was calibrated. At the beginning of the experiment, the sample (birch leaf) was fixed on a special holder.

Then this holder was placed directly into the furnace channel, where the sample was ignited. The light was brought into the investigated area thanks to a spotlight fixed on the other side of the holder. The process was recorded using a FASTCAM SA 1.1 Model 675K - M1 high-speed camera installed on the opposite side of the furnace channel. The video recording from the camera was transmitted directly to a personal computer. Flue gases were removed from the experimental area using an exhaust unit with a duct fan. Six experiments were carried out with samples identical in shape and size for each value of the temperature of the medium. Figure 2 shows the main parts of the setup.

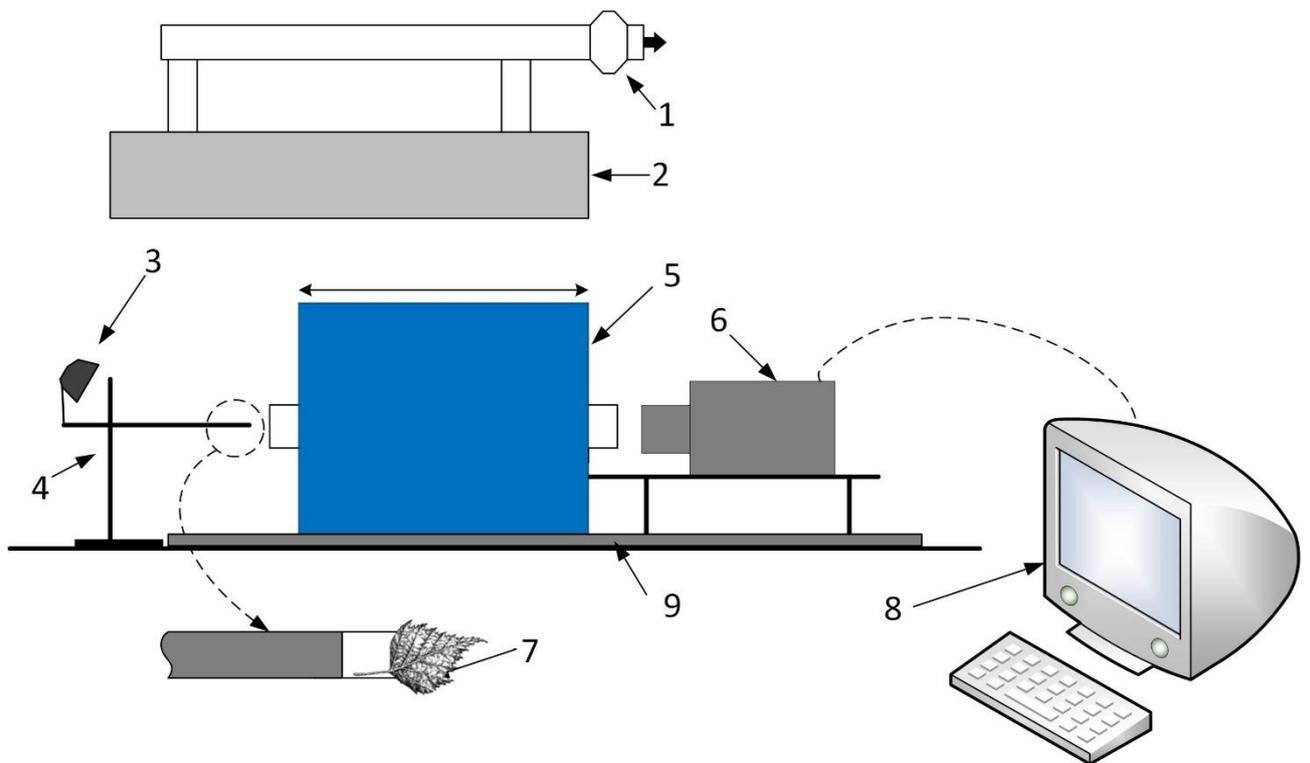


Figure 2 – Scheme of the experimental setup:

- 1 – duct fan; 2 – exhaust unit; 3 – spotlight; 4 – holder; 5 – muffle furnace; 6 – high speed camera; 7 – test samples; 8 – PC; 9 – stand rails.

The camera image was processed using the Photron Fastcam Viewer software. When viewing the obtained video recordings, the ignition delay time was determined by the formula:

$$\tau = \frac{n_2 - n_1}{f}, c, \quad (1)$$

where  $n_2$  – frame number characterizing the start of volatile substances ignition;

$n_1$  – frame number characterizing the thermal effect beginning;

$f$  – high-speed camera shooting speed, frames / s.

After the experiments, the results were statistically processed. As a result, the dependence of the sample ignition delay time on the medium temperature was obtained with the indicated confidence intervals. The confidence level was  $P = 0.95$ .

### **Finite difference method**

During the mathematical modeling, the finite difference method was used to solve differential equations. This method consists in replacing the partial derivatives of the differential equation with their finite-difference approximations. A finite-difference mesh is superimposed on the problem solution area. As a result the body is represented as a collection of nodes. As a result of replacing partial derivatives with finite differences, an open system of linear algebraic equations is obtained for calculating the temperature as a local characteristic of each mesh node. The resulting system is closed using difference approximations for the boundary conditions and solved by a numerical method.

Let's consider an algorithm for solving a typical problem. The first step is to build a finite difference mesh. Then the temperature value of the  $i$ -th node is determined at time  $t$ . After that, the differential derivatives should be replaced by their finite-difference analogs, resulting in a system of linear algebraic equations. Approximations can be made inexplicitly or implicitly. An explicit approximation method involves calculating the temperature at a new time layer based on data from three points of the previous layer. In the case of the implicit method, the temperature value is used three points on the new time layer and one point on the old time layer. It is noted that the use of an implicit approximation scheme is more preferable, since the explicit scheme may be unstable in some cases. So, the system of linear algebraic equations obtained in the course of approximation is reduced to a general form, namely, a three-point second-

order equation. Then after mathematical transformations the equation for temperature is established:

$$T_i^{n+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \cdot T_{i+1}^{n+1} + \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \quad (2)$$

Moreover,

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \quad (3)$$

To determine  $\alpha_i$  and  $\beta_i$ , it is necessary to know the values of  $\alpha_1$  and  $\beta_1$ . The values of these coefficients are determined based on the left boundary condition. The temperature value is also set at the other boundary of the region using the right boundary condition. Then, for each node of the difference grid, it is necessary to determine the values of the  $\alpha_i$  and  $\beta_i$  coefficients. After that, the reverse sweep process is started, during which the temperature distribution in the solution region is calculated.

### **Results of an experimental study to determine the forest fuel ignition delay time**

Experiments using a high-speed camera made it possible to record the laws of ignition of a birch leaf. So, the physicochemical mechanism of this process includes the following stages:

1. inert heating of the forest fuel surface
2. thermal decomposition of dry organic matter with the release of gaseous products
3. high-temperature evaporation of terpene-like substances
4. the resulting gaseous pyrolysis products are mixed with atmospheric oxygen
5. ignition of the sample in the gas phase
6. flame combustion
7. afterburning of the coke residue.

It should be noted that the sample ignition begins with the appearance of single micro-flares of the flame, which subsequently grow, acquire a rounded shape, and

combine into a large-size flare. As a result, the sample ignites in the gas phase. A videogram of the one experiment is shown in Figure 3.

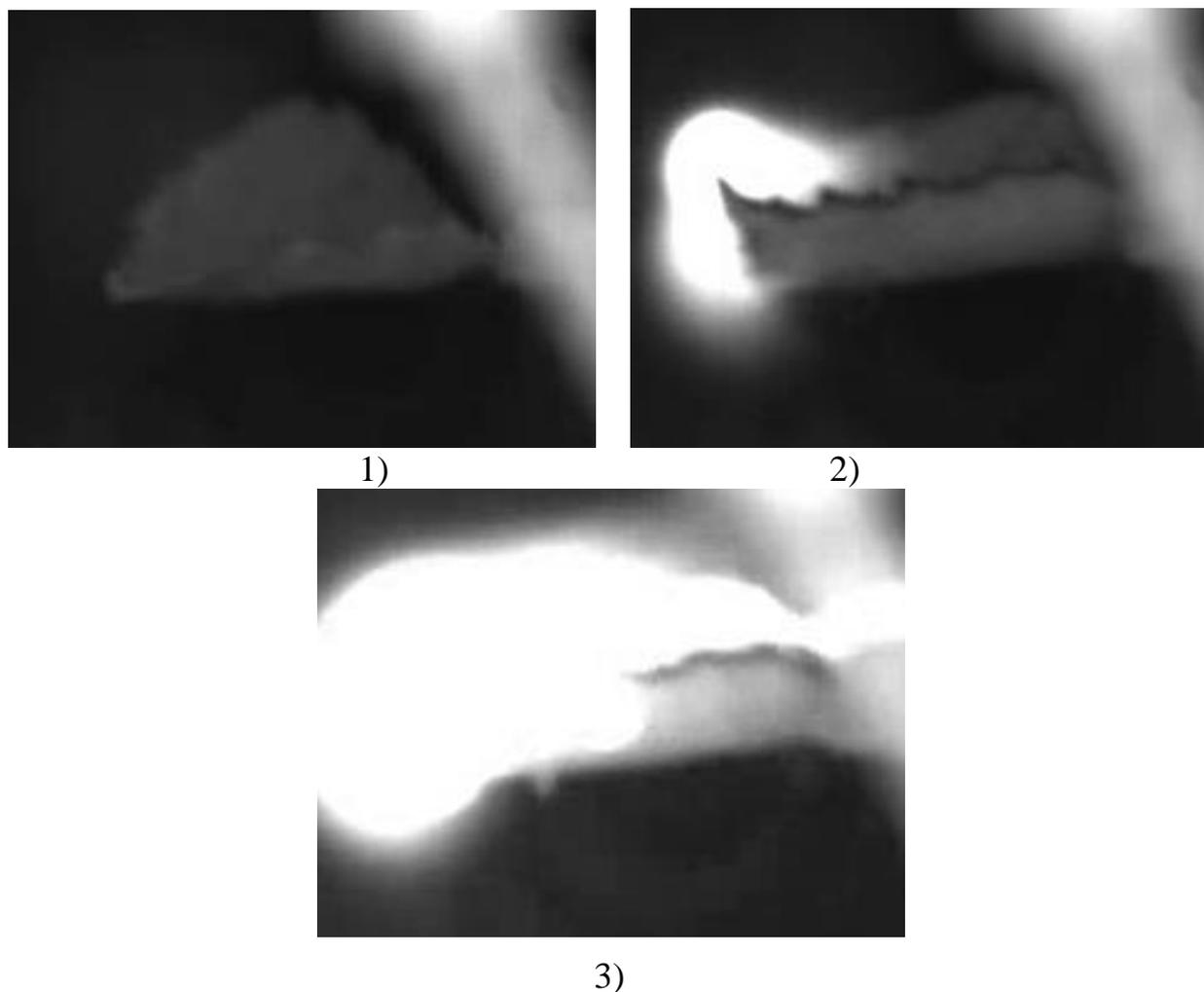


Figure 3 – Frames of the videogram of the experiment on the study of the ignition process of the forest fuel sample (birch leaf): 1 – the process of inert heating of the sample in a high-temperature environment; 2 – the appearance of a micro-flame of the flame; 3 – birch leaf burning

### **Conclusion**

In this section, the methodology of conducted experimental and mathematical researches is described. Experiments using a high-speed camera made it possible to record the laws of ignition of a birch leaf. As a result, a physicochemical mechanism of the process was described. Chosen finite-difference method allows solving differential equations of heat conduction and kinetic equations of pyrolysis.

The obtained results complement existing research and fill gaps in the study of the properties of forest fuels. These physical and mathematical models can be used in forest fires simulation models, in fire hazard forecasting systems, and for schemes for extinguishing forest fires. Also, the described features of heat and mass transfer can become the basis for a new classification system for forest fuels, which will be based on physically based approaches rather than using descriptive methods.

### **References**

1. Borodina N. A. et al. Trees and bushes of the USSR. - M.: Mysl, 1966. - S. 297-299
2. Abaimov V.F. Dendrology. Moscow: Academy, 2009. 368 p.
3. Software thermoregulator TP703 [Electronic access]: <http://www.varta-spb.ru/catalogue/37/103.html>