

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»

На правах рукописи



Касымов Денис Петрович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЗАЖИГАНИЯ ТОРФА И ДРЕВЕСИНЫ ОТ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук,
профессор Гришин Анатолий Михайлович

Томск – 2015

Содержание

Введение	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ НА ТОРФЯНИКИ И ДЕРЕВЯННЫЕ СТРОЕНИЯ.....	13
1.1. Экспериментальное и теоретическое исследование характеристик зажигания и горения торфа в натуральных и лабораторных условиях	13
1.1.1. Структура и физико-химические свойства торфа	13
1.1.2. Причины возникновения и стадии развития торфяного пожара.....	18
1.1.3. Экспериментальное определение теплофизических, термокинетических и фильтрационных характеристик торфа.....	22
1.1.4. Исследования процессов зажигания и горения торфа	27
1.1.5. Способы и устройства по борьбе с пожарами на торфяниках.....	32
1.1.6. Математическое моделирование процессов зажигания и тления торфа.....	34
1.2. Физико-математическое моделирование теплофизических процессов при зажигании древесины.	40
1.2.1. Основные характеристики и свойства (химические, физические, механические) древесины	40
1.2.2. Физико-математическая модель зажигания и горения древесины .	41
1.2.3. Экспериментальные исследования воздействия природных пожаров на деревянные строения	46
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ТОРФА ОТ НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА.....	51
2.1. Эксперименты по зажиганию торфа от низового лесного пожара.....	51
2.1.1. Лабораторное оборудование, методика проведения эксперимента .	51
2.1.2. Результаты и анализ.....	55
2.2. Исследование механизма заглубления очага горения в массу торфа при воздействии очага низового лесного пожара	57
2.2.1. Методика проведения экспериментов.....	59
2.2.2. Анализ результатов экспериментальных исследований.....	60
2.3. Моделирование зажигания торфа от низового лесного пожара	66
2.3.1. Постановка задачи.....	66

2.3.2. Методика расчета	69
2.3.3. Результаты численного решения и их анализ	69
2.4. Выводы.....	72
ГЛАВА 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДЕЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПОЖАРА НА ОБРАЗЦЫ ДРЕВЕСИНЫ.....	74
3.1. Экспериментальные исследования воздействия очага горения на образцы древесины с помощью термопарного метода	74
3.1.1. Методика эксперимента	75
3.1.2. Результаты исследования воздействия очага горения на древесину	77
3.2. Исследование воздействия очага горения на образцы древесины с помощью методов ИК-диагностики	81
3.2.1. Методика проведения эксперимента	83
3.2.2. Результаты экспериментов	85
3.3. Моделирование теплофизических процессов при зажигании древесины	90
3.3.1. Постановка задачи.....	90
3.3.2. Коэффициенты переноса, теплофизические и термокинетические постоянные	96
3.3.3. Методика расчета и исходные данные	100
3.3.4. Результаты численного решения и их анализ	102
3.4. Выводы.....	106
Заключение.....	108
Список использованной литературы.....	110

Введение

Природные пожары происходят по всему миру приводя не только к огромным экономическим затратам, но также угрожают здоровью и жизни человека, уничтожают лесную растительность и биомассу, что, в свою очередь, влечет значительную эрозию почв под воздействием воды и ветра. За период с 2003 по 2007 гг. ежегодно в мире в среднем происходило 487 тыс. пожаров и выгорало более 60 млн га покрытой лесом площади и прочих земель. Самые крупные выгоревшие площади отмечались в США, Канаде, Бразилии, Португалии, России, Польше, Испании, Венгрии, Аргентине и др. странах.

В июле и августе 2010 года в результате аномально высокой температуры и длительного отсутствия осадков площадь лесных пожаров в нашей стране, по данным Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации, составила более 2,1 млн га, сгорело около 2,5 тыс. жилых домов, а общий материальный ущерб оценивается в 85,5 млрд руб. В 2012 году лесными пожарами была охвачена Сибирь и Дальний Восток, по данным космоснимков огнем пройдена площадь около 10 млн га. Разрушительные пожары в зоне раздела природной и городской сред произошли в 2015 году в республике Хакасия, Россия. Огромный урон пожарами наносится и Гослесфонду. По данным Росстата [1] площадь погибших лесных насаждений в России за 10 лет (с 2000 по 2009 гг. включительно) составила 4,7 млн га. Из них почти 68% погибло от пожаров и сгорело на корню более 290 млн куб. м. древесины. Среднее число пожаров за указанные 10 лет составило почти 28 тыс. возгораний в год, а потери древесины – 29,1 млн куб. м. в год.

Ситуация с природными пожарами за рубежом в последние годы также остается напряженной, о чем свидетельствуют пожары в Греции (2007, 2009 гг.), США (2009, 2011, 2013 гг.), Португалии (2003, 2005 гг.), Австралии (2009, 2015 гг.).

Вопросам, связанным с изучением возникновения и распространения природных пожаров, посвящено множество работ как российских, так и

зарубежных авторов. Физико-математическому исследованию лесных пожаров относятся работы Конева [2], Гундара [3], Гришина [4], Доррера [5], F.A. Albin [6], R.C. Rothermel [7]. В монографии Доррера Г.А., в частности, предложена модель, описывающая лесной пожар как бегущую волну в неоднородной и анизотропной среде. Существенным элементом является введение теплового (модельного) фронта, имеющего параболическую в плане форму, что позволяет учесть конфигурацию и ориентацию фронта горения относительно направления распространения, а также решать такие задачи, как, например, исследование зависимости скорости стационарного распространения фронта горения от его геометрических характеристик. Кроме того получено уравнение контура пожара на основе уравнений Гамильтона-Якоби. Разработана методика оценки динамики лесных пожаров по их инфракрасным снимкам. Также автором [5] разработаны и реализованы система моделирования процессов распространения и локализации лесных пожаров, а также система управления противопожарными силами авиационной лесной охраны СПЛАТ.

Как показывает практика, количество разрозненных очагов возгорания, либо крупномасштабных пожаров, не уменьшается год от года, несмотря на усовершенствование систем прогноза систем лесной пожарной опасности. В последнее время очаги возгорания возникают в более отдаленных и заболоченных местностях, что осложняет доставку техники для их локализации. Отчасти это связано с расширением хозяйственной деятельности человека, что повышает риск появления пожара, а также вырубку доступных лесных ресурсов. Актуальность изучения воздействия очага горения на торфяники и древесину объясняется необходимостью углубленного понимания теплофизических процессов, протекающих при зажигании и горении торфа и древесины, а также изучению механизмов перехода одного типа пожара в другой с целью уточнения существующих мер по предотвращению, локализации и тушению природных пожаров.

Объектом исследования в работе является природная катастрофа-возникновение лесных, степных и торфяных пожаров. Предмет исследования –

экспериментальное и численное моделирование теплофизических процессов, протекающих при зажигании торфа и древесины, вызывающих зажигание природных горючих материалов и возникновение природных пожаров.

Цель диссертационной работы состоит в постановке и физико-математическом исследовании зажигания горючих материалов (торфа и древесины) в результате воздействия природных пожаров.

В соответствии с обозначенной целью поставлены следующие задачи диссертационного исследования:

- Анализ современного состояния физико-математических исследований характеристик зажигания и горения торфа и древесины от природных пожаров;
- Экспериментальные и теоретические исследования процесса перехода модельного низового лесного пожара в торфяной;
- Лабораторные исследования механизма заглубления очага горения в слой торфа;
- Экспериментальные исследования воздействия низовых лесных и степных пожаров на образцы древесины;
- Исследование воздействия очага горения на образцы древесины различного профиля с использованием термопарного метода и методов ИК-диагностики;
- Постановка и численное решение задачи о зажигании древесины в результате действия фронта горения на базе математической модели пористой реагирующей среды.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Экспериментально исследовано влияние низового лесного пожара на торфяник;

Впервые предложена гипотеза о влиянии ботанического состава, как фактора заглубления очага горения в массу торфа, и проведены экспериментальные исследования для ее проверки;

Исследовано воздействие очага горения на образцы древесины различного профиля с помощью методов ИК-диагностики;

Впервые с применением методов математического моделирования и механики пористых реагирующих сред проведено численное решение 3-х мерной задачи о зажигании древесины в результате действия фронта горения.

Практическая значимость. Результаты диссертационной работы имеют фундаментальный характер с возможными перспективами научно-практических приложений и могут быть полезны коллективам, занимающимся вопросами пожарной безопасности деревянных строений и торфяных месторождений. Полученные в работе экспериментальные и теоретические результаты исследования механизма заглубления очага горения в слое торфа могут быть использованы при разработке новых способов локализации и тушения торфяных пожаров. Знание о характере распространения горения в глубине торфяного пласта позволит оперативно организовать меры по локализации очага горения, а также на основе предварительного пробоотбора на местах торфяных залежей создать карту наиболее опасных участков развития торфяного пожара. Результаты исследования воспламеняемости образцов древесины могут быть использованы для уточнения общих противопожарных требований к индивидуальной жилой застройке, садовым, дачным и приусадебным земельным участкам.

Полученные результаты успешно использовались при выполнении 9 грантов и федеральных целевых программ, в которых соискатель выступал в качестве исполнителя:

1. 2015-2017 – Грант РФФИ №15-01-00513-а «Исследование динамических высокотемпературных сред с применением методов ИК-диагностики и математического моделирования» (Руководитель проекта: д.ф.-м.н. Лобода Е.Л.).

2. 2015-2016 – Грант РФФИ №15-31-20314-мол_a_вед «Математическое моделирование переноса горящих частиц растительных горючих материалов в потоке газа, образующихся в результате распространения фронта низового лесного пожара, и условий зажигания ими лесного напочвенного покрова» (Руководитель проекта: к.ф.-м.н. Фильков А.И.).

3. 2014-2016 – Проектная часть государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 13.1624.2014/К «Физико-математические исследования природных пожаров: диагностика процессов горения, анализ образования горящих частиц и их влияния на распространение фронта пожара и его переход на урбанизированные территории» (Руководитель проекта: проф., д.ф.-м.н. Гришин А.М.).

4. 2014-2016 – Грант РФФИ №14-01-00211-а «Физико-математическое моделирование и прогноз природных катастроф с учетом перехода лесных, степных и торфяных пожаров в городские и поселковые» (Руководитель проекта: проф., д.ф.-м.н. Гришин А.М.).

5. 2014 – Грант РФФИ №14-33-50153-мол_нр "Исследование теплового воздействия на модель стены деревянного дома с целью определения наиболее теплонапряженных участков и вероятности воспламенения" (Руководитель проекта: проф., д.ф.-м.н. Коробейничев О.П.).

6. 2012-2013 – Грант ФЦП № 1.2.2 «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 год», г/к № 14.В37.21.0634 «17» августа 2012 г. (Руководитель проекта: к.ф.-м.н. Фильков А.И.).

7. 2011-2013 – Грант РФФИ №11-01-00673-а «Математическое и физическое моделирование торфяных пожаров с целью их прогноза и снижения риска» (Руководитель проекта: д.ф.-м.н. Лобода Е.Л.).

8. 2011-2013 – Грант РФФИ №11-01-00228-а «Математическое моделирование газодинамических процессов с фазовыми кинетическими переходами в целях прогноза возникновения и распространения пожаров в населенных пунктах и мегаполисах» (Руководитель проекта: проф., д.ф.-м.н. Гришин А.М.).

9. 2010-2012 – Грант РФФИ-Франция №10-01-91054-НЦНИ_a «Исследование воспламенения торфа и распространения торфяных пожаров» (Руководитель проекта: проф., д.ф.-м.н. Гришин А.М.).

Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью постановок задач, строгим использованием численных методов, сравнением с

экспериментальными данными, с данными других авторов, использованием различных независимых методик и статистической обработкой результатов измерений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального и теоретического исследования зажигания и горения торфа при воздействии очага низового лесного пожара;
2. Экспериментально полученные оценки по распространению фронта горения торфа в горизонтальной и вертикальной плоскости при различных условиях расположения очага горения низового лесного пожара и зависимости влияния начального влагосодержания и ботанического состава торфа на механизм заглупления фронта горения в его массу;
3. Результаты экспериментальных исследований влияния очага горения на деревянные образцы различного профиля;
4. Численное решение 3-х мерной задачи о зажигании деревянного образца в результате действия очага пожара на базе математической модели пористой реагирующей среды.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 28 работ; 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 4 статьи, входящие в международные базы научного цитирования Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора в получении результатов, изложенных в диссертации. Личный вклад соискателя заключается в проведении лабораторных экспериментов по зажиганию торфа и древесины от природных пожаров с последующей обработкой результатов, проведении расчетов и анализе результатов численного моделирования, а также в участии в обсуждении полученных результатов и формулировке выводов и положений, выносимых на защиту. Постановка задач по математическому и физическому моделированию сделана научным руководителем при активном участии соискателя.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на 19 Всероссийских и Международных научных конференциях и форумах, в том числе: XI Всероссийская конференция с участием иностранных ученых

«Проблемы мониторинга окружающей среды» (Кемерово, 2011), II Всероссийская молодежная научная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Н. Н. Яненко «Современные проблемы математики и механики» (Томск, 2011), III Всероссийская молодежная научная конференция «Современные проблемы математики и механики» (Томск, 2011), Международная конференция по механике и баллистике «VII Окуневские чтения», «VIII Окуневские чтения» (Санкт-Петербург, 2011, 2013), Международная школа-конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2012, 2014), Всероссийская конференция с международным участием «Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф» (Томск, 2012), X, XI Международная Школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (Томск, 2012, 2014), Международная молодежная конференция «Современные методы механики» (Томск, 2012), IV Международная конференция по исследованию поведения пожаров и топлив (Санкт-Петербург, 2013), Всероссийская конференция по математике и механике (Томск, 2013), Международный конгресс «Лесные пожары и изменение климата. Проблемы управления пожарами в природных и культурных ландшафтах Евразии» (Новосибирск, 2013), Всероссийская конференция с международным участием "VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике" (Екатеринбург, 2013), X Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 2014), 7-я Международная конференция по исследованию лесных пожаров (Португалия, Коимбра, 2014), XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015), XXI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2015).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка цитируемой литературы из 139 наименований. Общий объем работы – 124 страницы машинописного текста.

Автор искренне благодарен ведущему инженеру В.П. Зиме за неоценимую помощь при проведении лабораторных исследований и обсуждение полученных результатов, за полезные советы и поддержку на протяжении всех этапов исследования.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, обосновывается научная новизна и практическая значимость, перечислены выносимые на защиту положения, дано краткое изложение диссертации по главам.

В **Первой главе** освещается современное состояние экспериментальных и теоретических исследований режимов зажигания и горения торфа, его теплофизических, термокинетических и фильтрационных характеристиках, а также проанализированы работы, посвященные физико-математическому моделированию теплофизических процессов при зажигании и горении древесины.

Вторая глава посвящена исследованию зажигания торфа от низового лесного пожара и особенностям заглубления горения при пожарах на торфянике. В первом параграфе этой главы дается описание лабораторного оборудования и методики проведения эксперимента по зажиганию торфа от низового лесного пожара, излагаются результаты исследования поля температур на поверхности торфа и в его массе, а также приводятся скорости горения торфа в зависимости от влагосодержания и ботанического состава. Во втором параграфе представлено экспериментальное исследование механизма заглубления очага горения в торфе. Приводится описание методики проведения эксперимента, зависимости влияния начального влагосодержания и ботанического состава торфа на механизм заглубления фронта горения в его массу. Третий параграф посвящен численному моделированию зажигания торфа от низового лесного пожара. В нем дается постановка задачи, приводится основная система уравнений с начальными и граничными условиями, методика расчета и результаты численного решения.

В **третьей главе** приведены экспериментальные и теоретические исследования воздействия очага горения на образцы древесины различного профиля. В первом параграфе описывается лабораторное оборудование и

методика проведения эксперимента с использованием термопарного метода измерения температуры, излагаются результаты исследования. Во втором параграфе представлена методика проведения эксперимента с использованием методов ИК-диагностики. Проводится анализ тепловизионных данных, полученных в эксперименте, излагаются основные результаты. В третьем параграфе приводится численное решение 3-х мерной задачи о зажигании деревянного образца в результате действия очага пожара на базе математической модели пористой реагирующей среды. Дается постановка задачи, основные допущения, система уравнений, исходные данные и методика расчета. Изложены основные результаты численного решения и их анализ.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные на основе настоящей диссертационной работы.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ НА ТОРФЯНИКИ И ДЕРЕВЯННЫЕ СТРОЕНИЯ

1.1. Экспериментальное и теоретическое исследование характеристик зажигания и горения торфа в натуральных и лабораторных условиях

1.1.1. Структура и физико-химические свойства торфа

В Томской области в основном преобладают торфа моховой группы верхового типа: фускум, ангустифолиум, магелланикум, мочажинный и комплексный, на юге области развиты в основном низинные торфа – гипновые, осоково-гипновые, травяные, древесные и травяно-древесные [8]. Ботанический состав определяет характерные структурные особенности торфяных грунтов и описывает количественное соотношение остатков компонентов, формирующих торф. Структура торфа из-за разнообразия форм и размеров элементов, представленных от крупных волокон растений, корней, остатков древесины до тонкодисперсных разложившихся частиц, весьма индивидуальна для каждого вида торфа. Каждый вид обладает соответствующей структурой, и торф одного вида может иметь широкие интервалы по степени разложения [8].

Также следует отметить, что структура торфа оказывает влияние на физические и фильтрационные свойства. Авторами [9] отмечается, что твердая компонента торфа представляет собой сложную полидисперсную структуру, в строении которой принимают участие частицы размером от нескольких сантиметров до долей микрона. На основании изученных структурных особенностей в работах [10, 11], в работе [12] приведена краткая характеристика торфяных грунтов верховых болот Томской области (табл. 1.1), а в таблице 1.2 приводится гранулометрический состав торфа.

Таблица 1.1. Характеристика торфяных грунтов верховых болот Томской области [12]

Вид торфа	Количество определен ий	Коэффицие нт пористости, e_0 , д. ед.	Степень разложени я, D_{dp} , %	Зольност ь, D_{as} , %	Плотност ь твердых частиц, ρ_s , г/см ³	Плотность скелета, ρ_d , г/см ³
Фускум	21	17,25	9	4,2	2,9	0,093
Ангустифолиум	6	18,93	13	2,6	3,4	0,077
Магелланикум	18	19,03	16	3,1	3,0	0,081
Комплексный	9	19,42	7	3,7	3,1	0,083
Сфагновый мочажинный	10	12,81	13	3,3	3,7	0,116
Пушицево- сфагновый	15	14,83	28	2,7	2,9	0,111
Травяно- сфагновый	5	10,9	25	2,7	3,3	0,132
Пушицевый	9	10,66	38	3,4	3,0	0,137
Шейхцериевый	13	14,43	22	3,2	4,1	0,103
Древесно- сфагновый	11	17,37	15	7,6	2,9	0,091
Сосново- сфагновый	5	8,21	40	3,9	2,9	0,169
Сосновый	3	12,58	40	4,8	2,8	0,158
Кустарничковый	4	13,96	15	3,2	3,4	0,103

Примечание: в таблице приведены средние значения характеристик торфа.

Таблица 1.2. Гранулометрический состав торфа [9]

Торф	Степень разложени я торфа, %	Процентное содержание частиц диаметром (мм)											
		10	2	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001	0,000 5	0,000 2
Низинный	10	100	50,2	41,2	29,8	23,2	12,6	7,3	6,4	4,1	2,5	1,9	1,7
	60	100	64,8	54,4	50,8	29,7	15,3	9,1	5,0	3,9	3,1	2,4	1,7
	80	100	79,1	62,6	58,1	28,4	16,5	9,3	4,4	3,5	3,5	3,5	1,8
Верховой	10	100	21,6	18,1	16,8	9,3	5,1	4,2	3,2	3,0	2,3	1,9	0,9
	60	100	64,3	43,7	40,7	29,0	24,9	21,2	15,2	11,5	7,4	4,4	3,0
	80	100	93,7	92,7	87,1	79,3	69,0	61,4	44,7	29,4	18,3	15,3	12,5

Для большинства видов торфа характерен следующий элементарный состав органической массы: углерод - около 56 %, кислород - 36 %, водород - около 6 %, азот - около 2% [13]. При разложении растительных остатков содержание

углерода несколько увеличивается, а кислорода уменьшается. На содержание углерода и азота степень разложения торфа существенного влияния не оказывает. Плотность торфов в абсолютно сухом состоянии варьируется от 0,06-0,08 г/см³ при малой степени разложения до 0,03-0,036 г/см³ при высокой степени разложения [13].

Химический состав торфов Томской области подробно изложен в [14]. Отмечается, что в низинных торфах зольность изменяется от 4,3 % (травяное низинное болото) до 13,1 % (травяно-ивовое низинное болото), при этом максимальная средняя зольность у древесного вида (9,8 %). Далее по убыванию следуют древесно-осоковый (9,4 %) – осоково-гипновый (7,9 %) – осоковый виды торфа (6,9 %). Исследуемые верховые торфы характеризуются низкой зольностью от 0,4 % (кустарничково-травяное болото) до 10,6 % (сосново-сфагновое верховое болото). В среднем зольность торфов равна 2,9 %, что соответствует типовой принадлежности. Наибольшим средним значением характеризуется сфагново-мочажинный торф (4,6 %), а наименьшим – пушицево-сфагновый (1,5 %). Комплексный фускум торфы имеют промежуточные значения (3,3 и 2,0 % соответственно).

В работе [14] также проводилось изучение следующих химических элементов: Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Br, Sr, Cs, Ba, Hf, La, Ce, Sm, Eu, Yb, Lu, Th, U. Отмечено, что распределение химических элементов в торфах разного ботанического состава низинного типа имеет более однородный характер по сравнению с верховыми. Выявлено, что некоторые элементы (Yb, Lu, U) не содержатся в том или ином виде торфа, а подавляющее большинство анализируемых химических элементов накапливаются в древесном торфе [14].

Результаты исследований элементного состава верховых и низинных торфов Томской области приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Содержание химических элементов в верховых и низинных торфах, мг/кг с.в. [14]

Химические элементы	$M \pm md$		Коэффициент вариации, %	
	Верховой	Низинный	Верховой	Низинный
Ca	2618 ± 300	15300 ± 1200	85	65
Sc	0,57 ± 0,03	0,99 ± 0,09	40	75
Cr	1,55 ± 0,18	4,40 ± 0,52	83	92
Fe	2300 ± 400	22400 ± 600	138	25
Co	1,02 ± 0,17	4,64 ± 0,21	134	40
Br	9,00 ± 0,83	34,00 ± 1,30	77	34
Sr	60,00 ± 6	250,00 ± 13,00	78	47
Cs	0,16 ± 0,02	0,17 ± 0,05	83	181
Ba	75,00 ± 5,00	121,00 ± 11,00	54	75
Hf	0,13 ± 0,007	0,17 ± 0,02	44	102
La	0,64 ± 0,05	1,52 ± 0,11	58	61
Ce	2,73 ± 0,18	3,29 ± 0,32	52	85
Sm	0,15 ± 0,02	0,42 ± 0,03	108	70
Eu	0,07 ± 0,002	0,10 ± 0,01	53	82
Yb	0,03 ± 0,001	0,06 ± 0,02	45	217
Lu	0,001 ± 0,00	0,01 ± 0,002	80	173
Th	0,30 ± 0,17	0,49 ± 0,04	48	64
U	0,07 ± 0,01	1,10 ± 0,20	108	140

Одной из наиболее важных характеристик грунтов, которая определяет механические свойства, является коэффициент пористости [12]. На рисунке 1.1 приведены значения коэффициента пористости различных видов верхового торфа Томской области [12].

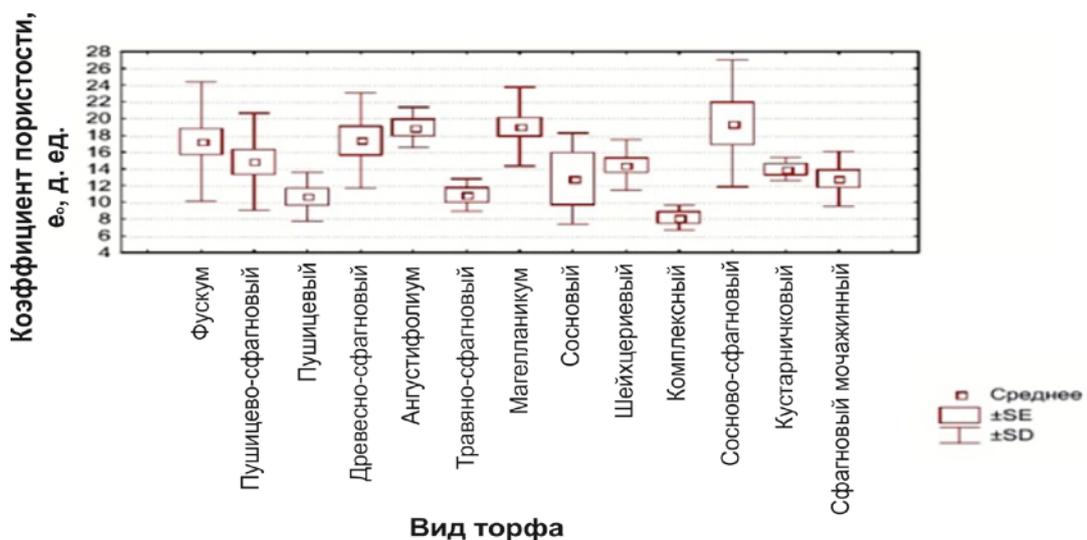


Рис. 1.1. Распределение коэффициентов пористости разных видах торфа [11]: SE - стандартная ошибка; SD – стандартное отклонение

1.1.2. Физическая модель торфяных пожаров

В работе [13] представлена схема основных физико-химических процессов, характеризующих механизм распространения торфяного пожара (рис. 1.2), а также схема основных физико-химических процессов и экологических последствий торфяных пожаров с учетом физико-химических процессов в зоне торфяного пожара (рис. 1.3).



Рис. 1.2. Схема основных физико-химических процессов во фронте торфяного пожара [13]



Рис. 1.3. Схема физико-химических процессов и экологических последствий, возникающих при торфяных пожарах [13]

Схему на рис. 1.3 авторы [13] характеризуют как физическую модель торфяного пожара второго поколения, так как она более полно учитывает реальные физико-химические процессы в окружающей среде и в зоне торфяного пожара, а также учитывает переход торфяного пожара в низовой и верховой.

1.1.2. Причины возникновения и стадии развития торфяного пожара

В результате действия низовых и степных пожаров могут возникать почвенные и торфяные пожары. Под влиянием излучения и конвективного теплового потока от фронта низового лесного пожара, горящих пней и валежника происходит нагревание, высушивание, пиролиз, а затем зажигание подстилки-слоя полуразложившейся листвы, хвои, травы и тонких веточек [13]. Как и у лесных горючих материалов, основными горючими элементами у торфов являются углерод (52-56 % от общей массы) и водород (5-6 % от общей массы), кроме того, в составе торфа имеется от 30 % до 40 % атомов кислорода, связанного в молекулах химических веществ, из которых состоит торф. Среднее значение величины теплотворной способности торфа равно 5500 ккал/кг [9, 12].

Повышенная пожарная опасность торфа обусловлена его пористой структурой, малой плотностью и наличием в составе до 40 % кислорода, что делает процесс горения в залежах скрытным, практически без доступа воздуха [13]. Размер пор изменяется от 0,1 до 30 мкм, их объем от $4 \cdot 10^{-5}$ до $7,3 \cdot 10^{-5}$ м³/кг, а удельная поверхность соответственно от $2,68 \cdot 10^1$ до $3,32 \cdot 10^1$ м²/кг. Низкая смачиваемость торфа в сухом состоянии усложняет ликвидацию пожаров и загораний. Среди горючих материалов (по удельной теплоте сгорания) торф занимает место между дровами (береза и сосна) и бурыми углями. К показателям пожарной опасности торфа можно отнести также параметры, характеризующие его теплофизические свойства [8]. Значение коэффициента теплопроводности торфа изменяется от 0,1 до 0,5 Вт/м·К, практически не зависит от вида торфа и степени разложения и определяется плотностью, влажностью,

газонасыщенностью, пористостью. Удельная теплоемкость сухого торфа составляет 1,96 кДж/кг·К. Установлено, что торф, имеющий степень разложения 30 % не горит при влагосодержании $W \geq 69-72$ % [8].

Согласно [15], основными причинами торфяных пожаров являются: самовозгорание торфа; «сухие грозы»; антропогенные источники (искры, возникающие при работе техники, неосторожное обращение с огнем и др.).

При самовозгорании торфа он воспламеняется по причине его окисления кислородом воздуха. При этом не обязателен приток тепла извне. В процессе самовозгорания торфа участвуют микроорганизмы, продукты жизнедеятельности которых накапливаются в анаэробных условиях и приводят к постепенному прогреванию массы торфа до 60-65 °С. При последующем повышении температуры торф превращается в полукокс, склонный к спонтанному самовозгоранию под действием кислорода воздуха [15]. Как правило, торф имеет свойство к самовозгоранию, если его влажность меньше 28-30 %. Степень пожароопасности также зависит от ботанического состава торфа и степени его разложения [13].

Значительный процент возгораний наблюдается также из-за грозовой активности в частности, «сухих гроз» [15]. При этом пожары от молний могут быть труднодоступными из-за их удалённости от объектов инфраструктуры.

Развитие торфяных пожаров обусловлено комплексом климатических, метеорологических, топографических и ряда других факторов. К их числу можно отнести продолжительность засушливого периода, интенсивность солнечной радиации, время суток, температуру воздуха, влажность, структуру и уплотненность торфяной залежи, степень разложения торфа, направление и скорость ветра, рельеф местности, наличие преград огню, уровень стояния грунтовых вод [15].

Влага выпавшего после продолжительной засухи дождя очень медленно проникает в толщу торфа. В результате торфяной пласт горит и в очень сырую осеннюю погоду торфа и даже под снегом за счет гидрофобности битумированных частиц, когда напочвенный покров сильно увлажняется и гореть

не может. Этот факт подтверждается событиями зимой 2002 года на территории Московской области, когда торфяники горели и под снегом, пока не началось весеннее половодье [16]. При этом распространение фронта пожара происходит в тлеющем режиме.

Различают три основных стадии развития торфяного пожара [6]. Первая стадия-*начальная*-характеризуется малой площадью очага и низкой температурой в зоне горения. Установлено, что в первые 1,5-2 часа сгорает слой торфа толщиной $(2\div 4)\cdot 10^{-2}$ м. Вторая стадия описывается увеличением скорости горения, а также повышением температуры в зоне горения. Площадь пожара увеличивается до нескольких тысяч квадратных метров, а горение становится устойчивым. Происходит распространение едкого дыма на большие расстояния. Третья стадия характеризуется большой площадью горения, высокой температурой в зоне горения, сильной задымленностью, значительной скоростью распространения пожара [17]. Площадь пожара может быть определена по формуле [17]:

$$F_n = \frac{\Pi \cdot V_n^2 \cdot t_p^2 \alpha}{360} = 0,00873 V_n^2 \cdot t_p^2 \alpha, \quad (1.1)$$

где V_n - скорость распространения пожара, [м/мин], t_p - время развития пожара, [мин], α - угол развития пожара (град), равный 65-2,6, V_B - скорость ветра [м/с].

Примерное изменение площадей пожара по времени при различной скорости ветра приведено в таблице 1.4 [17].

Таблица 1.4. Зависимость роста площади пожара от скорости ветра [17]

Сила ветра, Балл	Скорость ветра, м/с	Скорость распространения пожара, м/с	Площадь пожара (га) после возникновения его через ч.									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5-6	10	220	1,5	6,3	12,2	25,4	40	57	78	103	128	158
6-7	12	300	4,3	17,2	39,0	69,0	103	155	212	276	350	431
7-8	14	600	8,8	35,4	80,0	142	221	319	414	566	717	885
8-9	16	850	14,8	59,0	134	236	370	530	726	947	1200	1480
9-10	18	1170	21,4	86,0	192	343	535	770	1050	1370	1735	2140
10	20	1500	26,4	106	238	423	660	950	1300	1690	2140	2640

Под влиянием теплового воздействия низового лесного, либо степного пожаров, высушивается и загорается подстилающий слой, имеющий в своем

составе полуразложившуюся листву, траву, хвою и тонкие веточки. Причем влагосодержание напочвенного покрова ниже, чем у подстилающего слоя. За счет повышенного влагосодержания подстилающий слой высыхает медленнее по сравнению с напочвенным покровом и только в засушливый период его влагосодержание достигает минимального значения [18]. При воздействии теплового импульса от пожаров подстилающий слой может воспламениться и гореть. Если под ним расположен слой торфа, то он также воспламенится. Следует отметить, что горение торфа в естественных условиях осуществляется при избыточном влагосодержании и недостатке окислителя в режиме тления [18, 19]. Горение торфа носит диффузионный характер, поскольку лимитируется поступлением окислителя из окружающей среды. Движение фронта горения в среднем составляет 7 мм/ч при температуре $623 < T_r < 673 \text{ K}$ и имеющего влажность 70% [20, 21]. Причем горение распространяется очагами, что указывает на неоднородность залегания горючего материала. В дальнейшем очаги горения заглубляются, достигают слоя торфа с высокой степенью разложения и низкого влагосодержания. При распространении на большую площадь, отдельные очаги сливаются в единый очаг. До выхода продуктов горения на поверхность, горение торфа идет скрытно под напочвенным покровом без видимых внешних признаков. Течение образующегося газа принимает характер «просачивания» к поверхности через поры, то есть выполняется режим фильтрации [18]. Согласно [18] под поверхностью при пожаре на торфянике стелется синеватый дым (угарный газ-газообразный продукт неполного горения торфа в глубинных слоях и имеет синеватый цвет).

Изучение механизма перехода низового лесного пожара в торфяник, а также учет ботанического состава и структуры торфяной залежи позволит улучшить имеющиеся математические модели, описывающие торфяные пожары. Кроме того, знание о характере распространения горения в глубине торфяного пласта позволит оперативно организовать меры по локализации очага горения, а также на основе предварительного пробоотбора на местах торфяных залежей создать карту наиболее опасных участков развития торфяного пожара.

1.1.3. Экспериментальное определение теплофизических, термокинетических и фильтрационных характеристик торфа

При возникновении и распространении пожара одними из важнейших характеристик, определяющих скорость развития и теплообмен горючего вещества с окружающей средой, являются теплофизические свойства торфа: теплопроводность, теплоемкость, теплота сгорания вещества.

Субботин А.Н. с соавторами в работе [22] рассматривает зажигание слоя торфа при наличии на его поверхности источника тепла, зависимость теплофизических параметров от изменения характеристик самого торфа и изменения условий окружающей среды в лабораторных условиях (рис. 1.4).

В качестве источника зажигания брался стальной образец цилиндрической формы размерами $0,05 \times 0,05$ м, который помещался в печь, нагревался до необходимой температуры, после чего помещался в измерительную ячейку (рис. 1.4) диаметром 0,2 м и высотой 0,1 м с размещенным в ней слоем торфа плотностью 360 кг/м^3 и 8 %-ным влагосодержанием.

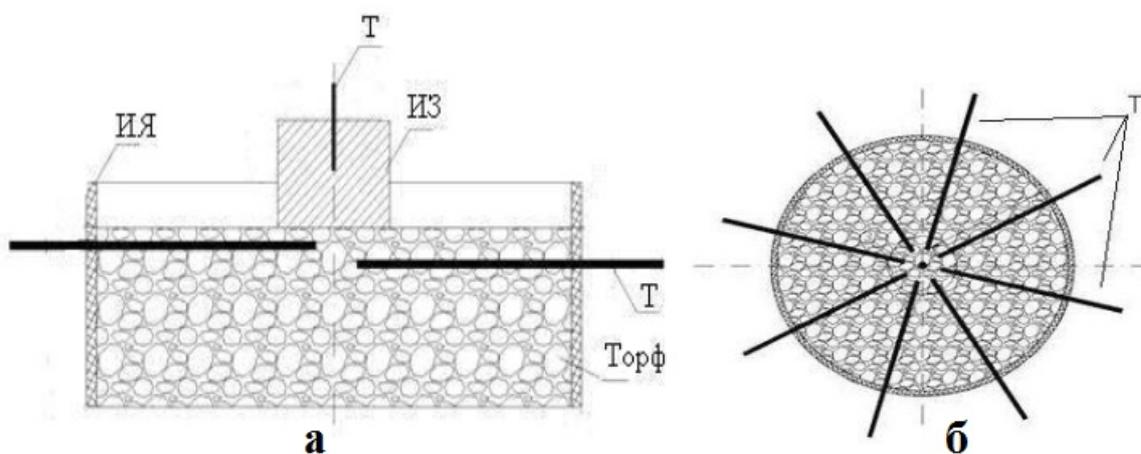


Рис. 1.4. Схема измерительной ячейки для определения момента зажигания и фиксации температурных полей [22]: а) поперечный разрез; б) горизонтальный разрез по нижней плоскости размещения термометров.

ИЯ – измерительная ячейка; Т – термометр; ИЗ – источник зажигания

В ходе экспериментов измерялась температура источника тепла и показания термометров в слое торфа, при этом фиксировался момент выравнивания температур

источника в определенной области торфяного пласта и последующее повышение температуры в очаге горения т.к. в данном случае источник охлаждает очаг горения и может быть причиной прекращения процесса горения.

Автором [22] отмечено, что минимальная температура источника тепла в эксперименте оказалась равной 748 К, а время зажигания торфа составило 38,4 мин.

В дальнейшем в работе [23], используя ту же экспериментальную установку, исследованы параметры зажигания торфа в различающихся условиях теплообмена с окружающей средой, в результате чего получены зависимости периода задержки зажигания и минимальной температуры источника зажигания от влажности торфа (рис. 1.5).

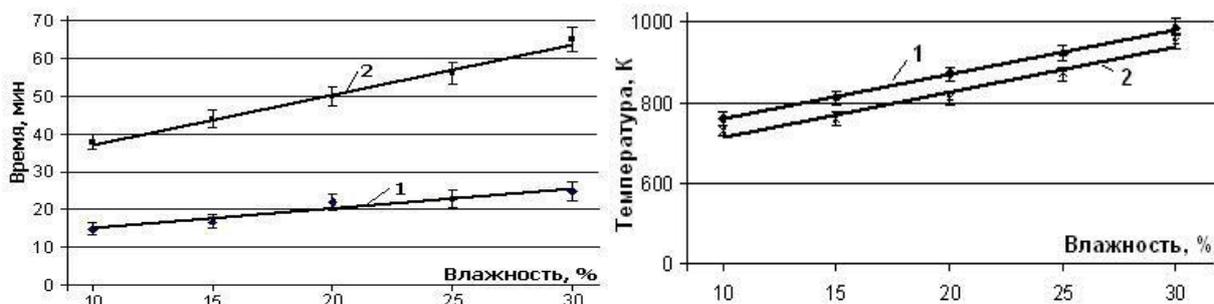


Рис. 1.5. Зависимость периода задержки зажигания и начальной температуры источника от влажности торфа [23]: 1 – естественные условия теплообмена с окружающей средой; 2 – источник зажигания в тепловой изоляции

В работе отмечено, что торф в воздушно - сухом состоянии (влажность 8%) зажигается при воздействии источником тепла с начальной температурой 490 °С в течение 17 минут. Повышение влажности до 20% приводит к увеличению начальной температуры источника до 600 °С и увеличению времени задержки возгорания (рис. 1.5). Данные результаты можно использовать при математическом моделировании зажигания торфа, однако их трудно интерпретировать в виде практических рекомендаций, так источник зажигания моделируется искусственным стальным образцом, имеющим свои теплофизические свойства и отличающимся от реального очага горения в природе.

Понимание механизма зажигания и горения торфа связано со знанием его минимальной энергии зажигания и горения. В [24] в лабораторных условиях определены значения минимальной энергии зажигания торфа различного ботанического состава, взятого из Тимирязевского и лесхоза Томской области с глубины залегания $(15-20) \cdot 10^{-2}$ м. На рисунке 1.6 изображена схема экспериментальной установки. Образцы торфа укладывались на бетонное основание, боковые поверхности образцов огораживались кирпичной кладкой для снижения стока тепла, верхняя поверхность оставалась открытой и в центре нее осуществлялось зажигание с помощью источника зажигания, выполненного в виде спирали тонкой намотки из нихромовой проволоки диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

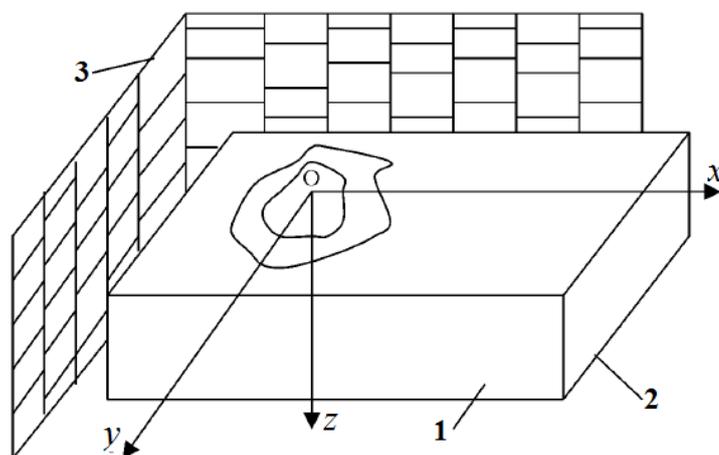


Рис. 1.6. Экспериментальная площадка [24]: 1 – образец торфа; 2 – бетонное основание; 3 – кирпичная кладка

Под минимальной энергией зажигания Q понимается значение тепловой энергии, выделяющейся с поверхности эталонного источника зажигания от момента его контакта с поверхностью торфа до момента начала горения t_r .

$$Q = J\Delta U\Delta t, \quad (1.2)$$

где J - сила тока; ΔU - падение напряжения на спирали.

Результаты определения минимальной энергии зажигания Q приведены в

таблице 1.5.

Таблица 1.5. Минимальная энергия зажигания образцов торфа из Тимирязевского лесхоза [24]

№ п/п	W	$\rho, 10^3, \text{кг/м}^3$	П	Z	Q, Дж	$\pm\delta Q, \text{Дж}$
1	0	0.43	0.67	0.43	162.5	31.5
2	0	0.48	0.63	0.41	183.0	40.1
3	0	0.52	0.60	0.42	195.0	42.3
4	0	0.53	0.59	0.29	243.8	48.7
5	0	0.38	0.71	0.12	81.25	8.2
6	0	0.58	0.56	0.09	32.50	7.1
7	0	0.78	0.40	0.09	81.25	9.1
8	0.09	0.74	0.44	0.11	81.25	7.3
9	0.16	0.59	0.55	0.11	16.25	4.3
10	0.23	0.33	0.75	0.10	16.25	4.7

В результате анализа полученных данных авторами [24] сделан вывод о том, что минимальная энергия зажигания образцов торфа зависит от ботанического состава торфа, его плотности (пористости) и влагосодержания. С увеличением плотности торфа ($W=0$) минимальная энергия зажигания возрастает [24].

Экспериментальные данные эффективных термокинетических констант термического разложения торфа для одностадийной схемы реакции носят достаточно противоречивый характер [4]. В работе [25] экспериментально определены термокинетические и фильтрационные характеристики торфа для процессов его сушки и пиролиза в изотермических условиях при температурах 337, 363 и 403 К. Эти условия создавались в сушильном шкафу, температура поддерживалась на заданном уровне с точностью $\pm 0,5$ °С. В эксперименте контролировались относительная влажность φ в объеме сушильного шкафа, атмосферное давление ρ , температура окружающего воздуха в сушильном шкафу T , зольность Z , влагосодержание W . Результаты экспериментов представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6. Термокинетические характеристики торфа для процессов сушки и пиролиза [25]

№ кривой	Процесс	Z	ρ , кг/м ³	W	L ₁ , L ₂ Дж/моль	K ₀₁ , K ₀₂ , с ⁻¹
1	Сушка	0,07	0,64	0,05	47367	1,425 10 ⁷
2	Сушка	0,62	0,49-0,64	0,15-0,22	8642,4	2,6 10 ⁶
3	Пиролиз	0,56	0,43-0,49	0,04	6315,6	1,9 10 ⁶

Для определения коэффициента фильтрации воздуха в торфе авторами [25] была разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 1.7.

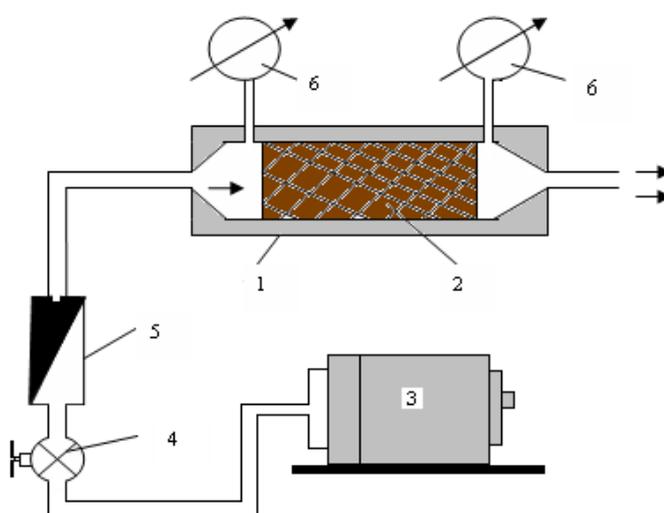


Рис. 1.7. Схема экспериментальной установки [25]

В стеклянную цилиндрическую трубу 1 помещался исследуемый образец торфа 2, после чего с помощью компрессора 3 подавался воздух во внутренний объем трубы, величина расхода газа ρv контролировалась ротаметром 5 и задавалась вентилем 4. При проведении экспериментов измерялся перепад давления газа Δp , а коэффициент фильтрации рассчитывался из закона Дарси по формуле:

$$\rho v = -K \frac{\Delta p}{\Delta x}, \quad (1.3)$$

где Δx - длина образца торфа.

В таблице 1.7 представлены результаты расчетов.

Таблица 1.7. Фильтрационные константы [25]

№ п/п	K, с	W	$\rho_T, \frac{кг}{м^3}$
1	2,15852	0,055	745,098
2	3,78688	0,063	549,019
3	4,73358	0,077	693,877
4	1,33892	0,156	881,67
5	0,456611	0,225	396,99
6	1,29719	0,933	591,836
7	0,628093	0	539,29
8	1,622944	1,5	637,755
9	1,893447	1,67	470,588

Эксперименты показали, что увеличение влагосодержания и плотности торфа ухудшает фильтрационные процессы, так как торф большей плотности имеет меньшие диаметры пор, а влага закупоривает мелкие поры, препятствуя прохождению через них воздуха [25].

1.1.4. Исследования процессов зажигания и горения торфа

На основе исследования горения верхних торфянистых слоев лесной почвы в [3, 26] было установлено, что процесс распространения торфяного пожара в основном определяется горением коксика – твердого горючего остатка, образующегося при нагреве органических веществ без доступа воздуха. В работе [26] утверждается, что одна из причин беспламенного горения торфа заключается в его низкой теплопроводности. В замкнутом объеме заглубившегося очага горения выделяющееся тепло идет в основном на подогрев и подсушку соседних слоев торфа. В работе [26] с использованием термопар и газоанализатора ВТИ-2 экспериментально исследован газообмен при почвенных пожарах и установлено, что беспламенное горение торфа происходит вблизи границы раздела слоев кокса и золы, а скорость горения определяется скоростью диффузии кислорода через слой золы в очаг горения. Через этот же слой происходит выброс газообразных и дисперсных продуктов сгорания (CO_2 , CO, частиц золы и др.) в атмосферу.

Утверждается, что процесс горения торфа происходит с химическим недожогом [26] и при сгорании кокса образуются CO_2 и CO , а изменение объема газовой фазы не происходит. К недостаткам этой работы следует отнести игнорирование процесса пиролиза торфа и фильтрации газов при горении торфа, а также серьезные недостатки в работе газоанализатора ВТИ-2, заключающиеся в его способности обнаруживать дисперсные продукты сгорания в пробе, в которой они заведомо отсутствуют, в количестве, находящемся в пределах точности определения этих компонентов [27].

Механизм сгорания торфа при почвенных (подземных пожарах) обсуждается в монографии [2]. В ней утверждается, что слой рыхлой реагирующей среды, содержащий значительно количество мелко раздробленных частиц растительного волокна – торф с малой степенью разложения – горит в беспламенном режиме. Отдельные элементы растительного волокна (стебельки мха и других растений) соприкасаются друг с другом лишь в отдельных точках или вообще не соприкасаются. При этом общая структура сохраняется и слой реагирующей среды сгорает как целый кусок, покрываясь сверху золой.

Экспериментальные исследования режимов зажигания торфа представлены в работах [4, 24, 28]. В частности, в работе [28] экспериментально исследовались режимы зажигания и горения торфов, характерных для Томской области, как в потоке воздуха, так и в его отсутствии. Исследования горения торфа проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис 1.8.

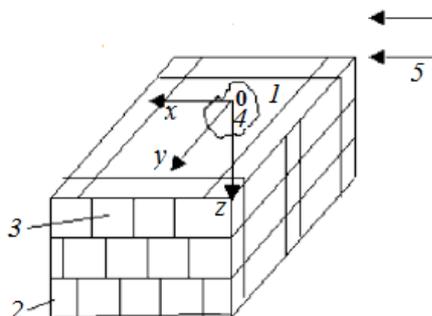


Рис. 1.8. Схема проведения эксперимента [28]: 1 – образец торфа; 2 – бетонное основание; 3 – кирпичная кладка; 4 – очаг горения; 5 – направление действия потока воздуха

Зажигание центральной части на верхней поверхности образцов торфа

различного ботанического состава, уложенных на бетонное основание с окруженными кирпичной кладкой боковыми поверхностями, производилось с помощью эталонного источника, описанного в работе [29].

В результате авторами был обнаружен новый (пламенный) режим горения торфа в потоке воздуха в диапазоне скоростей ветра $2,5 < v_e < 3.0$ м/с (рис. 1.9,А). Кроме того в условиях естественной конвекции наблюдался беспламенный режим горения (рис. 1.9,Б). А.М. Гришин и др. [28] обуславливают беспламенный режим горения торфа как тление, при котором скорость горения определяется фильтрационно-диффузионными процессами подвода окислителя через пористую структуру торфа.

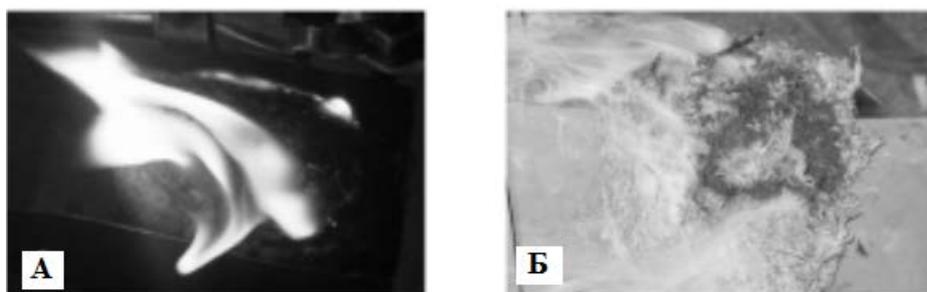


Рис 1.9. Пламенный (А) и беспламенный (Б) режимы горения торфа [28]

Причины заглубления горения под напочвенный покров рассмотрены во многих литературных источниках [2, 3, 30]. В этих работах выдвинута гипотеза о том, что самозаглубление фронта происходит в тех местах, где сухая и рыхлая почва. Считается также, что причиной заглубления может служить своеобразная динамика воздушных течений, повышенный коэффициент теплопроводности корней растений по сравнению с торфяной почвой [31]. В работе [32] рассматривается заглубление фронта горения под слой напочвенного покрова, связанное с особенностями кинетики низкотемпературного горения различных слоев торфа в зависимости от глубины залегания. Фронт пожара может самозаглубляться в нижние слои за счет различия плотностей и условий фильтрации, а также соотношением между горючим и окислителем [17].

Следует отметить работу [33], в которой рассмотрены компоненты дыма, образующегося при горении торфа, что необходимо в качестве первого шага в

определении потенциального риска для здоровья человека при горении органических почв в засушливых регионах. Изучались данные по торфяным пожарам 2004 и 2005/2006 гг. в северной области г. Перт, Западной Австралии. В работе [34] образцы торфа 100×100 мм в поперечном сечении и 50 мм в толщину в лабораторных условиях тлеи в калориметре с целью изучения выбросов угарного и углекислого газа. Эксперименты показали, что хорошо увлажненный торф при тлении производит больше углекислого газа в сравнении с высушенным торфом и производит одинаковое количество угарного газа.

В литературе достаточно мало исследований, посвященных анализу вероятности воспламенения торфа [35-39]. В частности, Frandsen [35] проводил опыты по зажиганию образцов торфа для оценки влияния его влагосодержания на распространение тлеющего пожара. Сухой торф, предварительно уложенный в емкость размерами $0,1 \times 0,1$ м, был зажжен спиралью, нагретой электрическим током (рис. 1.10).

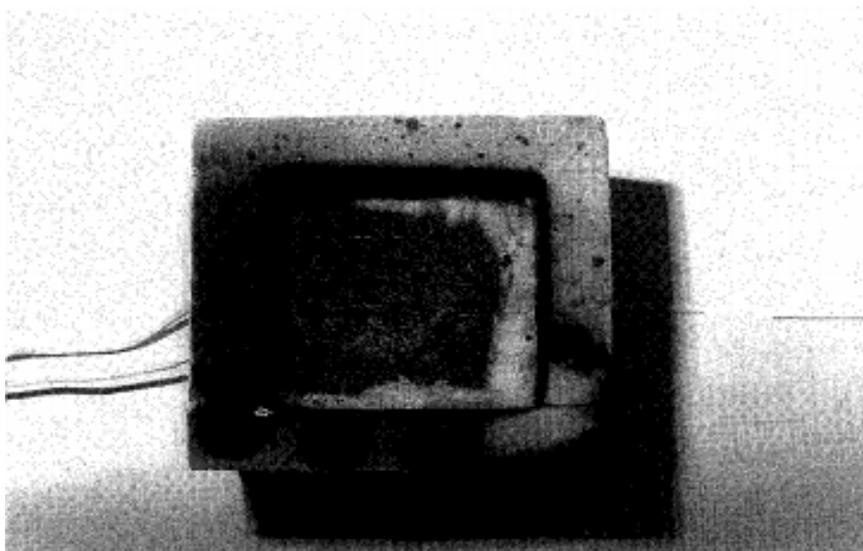


Рисунок 1.10. Емкость для сжигания образцов торфа

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 1.11 в виде графика зависимости вероятности воспламенения от влажности торфа. Из графика видно, что воспламенение возможно, если влагосодержание торфа ниже 110 %.

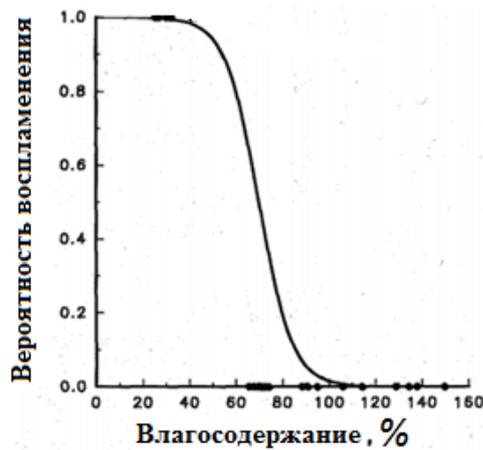


Рис. 1.11. Вероятность воспламенения в зависимости от влажности торфа [35]

Также Frandsen [36] измерял теплоту, возникающую при тлении торфа методом калориметрии с учетом потребления кислорода. Теплота, выделяемая на единицу органической массы, почти не зависела от объемной плотности органики и неорганического вещества, но уменьшалась с ростом влагосодержания. В дальнейшем [40], используя модернизированную экспериментальную установку, позволяющую учитывать распространение горения и распределение температуры в образцах торфа, удалось получить значения критического влагосодержания, необходимого для его зажигания. Авторы [40] отмечают, если влагосодержание верхового торфа $W < 115\%$ относительного сухого вещества, то вероятность воспламенения будет высокая, если $115\% \leq W \leq 135\%$, то опасность воспламенения будет средней (промежуточной) и при значении влагосодержания $W > 135\%$ вероятность воспламенения будет незначительной.

Под действием теплового излучения происходит высушивание слоя торфа, а затем его воспламенение в пламенном или тлеющем режиме, в зависимости от интенсивности теплового излучения. В монографии [13] представлены результаты экспериментального исследования воспламенения торфа различного ботанического состава, глубины залегания, степени разложения и зольности под воздействием потока лучистой энергии, генерируемого с помощью ксеноновой лампы высокого давления ДКРС-10000 (10 кВт). Отмечается, что пламенный режим при воспламенении торфа носит вынужденный характер и, как правило, не способствует развитию очага горения. Ботанический состав торфа, характерного

для болот Томской области и его степень разложения не оказывают практического влияния на характеристики процесса воспламенения в диапазоне плотности лучистого потока $q = (1,6 \cdot 10^5 - 1,52 \cdot 10^6)$ Вт/м².

Таким образом, имеющиеся экспериментальные результаты по изучению механизма зажигания и горения торфа в лабораторных условиях, в большинстве своем получены с использованием эталонного источника зажигания (стальной образец, спираль тонкой намотки и т.д.), воздействующего на образец торфа. Проведение экспериментов по изучению перехода фронта горения низового лесного пожара, представляющего собой лесной горючий материал (хвоя сосны, лесная подстилка и т.д.), на торфяник позволит уточнить имеющиеся данные и дать практические рекомендации по локализации и тушению очагов возгораний, возникающих на торфяных залежах.

1.1.5. Способы и устройства по борьбе с пожарами на торфяниках

Торфяные пожары, как и другие типы пожаров, представляют большую опасность для жизнедеятельности человека [41]. Торфяные пожары характерны для второй половины лета, когда в результате длительной засухи верхний слой торфа просыхает до относительной влажности 25-100 %. При таком содержании влаги он может загораться и поддерживать горение в нижних, менее сухих слоях. Глубина прогорания торфяной залежи определяется уровнем залегания грунтовых вод. Торфяники могут гореть годами в гетерогенной фазе под поверхностью земли, и в засушливый период, двигаясь к поверхности, создают очаги лесных пожаров [42]. Таким образом, разработка оптимального способа локализации и тушения такого типа пожаров является приоритетной и актуальной задачей в области борьбы с природными пожарами.

В современных способах тушения торфяных и подстильно-гумусовых пожаров применяют мотопомпы, с помощью которых подают в зону горения водяные струи; засыпают очаги горения минерализованным грунтом или

смешивают горящий слой торфа с влажным подстилающим слоем; окапывают зоны горения канавами или канавками и заполняют их водой [43]. Однако перечисленные способы имеют недостатки. Например, заливка водой торфяных и подстильно-гумусовых очагов горения подразумевает наличие вблизи пожаров водоемов, либо возможность непрерывной доставки необходимого для тушения объема воды, что необходимо на начальной стадии развития торфяного пожара, когда очаг горения характеризуется малой площадью и низкой температурой [19, 44].

Так, в работе [44] воду под давлением с помощью торфяного ствола подают непосредственно в слой торфа, граничащий с очагом горения, либо же в сам очаг. Увеличение смачивающего свойства воды обеспечивают добавки поверхностно-активных веществ.

Но, как показывает практика, не всегда удается потушить очаги торфяного пожара и горение торфа может возобновиться. Для полной локализации и последующего тушения торфа необходимо смачивать дополнительно и прилегающие к зоне горения слои торфа, что увеличивает расход воды, соответственно возрастают материальные и трудовые затраты. Однако тушение водяными струями торфяных пожаров может оказаться не достаточно эффективным и принести вред, поскольку на частицах торфа, прилегающих к очагу горения, образуется водонепроницаемая пленка из возгоняющихся при горении битуминозных веществ, входящих в состав торфа [45]. Горение торфа может продолжаться и в дальнейшем, за счет притока окислителя через его поры. А в засушливую погоду огонь может выйти на поверхность и дать начало лесным пожарам [16]. Общим недостатком водяных методов и средств, помимо их неэффективности, является нарушение эксплуатации залежей торфа, т.е. его добычи и использования [19].

Существуют способы тушения лесов и торфяников различными агрегатными состояниями газов: «бомбами» с жидким азотом, «брикетами» с гранулами диоксида углерода и инертным газом, представляющим собой воздух, «очищенный» от кислорода мембранным аппаратом [16, 46]. Общим недостатком

указанных методов и средств является их «поверхностная активность», в то время как загорание и развитие торфяных пожаров происходит на глубине, недосягаемой для них.

Особо следует отметить работу [45], в которой приводится описание способа и автоматизированного комплекса обнаружения, предотвращения и тушения торфяных пожаров путем использования торфяных стволов-термозондов (ГТС-ТЗ). С помощью этих стволов-термозондов через них вместо воды в обнаруженную зону подают под давлением инертный газ-воздух, лишенный кислорода и охлажденный до $-313^0 K$. За счет подачи воздуха и охлаждения участка торфяника до замораживания в нем молекул воды осуществляется локализация очага горения торфа. Отделение кислорода из воздуха осуществляется с помощью компрессора и термомагнитного сепаратора воздуха (ТМСВ). Сепарированный из воздуха кислород стравливается в атмосферу через выпускной электромагнитный клапан кислородного ресивера. Недостаток способа заключается в наличии сложного оборудования и, кроме того, поскольку сепарация воздуха осуществляется «техническим» методом, то это не дает гарантии чистого разделения компонентов и кислород может присутствовать в инертной части воздуха, что допускает неполную локализацию очага горения торфа.

В целом, стоит отметить, что имеющиеся в настоящее время современные технологии по локализации и тушению пожаров на торфяниках нуждаются в более точных данных непосредственно о механизме заглублиения очага горения торфа, что позволит на ранних стадиях осуществлять прогноз их возникновения и последующего распространения.

1.1.6. Математическое моделирование процессов зажигания и тления торфа

В настоящее время математическое моделирование является наиболее сложным вариантом исследования пожаров на торфяниках ввиду необходимости

определения коэффициентов переноса и скорости сушки, теплофизических и термокинетических постоянных, пиролиза и горения торфа в функции от параметров состояния исследуемой среды (торфа), что связано с необходимостью проведения экспериментальных исследований.

Э.В. Коневым [2] предложена полуэмпирическая модель горения рыхлого торфяного слоя, построенная на основе закона сохранения энергии. Однако на основе только балансового отношения не удастся построить замкнутую математическую модель горения. Помимо этого нет учета многофазности среды и многокомпонентности диффузии. Также в [2] предложена полуэмпирическая модель беспламенного горения плотного слоя. В рамках этой модели учтена диффузия кислорода через слой золы и использован закон сохранения массы сгорающего материала в алгебраической форме [2]

$$\rho u(1 - m - n) = \rho_g v s, \quad (1.2)$$

где ρ – плотность сгоревшего материала, ρ_g и v – плотность газообразных продуктов сгоревшего материала и скорость выброса этих продуктов в атмосферу, s – относительная площадь пор в слое золы, m – доля кокса, n – зольность материала, u – скорость продвижения фронта сгорания (тления). Недостатком моделей, предложенных Э.В. Коневым, является игнорирование закона сохранения количества движения, многокомпонентности среды и многокомпонентной диффузии, отсутствие конкретных формул для скоростей химических реакций и уравнения состояния смеси газов, которая образуется в торфе при его сгорании.

Первая фундаментальная математическая модель торфяных пожаров была рассмотрена в монографии [47] и обзорной статье [4]. Данная модель представлена в виде совокупности уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения массы, количества движения и энергии. Считалось, что температуры конденсированной и газовой фаз отличаются друг от друга, торф моделировался многокомпонентной двухтемпературной пористой реагирующей средой. Учитывались прогрев, сушка и пиролиз торфа, а также

горение газообразных и конденсированных продуктов пиролиза. Для определения коэффициентов переноса термокинетических постоянных (энергий активации и предэкспоненциальных множителей) были проведены эксперименты по исследованию процессов зажигания и горения торфа [24] и затем были решены соответствующие обратные задачи механики реагирующих сред [48]. С использованием этой математической модели и итерационно-интерполяционного метода [49] в дальнейшем была решена задача о зажигании горизонтального слоя торфа [50].

Аналитические модели являются более простыми в решении. При этом обеспечивается хорошая оценка порядка величины искомых переменных в процессе горения торфа, особенно полной характеристической температуры горения и скорости распространения. Основное использование этих моделей находим в анализе результатов экспериментальных наблюдений. В большинстве из них используются эмпирические постоянные. Например, несколько аналитических моделей нагревания почвы и воспламенения торфа можно найти в работе Kallman [51]. В данных моделях прогрева почвы оценивается только среднее потребление теплоты на нагрев лесной подстилки. Самыми значительными моделями распространения являются стационарные модели, описывающие тлеющий фронт, распространяющийся в одномерном пористом горючем материале [52, 53]. Преимуществом этих моделей является учет процесса сушки, пиролиза и окисления с теплопереносом. Однако качественное сравнение результатов [53] вызывает сложности, поскольку скорость тления и скорость распространения зависят от экспериментального измерения по крайней мере одной из этих переменных.

Существенный вклад в математическое моделирование торфяных пожаров внес Гришин А.М. с соавторами [13]. Получены одномерные, двумерные и трехмерные постановки задач о зажигании слоя торфа, расположенного на слое воды, с учетом процессов сушки, пиролиза и окисления газообразных и конденсированных продуктов и конкретной базы данных. Численное решение задач математического моделирования получено с помощью итерационно-

интерполяционного метода решения задач математической физики [49].

Впервые одномерная постановка и численное решение задачи о возникновении тления торфа в результате очага горения представлена в [54], где на основе модели Гришина А.М. [47] и учета экспериментальных данных [24, 25] исследуется зажигание слоя торфа. Оценивается величина скорости тления, зависимости времени зажигания торфа от коэффициента теплообмена, а также зависимость температуры торфа от пространственной переменной в различные моменты времени. Результаты показали, что среднее значение скорости тления торфа по порядку величины согласуется с рассмотренными экспериментальными данными [17, 24]. Кроме того, отмечено, что с уменьшением концентрации кислорода в воздухе время зажигания реагента увеличивается, что качественно согласуется с [55].

Двумерная задача, при которой торф представляет двухтемпературную среду (газовая и конденсированная фазы имеют разные температуры), рассмотрена в работе [56]. С учетом существующих моделей [47] и экспериментальных исследований [24, 15, 31] рассматривается возникновение подземного пожара, когда слой торфяника, расположенный на слое воды, поджигается сверху, а фронт горения распространяется в глубину пласта при различных внешних условиях и начальном влагосодержании торфа. В результате теоретически подтвержден факт, что тонкий слой торфа на болоте, в большинстве своем, не тлеет.

В [57] дана постановка и численно решена 3-х мерная задача о зажигании слоя торфа с учетом процессов сушки, пиролиза и окисления газообразных и конденсированных продуктов горения, а также с учетом конкретной базы данных. Считалось, что слой торфа зажигается сверху при помощи локального источника зажигания, а фронт горения распространяется внутри торфяника при различном начальном влагосодержании торфа и внешних условиях среды. Математически сформулированная задача, представляющая частный случай модели, предложенной в [4], также решалась итерационно-интерполяционным методом [49]. Для теплофизических и термокинетических параметров торфа использовались данные работ [10, 17, 47, 56]. Теплофизические характеристики

воды и водяного пара брались из [58]. В таблице 1.8 приведено время зажигания (при котором температура поверхности газовой фазы достигает значений $T_{2w} = 1050$ К) торфа при различных значениях плотности в конденсированной фазе, начальной объемной доли каркаса торфа, начальной объемной доли газовой фазы в пористом реагенте, зольности и влагосодержании.

Таблица 1.8. Время зажигания торфа при различных параметрах [57]

ρ_{1s} , кг/м ³	φ_{1H}	φ_{2H}	z	w	(t^* , ч)
1180	0,7	0,05	0,64	0,24	6,42
1040	0,7	0,1	0,57	0,45	7,9
893	0,7	0,15	0,48	0,64	9,2
750	0,7	0,2	0,4	0,88	10,44
653	0,65	0,25	0,33	1,18	13,68

В работе отмечается согласование полученных результатов с экспериментальными данными по скорости тления торфа [28] и глубине фронта горения [59].

Для математического моделирования сушки и пиролиза торфа необходима информация о термокинетических константах этих процессов. В работе [60] проведен расчет термокинетических постоянных процесса сушки СГМ с помощью методики решения обратных кинетических задач [48] для образцов из 2-х регионов и с разной глубиной залегания. Результаты свидетельствуют о том, что математическое моделирование процессов сушки СГМ с целью прогноза пожарной опасности на данной территории целесообразно рассчитывать для основного проводника горения, имеющего доминирующую биомассу и минимальное влагосодержание.

Содержательный обзор по математическому моделированию возникновения и распространения торфяных пожаров собран в монографии [13]. Приведены результаты экспериментальных исследований воспламенения торфа под воздействием потока лучистой энергии, исследования по зажиганию торфа в лабораторных условиях, кинетические исследования процесса сушки и пиролиза торфа, рассматривается приближенное аналитическое решение задачи о

зажигании слоя торфа и ее анализ, а также результаты математического моделирования возникновения торфяных пожаров.

С помощью математического моделирования тепломассопереноса при воспламенении и распространении торфяного пожара [61, 62] была определена минимальная энергия источника заданных параметров, воспламеняющего торф при разных значениях влагосодержания и условий теплообмена источника с окружающей средой. Предложенная математическая модель тепломассопереноса в слое торфа с достаточной для практики точностью описывает процессы зажигания и горения торфа, но следует отметить, что влияние тепломассопереноса на воспламенение торфа осуществляется с помощью локального внешнего источника тепла цилиндрической формы.

Авторы [63] использовали торф как сложный органический материал, анализируя восемь типов шведского торфа, используя данные термогравиметрии. Оценивается использование простых математических корреляций, чтобы предсказать физические и химические свойства торфа. В результате были получены термогравитограммы в диапазоне температур от 368 К до 873 К с использованием темпа нагрева 15 К в минуту и проведено сравнение рассмотренных в работе методов расчета (метод наименьших квадратов и пошаговая множественная регрессия) для данных видов торфа.

Таким образом, большинство существующих моделей позволяют учитывать процессы сушки, пиролиза и окисления газообразных и конденсированных продуктов пиролиза торфа, однако, до сих пор в научной литературе отсутствуют достоверные данные по механизму зажигания и горения того или иного типа торфа в зависимости от его ботанического состава. Учет компонентного состава торфа и его влияние на вероятность зажигания и распространение горения в торфе позволит применить результаты в практических задачах по оперативному предотвращению и тушению торфяных пожаров.

1.2. Физико-математическое моделирование теплофизических процессов при зажигании древесины.

1.2.1. Основные характеристики и свойства (химические, физические, механические) древесины

Согласно [64-66] древесина определяется как пористая реакционноспособная среда, физико-химические свойства которой изменяются при нагревании и горении.

В работе [64] описаны основные свойства различных пород древесины. Ее плотность в абсолютно-сухом состоянии почти не зависит от породы и в пределах от 0 до 106⁰ С, а теплоемкость в значительной мере зависит от влажности древесины [64]. Теплопроводность древесины невысока и характеризуется коэффициентом внутренней теплопроводности вследствие ее пористого строения. Этот коэффициент зависит от объемного веса, влажности древесины и ее температуры. С увеличением объемного веса или влажности теплопроводность возрастает. Таким образом, на практике можно полагать, что в пределах изменения влажности от 0 до 30 % теплопроводность древесины возрастает на 1 % при увеличении влажности на 1 % [64]. С увеличением температуры теплопроводность древесины также увеличивается.

В работе [64] даны коэффициенты теплопроводности древесины некоторых пород (при $T = 20^0 C$) в зависимости от направления по отношению к волокнам (Таблица 1.9).

Таблица 1.9. Коэффициенты теплопроводности древесины сосны и пихты в зависимости от направления по отношению к волокнам [64].

Порода	Направление	Коэффициент теплопроводности в г/кал в сек. через площадь в 1 см ² при толщине образца в 1 см и разнице температур в 1 ⁰ С
Сосна	Поперек волокон	0,00010
	Вдоль волокон	0,00030
Пихта	Поперек волокон	0,00009
	Вдоль волокон	0,00030

В работе [67] оценены наиболее важные физико-механические свойства образцов древесины при нагревании под нагрузкой, во многом влияющие на поведение деревянных строительных конструкций (устойчивость, огнестойкость) в условиях пожара. Результаты представлены в таблице 1.10.

Таблица 1.10. Физико-механические свойства древесины [67]

Показатель	Сосна	Ель	Береза	Дуб
Плотность, кг/м ³	470 – 520	455	586	640 – 870
Предел прочности при сжатии вдоль волокон, МПа	33 – 51	37,2	41,8	54 – 61
Предел прочности при растяжении вдоль волокон, МПа	78–115	91,1	111,4	120–145
Предел прочности при растяжении поперек волокон, МПа	67,4–86	65,5	97,4	114–164
Модуль упругости при изгибе, ГПа	6,7–8	9,5	11,3	10,1–19,4
Предел прочности при скалывании вдоль волокон, МПа	6,0–7,7	5,4–6,5	10,8–9,7	7,8–13
Твердость радиальная / торцевая, МПа	24–30	29,3/20,9	50,2/36,4	63–107

Во всех случаях, древесина хвойных пород по механическим свойствам уступает древесине лиственных пород, а влажность древесины существенно ухудшает ее прочностные характеристики [67].

1.2.2. Физико-математическая модель зажигания и горения древесины

В работе Гришина А.М. [68] в результате анализа имеющихся данных по горению древесины, выделены следующие физико-математические процессы:

- 1) нагрев от фронта лесного пожара под влиянием конвекции и излучения;
- 2) сушка древесины;

3) пиролиз древесины и образование конденсированного, газообразных и дисперсного продуктов пиролиза;

4) горение газообразных горючих продуктов пиролиза;

5) горение дисперсных продуктов пиролиза (частиц сажи);

6) горение конденсированного продукта пиролиза (коксика).

В результате в [68] получена схема изменения состояния и химического состава древесины при ее нагревании и последующем горении (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Схема изменения агрегатного состояния и химического состава древесины при ее горении [68].

Стрелками на рисунке 1.12 обозначены: 1 – подвод теплоты в результате излучения, конвекции и теплопроводности; 2 – сушка древесины; 3 – пиролиз древесины; 4 – образование коксика; 5 – окисление газообразных и дисперсных продуктов пиролиза; 6 – образование пепла; 7 – образование и исчезновение частиц сажи; 8 – образование частиц дыма и их выветривание.

Также в работе [68] получена основная система уравнений, выражающих законы сохранения массы, количества движения и энергии и описывающих основные физико-химические процессы, происходящие при зажигании и горении древесины. Данная модель, с учетом сделанных допущений и данных работ [64, 65], позволяет учесть эффекты, которые могут быть приняты во внимание в более

простых моделях, но ввиду сложности математического аппарата не может быть использована для оперативного прогноза

В работе [69] дано аналитическое решение о зажигании деревянной стены дома в результате воздействия лесного пожара. Цель исследования заключалась в определении времени зажигания древесины с использованием итерационно-интерполяционного метода. Авторами были приняты следующие основные допущения:

1. Начальные температуры деревянной стены и фронта лесного пожара считались известными.

2. На границе раздела сред (зона пожара – деревянная стена) имеют место теплообмен в результате действия процессов излучения и теплопроводности, а также гетерогенные процессы испарения воды и горения древесины.

3. Помимо теплопроводности при решении задачи учитывается перенос окислителя к границе раздела зона пожара – деревянная стена.

4. Условием зажигания является достижение на границе раздела сред критической температуры $T_w|_{t=t_*} = T_* \gg T_H$.

5. Зажигание деревянной стены происходит до момента ее полного прогрева.

На рисунке 1.13 изображена область определения основной системы уравнений, рассмотренной в [69]:



Рис. 1.13. Область определения основной системы уравнений [69]

Авторами предполагалось, что уравнение теплопроводности для зоны пожара и слоя древесины имеют вид:

$$a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = \frac{\partial T_1}{\partial t} \text{ при } -\infty < x < 0,$$

$$a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = \frac{\partial T_2}{\partial t} \text{ при } x > 0. \quad (1.1)$$

Здесь $a_1 = \lambda_1 / \rho c_{v1}$ и $a_2 = \lambda_2 / \rho_2 c_{v2}$ – коэффициенты температуропроводности во фронте пожара и деревянной стене; λ_1 – коэффициент теплопроводности; λ_2 – коэффициент теплопроводности древесины; ρ_1 – плотность; ρ_2 – плотность древесины; c_{v1} и c_{v2} – теплоемкости газа в зоне пожара и древесине; t – время; x – координата; T_1 и T_2 – температуры в зоне пожара и в слое древесины.

В результате математических преобразований в работе [69] получено выражение для времени зажигания t_3 и концентрации кислорода на поверхности древесины c_w :

$$t_3 = \frac{\sqrt{\pi a_1 a_2 D} (A + C_H Q_w) + r_2 \sqrt{\pi a_1} \lambda_2 (T_\Gamma - T_H)}{2\pi A r_2 \sqrt{a_1 a_2}} \pm \frac{\left\{ \left[\sqrt{\pi a_1 a_2 D} + r_2 \sqrt{\pi a_1} \lambda_2 (T_\Gamma - T_H) \right]^2 - 4A \pi a_1 r_2 \sqrt{D a_2} \lambda_2 (T_\Gamma - T_H) \right\}^{0,5}}{2\pi A r_2 \sqrt{a_1 a_2}}; \quad (1.2)$$

$$c = \frac{\sqrt{D} + \sqrt{\pi} k_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_w}\right) \Phi\left(\frac{|x|}{2\sqrt{\pi t}}\right)}{\sqrt{D} + \sqrt{\pi} k_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_w}\right)} c_H; \quad (1.3)$$

где $A = \varepsilon \sigma T_\Gamma^4 - q_1 S_1 (P_* - P_e)$; $P_* = k_1 \exp(-E_1 / RT_w)$; $Q_w = \rho_w k_2 q_2 c_w \exp(-E_2 / RT_w)$; $\rho_w = P_e M / (RT_w)$; $r_2 = k_2 \exp(-E_2 / RT_w)$

На основе полученных формул (1.2)-(1.3) приводятся графики изменения температуры (рис. 1.14) и концентрации кислорода (рис. 1.15) в зависимости от пространственной координаты x [69].

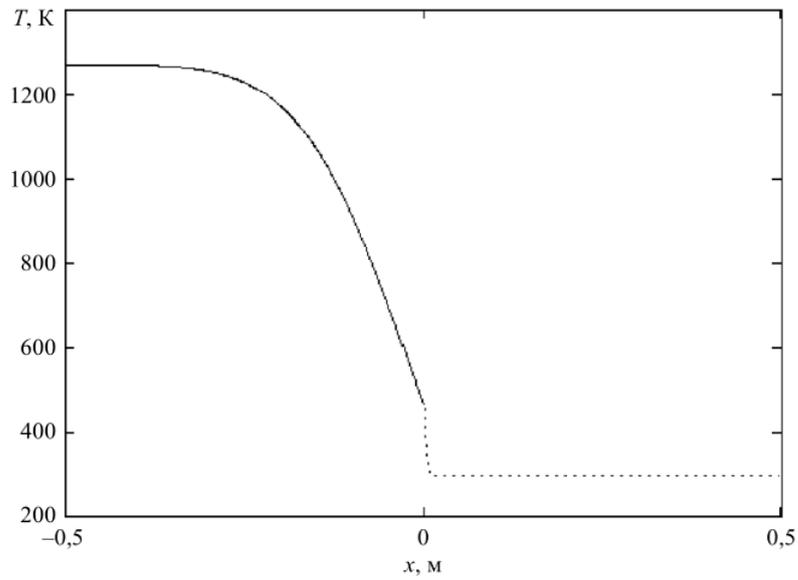


Рис. 1.14. График изменения температуры в зависимости от пространственной координаты при $t = 100$ с [69]

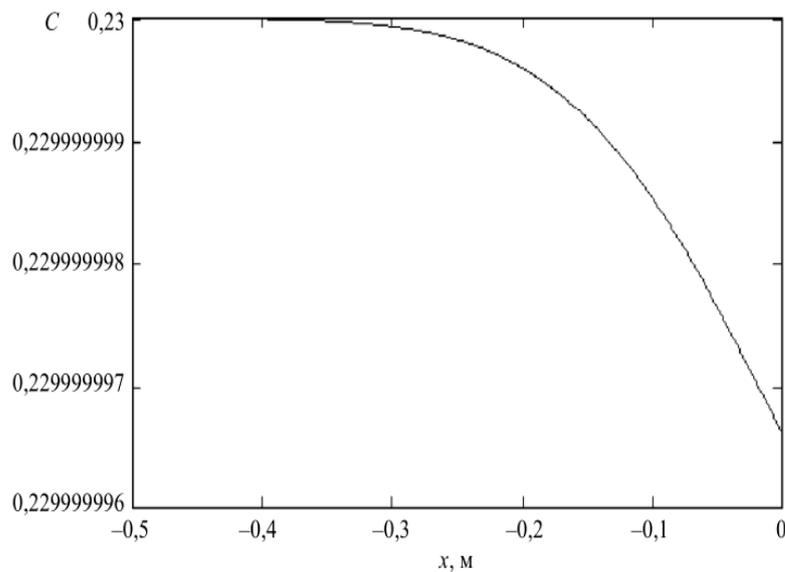


Рис. 1.15. График изменения концентрации кислорода в зависимости от пространственной координаты при $t = 100$ с [69]

Данные результаты согласуются с физикой гетерогенного процесса воспламенения [62], однако в расчетах не учитывается пористость и проницаемость древесины, а также анизотропия ее структуры.

1.2.3. Экспериментальные исследования воздействия природных пожаров на деревянные строения

Исследования в данной области в последние годы активно ведутся такими учеными как Дж.Д. Коэн, Б.В. Батлер, Н. Вайт, А. Гальгано, А. Тодиско, С.Л. Манзелло, В. Мелл, А. Марангидес, А. Симеони, В. Бабраускас, А. Франджи, А.М. Гришин, Г.А. Доррер. Работы зарубежных авторов в основном посвящены изучению воспламеняемости деревянных конструкций под действием горящих частиц [70-74], а также огнестойкости строительных материалов на основе древесины, используемых при постройке жилья и производственных помещений [75, 76].

Содержательный обзор данных по пожарной опасности в лесу, обусловленной типом лесорастительной формации и погодными условиями, а также возникновению и развитию лесных пожаров в зависимости от класса пожарной опасности, мероприятиям по предупреждению возникновения лесных пожаров, их обнаружению и планам по оперативной борьбе приведен в работе [43]. Однако изложенные понятия и принципы относятся только к начальной стадии развития лесного пожара и не учитывают механизм распространения очага горения на жилых территориях, находящихся вблизи леса.

В работах [47, 77] отмечается, что при сильном порывистом ветре при лесных пожарах от кроны деревьев могут отрываться горящие тонкие охвоенные веточки и образуется своеобразный огненный «дождь». В результате действия горящих частиц могут возникать очаги городских пожаров, которые, в свою очередь, могут генерировать горящие частицы, в результате чего реализуется эстафетный механизм распространения городского или поселкового пожара.

Изучение влияния пожаров на деревянные конструкции в натуральных крупномасштабных экспериментах затруднено из-за плохой воспроизводимости результатов и большой зависимости параметров экспериментов от внешних факторов [78-81]. В основном эти проблемы решаются в лабораторных условиях, позволяющих с некоторыми допущениями частично моделировать условия воздействия природных пожаров на образцы, выполненные из дерева.

Вопросы, связанные с эффектами от лесных и смешанных пожаров, обсуждались в работах [82-84]. Авторами отмечено, что горючая загрузка в зоне застройки сильно отличается от лесной зоны. Горючие материалы в зданиях состоят из различных горючих веществ, имеющих различные физико-химические свойства, в то время как лесные горючие материалы состоят в основном из клетчатки, лигнина и гемицеллюлозы [64], кроме того отмечается различие в самом процессе горения каких-либо сооружений и горения лесных горючих материалов. При развитии горения в замкнутом помещении унос конвективного тепла и теплового излучения задерживается стенами этого помещения, кроме того в помещении поддерживается определенная влажность, в то время как в лесу она определяется параметрами окружающей среды (осадки, время года, солнечное излучение, ветер). Также в помещении ограничен приток окислителя, в лесу же ситуация является обратной [85].

Одним из факторов, определяющих пожарную опасность древесины, является ее способность к воспламенению и распространению горения. Теоретические и экспериментальные исследования условий возникновения и горения древесины рассматриваются во многих работах [67, 86-88].

В частности, в работе [67] рассмотрены физико-химические процессы горения древесины разных пород и определены ее пожароопасные свойства (воспламеняемость, распространение пламени, тепловыделение, дымообразующая способность). Авторами отмечается, что в ходе экспериментов по изучению скорости потерь массы древесины хвойной и лиственной пород при воздействии внешнего радиационного теплового потока (испытания проводились в соответствии с ГОСТ 30402-96), наблюдается двухстадийный характер изменения скорости потерь массы. Первая стадия связана с пиролизом компонентов древесины и образованием кокса, вторая – с окислением и выгоранием кокса [67].

Также в работе [67] отмечается, что средняя скорость обугливания зависит от интенсивности теплового потока (рис. 1.16), а скорость обугливания влажных образцов древесины всегда меньше скорости обугливания абсолютно сухих.

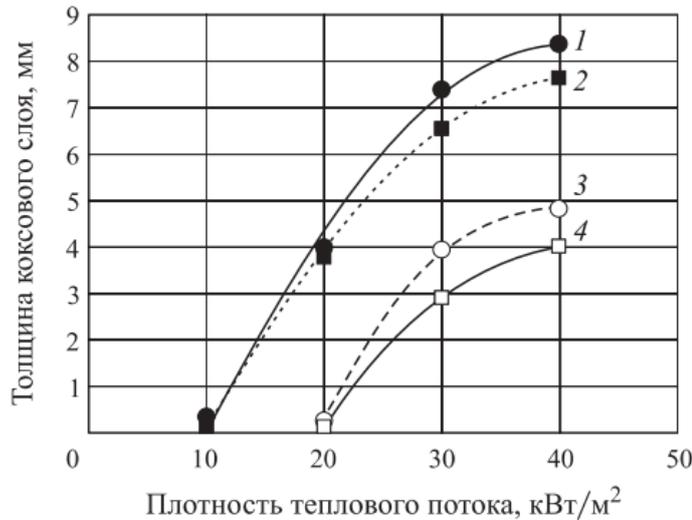


Рис. 1.16. Влияние плотности радиационного теплового потока на толщину коксового слоя при пламенном горении образцов древесины в течение 5 мин [67]:

1 – ель; 2 – сосна; 3 – береза; 4 – дуб

Многие показатели пожарной опасности напрямую зависят от скорости выделения тепла при горении древесины или взаимосвязаны с ней (скорость распространения пламени, дымообразование) [67]. В связи с этим, в лабораторных условиях с применением калориметра OSU марки HRR-3 фирмы «Atlas» определялась скорость тепловыделения при горении древесины в зависимости от плотности внешнего теплового потока, а также анализировалось влияние влагосодержания древесины на динамику тепловыделения. Образцы древесины имели размер 150×150×(10...20) мм. Скорость тепловыделения при горении Q'' (кВт/м²) определялась по формуле:

$$Q'' = \eta m'' \Delta H_c, \quad (1.4)$$

где η – коэффициент полноты сгорания; m'' – массовая скорость выгорания с единицы площади поверхности, г/(м²·с); ΔH_c – низшая теплота полного сгорания топлива, кДж/г.

Результаты представлены на рис. 1.17 и 1.18.

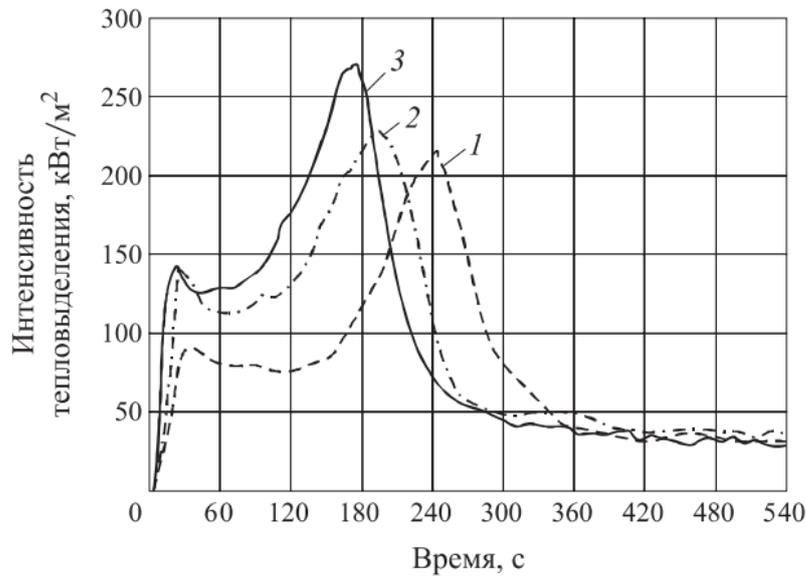


Рис. 1.17. Влияние плотности внешнего теплового потока на интенсивность тепловыделения при горении древесины ели [67]: 1 – 20 кВт/м²; 2 – 35 кВт/м²; 3 – 52 кВт/м²

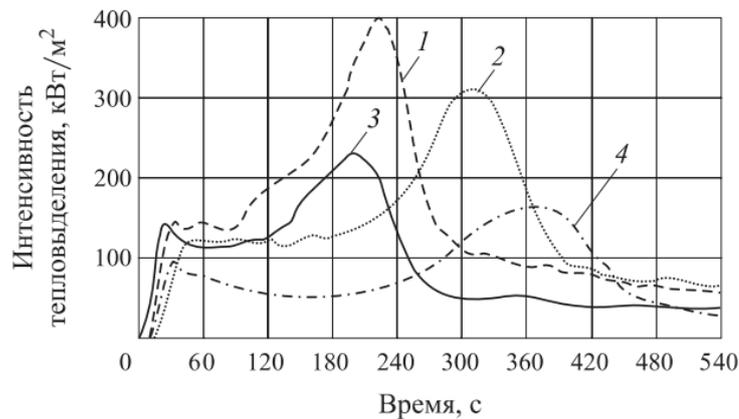


Рис. 1.18. Влияние содержания влаги в образцах древесины березы (1, 2) и ели (3, 4) на скорость тепловыделения при плотности внешнего теплового потока 35 кВт/м² [67]: 1, 3 – влагосодержание 7 %; 2, 4 – влагосодержание 14 %

В результате экспериментов в работе [67] установлены критические параметры воспламенения образцов древесины в зависимости от их породы и вида, показана зависимость максимальной скорости тепловыделения при горении древесины от плотности внешнего теплового потока, содержания влаги в образцах и разновидности древесины. Однако в работе не проанализировано влияние геометрии испытываемых образцов древесины на процесс воспламенения.

В работе [89] приводится обширный обзор параметров воспламеняемости древесины, оценки горючести испытуемых образцов с использованием термогравиметрического анализа, метода калориметрии, а также проведением тестовых экспериментов. Отмечается, что зажигание, пиролиз, а также распространение горения по образцу древесины в большой степени зависит от тепловых и экологических условий – в частности, ориентация образца, его геометрия, скорость нагрева, доступ кислорода. На основании результатов [90, 91] в таблице 1.11 приводятся диапазоны температуры для пиролиза и горения древесины.

Таблица 1.11. Диапазоны температур при пиролизе и горении древесины [89]

Диапазон температуры	Процесс разложения
$> 100^{\circ}\text{C}$	Испарение химически несвязанной воды
$160 - 200^{\circ}\text{C}$	Полимерные компоненты древесины (целлюлоза, лигнин, гемицеллюлоза) начинают медленно разлагаться. Газы, образующиеся на данном этапе, являются негорючими (в основном H_2O)
$200 - 225^{\circ}\text{C}$	Пиролиз древесины, по-прежнему, протекает медленно и большинство образующихся газов являются негорючими
$225 - 275^{\circ}\text{C}$	Начинается основной процесс пиролиза
$280 - 500^{\circ}\text{C}$	Газы (CO , метан и т.д.), выделяемые при данных температурах, являются летучими, дымовые частицы видны
$> 500^{\circ}\text{C}$	Кокс продолжает тлеть и окисляться с выделением CO , CO_2 и H_2O

Таким образом, в настоящее время остается актуальной проблема пожарной безопасности построек из древесины, что связано с физико-математическим моделированием теплофизических процессов при зажигании и горении древесины. Необходим также учет геометрии древесины, типа лесного горючего материала, что позволит уточнить существующие математические модели, описывающие данное явление.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ТОРФА ОТ НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

2.1. Эксперименты по зажиганию торфа от низового лесного пожара

2.1.1. Лабораторное оборудование, методика проведения эксперимента

Исследования проводились на лабораторном испытательном комплексе, позволяющем смоделировать различные типы пожаров [92].

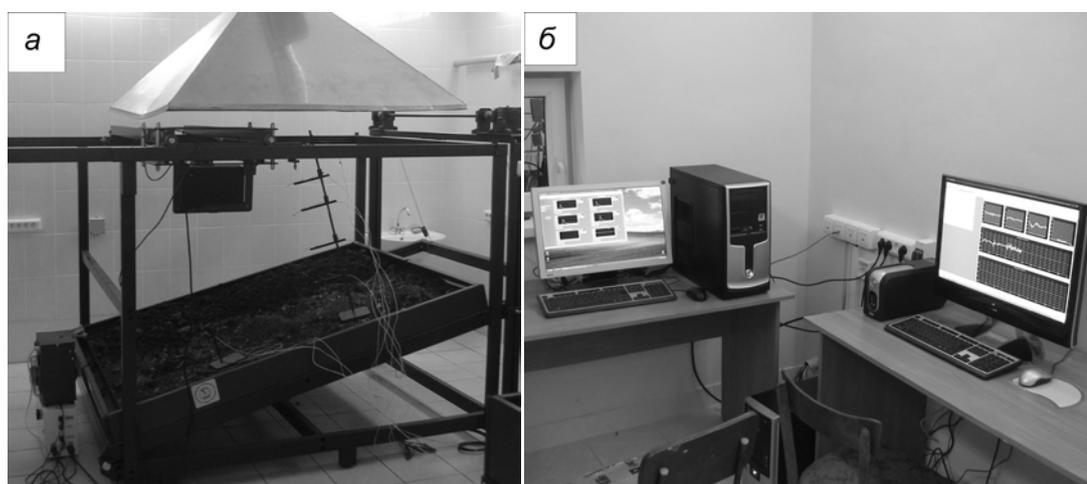


Рис. 2.1. Установка для физического моделирования низовых лесных и степных пожаров (а); система сбора и регистрации данных (б) [92]

Испытательный короб-полигон (рис. 2.1,а) имеет следующие размеры: длина – 2 м, ширина – 1,5 м, высота – 0,13 м. Он наполнен землей и имеет возможность наклоняться на угол до 40° от горизонтальной плоскости. Такое положение позволяет имитировать модельные пожары в гористой местности. Глубина стола равна 0,13 м, что позволяет имитировать различные толщины слоя лесного либо степного горючего материала. Влияние внешней среды на процесс горения низового лесного и торфяного пожара практически исключено за счет того, что массовая скорость генерации газообразных и дисперсных продуктов сгорания значительно меньше скорости отвода через системы вентиляции.

Для определения температур в слое лесного горючего материала и торфа использовалась система сбора и регистрации данных (рис. 2.1,б), состоящая из персонального компьютера, трех пятиканальных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с подключаемыми термопарами типа ХА (хромель-алюмель) с диаметром спая 200 мкм. Одновременно система сбора и регистрации может регистрировать показания 15 термопар и двух тепломеров. Программа регистрации входных данных разработана на базе программного комплекса LabVIEW.

Влагосодержание контролировалось с помощью анализатора влажности AND MX-50 с точностью до 0.01 %, а масса образцов определялась с помощью электронных весов AND HL-400 с точностью 0.1 г (рис. 2.2). Поджиг лесных горючих материалов (ЛГМ) осуществлялся с помощью линейного источника зажигания в виде спирали, выполненной из материала с высоким омическим сопротивлением.



Рисунок 2.2. Измерительное оборудование: Анализатор влажности AND MX-50 (слева); электронные весы AND HL-400 (справа)

В таблице 2.1 представлен ботанический состав, а также классификация компонентов некоторых типичных для Томской области видов торфа, взятых для исследований [8].

Таблица 2.1. Ботанический состав исследуемых видов торфа

№ п/п	Ботанический состав	Содержание %	Степень разложения, %	Классификация по свойствам и роли в возникновении и распространении пожаров*	Плотность ρ , кг/м ³	Вид торфа
1	2	3	4	5	6	7
1	Пушица	50	20	2	420	Сосново-пушицевый
	Кора, древесина сосны	35		1		
	Вересковые кустарнички	ед.		3		
	Сфагнум магелланский	5		1		
	Сфагнум обманчивый	ед.		1		
	Сфагнум узколистый	5		1		
	Сфагнум руссова	5		1		
2	Сфагнум магелланский	50	25	1	416	Травяно-сфагновый переходный
	Сфагнум остроконечный	5		1		
	Сфагнум большой	5		1		
	Сфагнум балтийский	5		1		
	Шейхцерия	15		1		
	Вахта	10		1		
	Осока топяная	10		2		
	Осока вздутая	ед.		2		
Осока волосистоплодная	ед.	2				
Вересковые кустарнички	ед.	3				

Примечания. * 1 – проводники горения; 2 – поддерживающие горение; 3 – задерживающие горение.

Образцы торфа приведены на рисунке 2.3.



Рис. 2.3. Образцы торфа: слева – сосново-пушицевый; справа – травяно-сфагновый

Схема проведения экспериментов приведена на рисунке 2.4 [93]. На дно металлического короба 1 с грунтом укладывается образец торфа 2 с размерами $(0,1 \times 0,08 \times 0,06)$ м³. В этом образце устанавливались термопары: одна в приповерхностном слое ближе к ЛГМ – 3, другая на оси внутри образца торфа 2 на расстоянии $1 \cdot 10^{-2}$ м от первой. К образцу торфа 2 примыкал слой ЛГМ массой $20 \cdot 10^{-3}$ кг. В этом слое на границе с образцом торфа 2 устанавливалась также термопара 5. Слой ЛГМ поджигался источником 4. В качестве источника зажигания слоя ЛГМ использовалась спираль накаливания.

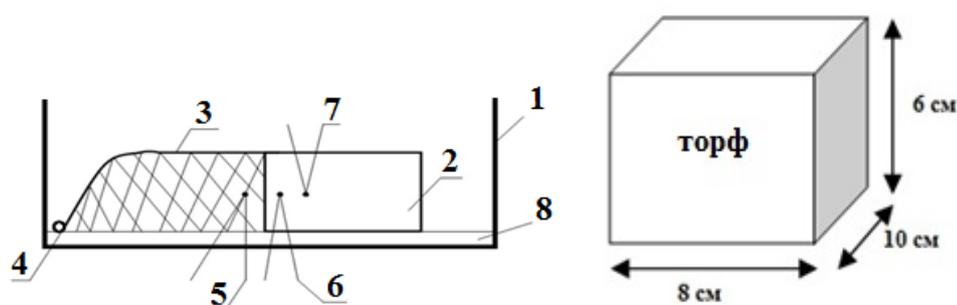


Рис. 2.4. Схема проведения эксперимента (слева) и размеры испытуемых образцов торфа (справа). 1 – металлический короб – полигон; 2 – образец торфа; 3 – лесной горючий материал (ЛГМ); 4 – источник зажигания; 5 – термопара в слое ЛГМ; 6 – термопара у поверхности торфа; 7 – термопара внутри слоя торфа; 8 – подложка из грунта

Образцы торфа и слой ЛГМ, представляющий собой хвою сосны, предварительно высушивались в сушильном шкафу ШСП 0,5-200 при температуре 373 К для достижения необходимых условий, при которых проводились эксперименты. Плотность твердых частиц в торфе ρ_s составляла около $3,3$ г/см³, плотность скелета ρ_d около $0,13$ г/см³ [94]. Влажосодержание торфа в эксперименте составляло $w=4,5 - 12,7$ %, влажосодержание ЛГМ $w^*=5,5 - 5,7$ %. В ходе экспериментов брались образцы торфа различного влажосодержания (4,5 и 12,7 %). Температура воздуха T_e составляла 290 К, масса торфа

варьировалась в пределах 25 – 27,5 г, масса слоя ЛГМ бралась постоянной и составляла 20 г.

Характерные размеры площадки ЛГМ представлены на рисунке 2.5.

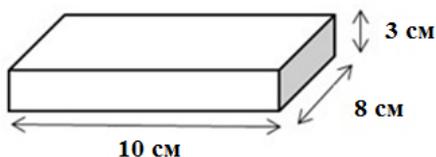


Рис. 2.5. Размеры площадки ЛГМ (хвоя сосны)

Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали $\delta W / W \cdot 100\% \leq 3\%$, $\delta m / m \cdot 100\% \leq 1,5\%$, $\delta T / T \cdot 100\% \leq 2,5\%$.

Следует отметить, что образцы торфа не заглублялись в грунт, целью данного эксперимента являлось изучение перехода горения от слоя ЛГМ в торф, а также определение скорости движения фронта горения в слое торфа [95].

2.1.2. Результаты и анализ

На рисунке 2.6 представлена типичная зависимость изменения температуры от времени для серии опытов [93]. Сплошная линия 1 характеризует изменение температуры в слое ЛГМ. Пунктирная кривая 2 – в пристеночном слое торфа, штрих-пунктирная 3 – изменение температуры в образце торфа на расстоянии $1 \cdot 10^{-2}$ м от термопары, находящейся в пристеночном слое (см. рис. 2.4). Размещение термопары в слое ЛГМ позволяло определить переход горения от ЛГМ к торфу и изменение температуры (сплошная линия 1 на графиках) являлось реперной точкой, от которой начинался отсчет времени зажигания образца торфа. Следует отметить, что нарастание температуры в пристеночном слое более сухого образца, имеющего влагосодержание $W=4,5\%$ идет с запаздыванием порядка 10 с. Для торфа, имеющего влагосодержание $W=12,7\%$, нарастание идет с запаздыванием 30 с, что объясняется затратами времени на испарение влаги.

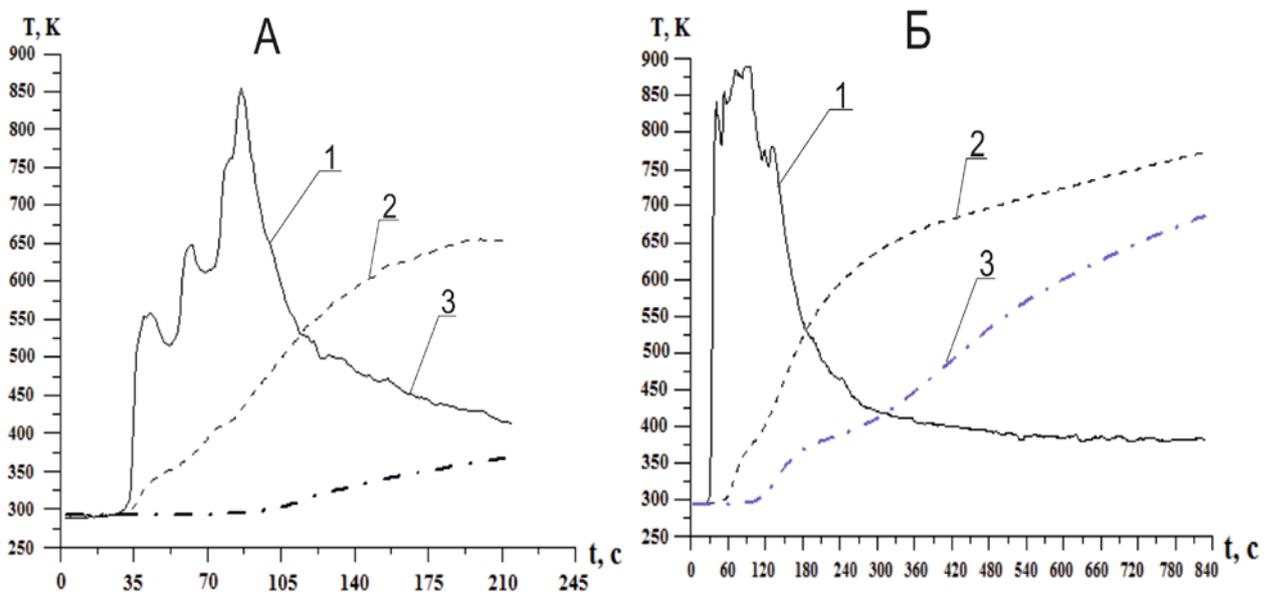


Рис. 2.6. Зависимости изменения температуры от времени (А – для торфа с влажностью 4,5 %, Б – для торфа с влажностью 12,7 %):

1 – изменение температуры в ЛГМ; 2- изменение температуры в приповерхностном слое торфа; 3 – изменение температуры в массе торфа

Полученные результаты по определению скорости горения торфа в результате воздействия очага низового лесного пожара в зависимости от влажности торфа представлены в таблице 2.2 [96].

Таблица 2.2. Скорость горения торфа по горизонтальной оси в зависимости от влажности и ботанического состава

№	W, %	Z, %	ρ , кг/м ³	v, мм/мин
1	4,5	18	420	0,15
	12,7	18	409	0,19
2	4,5	19	416	0,17
	12,7	19	397	0,22

Скорость движения фронта пожара в слое сосново-пушицевого торфа в горизонтальном направлении на расстоянии $1 \cdot 10^{-2}$ м между термопарами составляет ориентировочно: 0,15 мм/мин при влажности 4,5 % и 0,19 мм/мин при влажности 12,7 %, в слое травяно-сфагнового торфа – 0,17 мм/мин при влажности 4,5 % и 0,22 мм/мин при влажности 12,7 %.

Следует отметить, что влагосодержание влияет на скорость распространения фронта горения в сторону возрастания на 25 % , что согласуется с работой [24], в которой авторы объяснили прирост скорости возрастанием эффективного коэффициента теплопроводности, аналогично влиянию малых влагосодержаний на минимальную энергию зажигания. Дальнейшее увеличение влагосодержания приводит к снижению скорости горения, что связано с затратами энергии на испарение влаги в торфе. Полученные скорости горения хорошо согласуются с работой [24].

2.2. Исследование механизма заглубления очага горения в массу торфа при воздействии очага низового лесного пожара

В работе [21] отмечено, что процесс горения в глубине залежи торфа происходит значительно интенсивней, чем вверху ввиду того, что свежий холодный воздух, как более тяжелый, поступает в нижнюю часть зоны горения, где реагирует с горящим торфом. В процессе заглубления очага горения происходит аккумуляция выделяющегося в слое торфа тепла и его распространение в направлении участков с повышенной влажностью, воспламеняющихся после испарения содержащейся в них влаги [21].

Для торфов характерно двухвершинное распределение частиц по размерам, связанное с наличием в торфе, с одной стороны, грубодисперсных частиц растительных составов, и с другой стороны – высокодисперсной фракции, состоящей из продуктов разложения. Грубодисперсные остатки, образующие каркасную сетку или являющиеся своего рода «наполнителем», имеют средние размеры частиц от 0,1 до 4,5 мм [2]. Ботанический состав исследуемых образцов торфа (таблица 2.1), характерных для торфяных болот Томской области, включает большое процентное содержание различных сфагновых мхов, имеющих высокую водоудерживающую способность. Эта способность определяется наличием в листьях и на поверхности стеблей мертвых гиалиновых (водоносных) клеток, которые имеют ромбовидную форму. В их оболочках образуются кольцевые и

спиральные утолщения, а также поры, с помощью чего происходит поглощение и удержание этими клетками воды.

Известно [22], что по своим свойствам и роли возникновения и распространения пожаров компоненты напочвенного покрова, формирующие торф, неравнозначны и подразделяются на три класса: проводники горения, материалы, поддерживающие горение и задерживающие распространение горения.

К проводникам горения относят такие материалы, которые быстро увлажняются и быстро высыхают. Тем самым они являются материалом, который воспламеняется раньше всего и обеспечивает непрерывное распространение пламени по напочвенному покрову. К ним относятся мхи, лишайники с мелким опадом, лесная подстилка, торф, валежник, пни, горящие отдельные стволы деревьев [2].

К классу поддерживающих горение относятся живые растения, регулирующие испарение влаги и имеющие постоянную высокую влажность (70% и более), а также небольшой объемный вес слоя. Вследствие этого горение по ним самопроизвольно не распространяется. Они могут сгорать лишь вместе с проводниками горения, повышая общую интенсивность кромки пожара. К данному классу относятся травы, кустарнички, самосев древесных пород, подрост, подлесок, хвоя, охвоенные ветки и мелкие сучья полога древостоя [2].

Задерживающими распространение горения являются такие материалы, которые в естественном состоянии гореть не могут ввиду высокой влажности. Поскольку для их воспламенения и горения требуется большое количество тепла, они значительно снижают общую интенсивность горения. К ним относятся некоторые кустарнички и травы (люпин многолетний, бадан, сахалинская гречиха), кустарники (серая ольха, спирея) и лиственные деревья (липа, осина, тополь) [2].

Следует отметить, что во всех известных работах не учитывается ботанический состав торфа, как фактор заглужения фронта горения в его массу [97]. Упоминание о влиянии ботанического состава на зажигание торфа

приведено в работе [21], в которой приводятся результаты экспериментов по определению минимальной энергии зажигания, а также в работе [59], где были приведены результаты экспериментальных исследований по определению глубины фронта горения слоя торфа ИК-методами. Имеющиеся в настоящее время работы не акцентировались на изучении механизма заглубления горения в слое торфа в зависимости от его ботанического состава и наличия в составе торфа тех или иных проводников горения. В связи с этим представляется интерес проведения экспериментальных исследований механизма заглубления очага горения в торфе в результате воздействия фронта низового лесного пожара [98].

2.2.1. Методика проведения экспериментов

Будем считать, что пожар на торфянике возникает в результате зажигания от очага низового лесного пожара, смоделированного опадом хвои и лесной подстилки [99]. В диссертационной работе исследуется и оценивается механизм заглубления очага горения в слой торфа.

При зажигании на поверхности, горение (тление) будет распространяться по проводникам горения, а также компонентам напочвенного покрова, поддерживающим горение в массу торфа [100]. Для того чтобы проверить данное предположение, в лабораторных условиях на испытательном комплексе [92] проводились эксперименты по моделированию зажигания торфа от низового лесного пожара.

Эксперименты проводились в следующей последовательности (см. рис. 2.7,А). На дно металлического короба 1, заполненного грунтом, укладывался образец торфа 2 с размерами $(0,08 \times 0,065 \times 0,05) \text{ м}^3$ таким образом, что половина его была заглублена в грунт, а половина оставалась на поверхности. Плотность образцов торфа варьировалась в пределах $380\text{--}420 \text{ кг/м}^3$. Слева от образца на грунт укладывался слой ЛГМ, моделирующий низовой лесной пожар слабой интенсивности. В слой ЛГМ помещалась термopара 7. В образце торфа

устанавливалось четыре термопары: две термопары на границе ЛГМ-торф (3 и 6) и две термопары в массе торфа (4 и 5). Расстояние между термопарами составляет $1 \cdot 10^{-2}$ м.

Поскольку, в природе над торфом находится подстилаящая поверхность [23], моделировались еще два варианта развития подземного пожара: 1 (рисунок 2.7,Б) – фронт пожара, смоделированного ЛГМ, подходит к торфянику, находящемуся под грунтом; 2 (рисунок 2.7,С) – зажигание слоя ЛГМ и развитие пожара происходит непосредственно над торфяником.

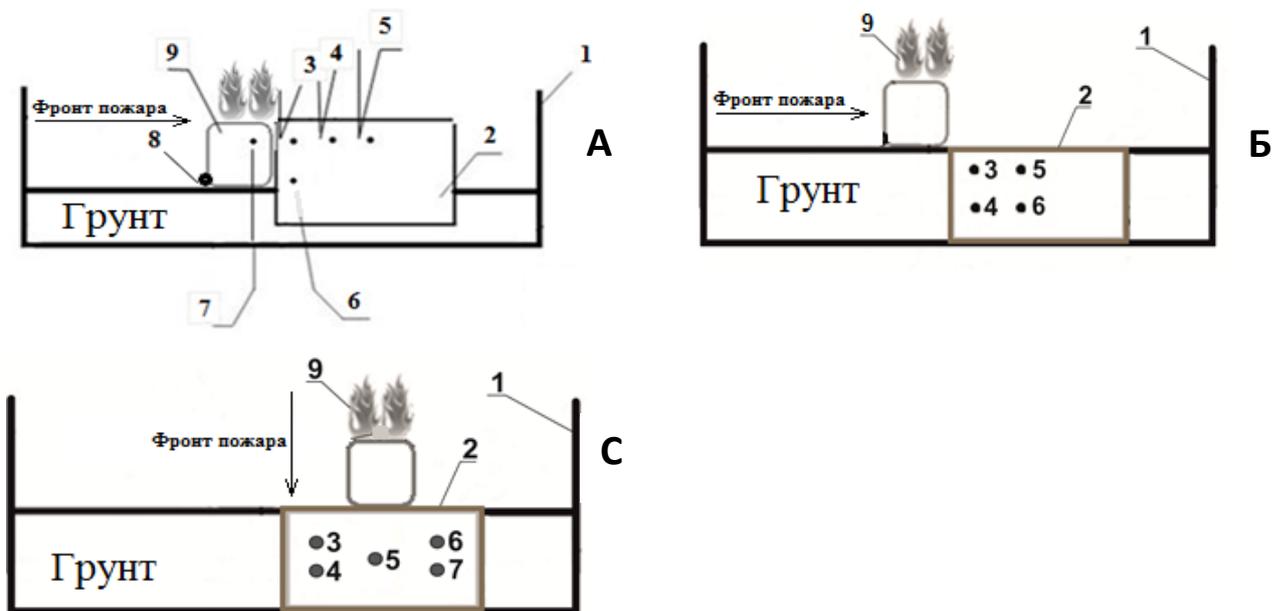


Рис. 2.7. Схема проведения эксперимента. 1 – металлический короб – полигон; 2 – образец торфа; 3,4,5,6,7 – термопары в образце торфа; 8 – источник зажигания; 9 – образец ЛГМ

Брался сосново-пушицевый верховой торф (№ 1 в таблице 2.1). В опытах масса торфа составляла 27 г, масса ЛГМ (хвоя сосны) бралась 20 г, влагосодержание образцов торфа варьировалась в пределах 1,7 – 44%, температура воздуха в ходе экспериментов составила 17° С.

2.2.2. Анализ результатов экспериментальных исследований

Анализировались наиболее распространенные в Томской области сосново-

пушицевый и травяно-сфагновый тип торфа (таблица 2.1). Рассматривался торф, имеющий влагосодержание на момент взятия пробы (44 %), а также предварительно высушенный в сушильном шкафу ШСП-0,5 – 200 до значения влагосодержания 1,7 %. На рисунке 2.8 приведены полученные с помощью микроскопа фотографии вертикального среза образцов торфа (месторождение – поселок Плотниково Томской области) при увеличении в 200 раз [101]. Хорошо видны растительные остатки *А*, формирующие каркасную сетку, и водопроводящие поры *В*.

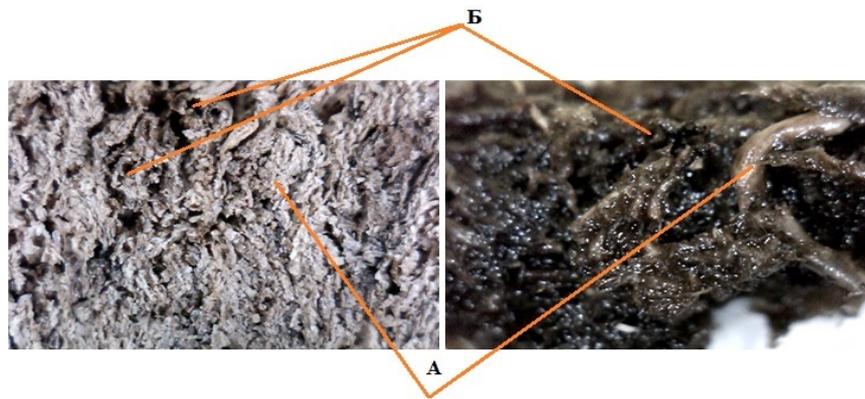


Рис. 2.8. Вертикальный срез образца торфа: $W = 1,7\%$ (слева), $W = 44\%$ (справа)

Были получены зависимости изменения температуры от времени для торфов с различным влагосодержанием [98].

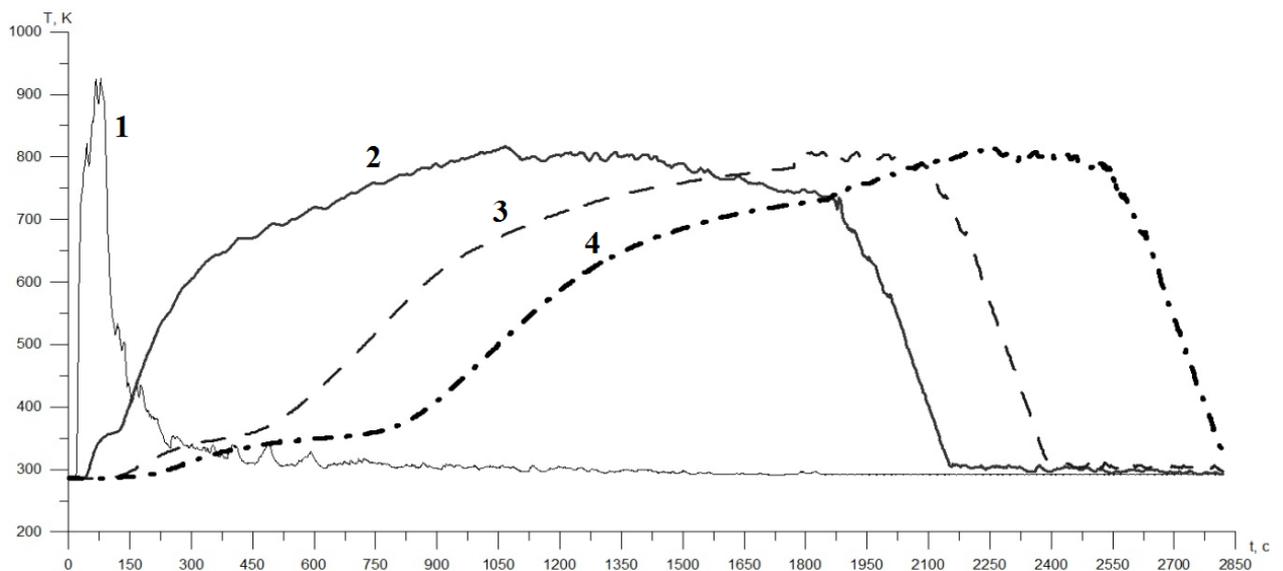


Рис. 2.9. Типичная картина распределения поля температур в слое ЛГМ и образце торфа

График, приведенный на рисунке 2.9, соответствует изменению температуры во фронте горения слоя ЛГМ (кривая 1) и в слое торфа (кривые 2-4). Эксперимент продолжался до полного сгорания образца. В дальнейшем, ввиду длительности процесса горения торфа, эксперимент прекращался в момент, когда регистрировалась температура термопарой, расположенной в его массе.

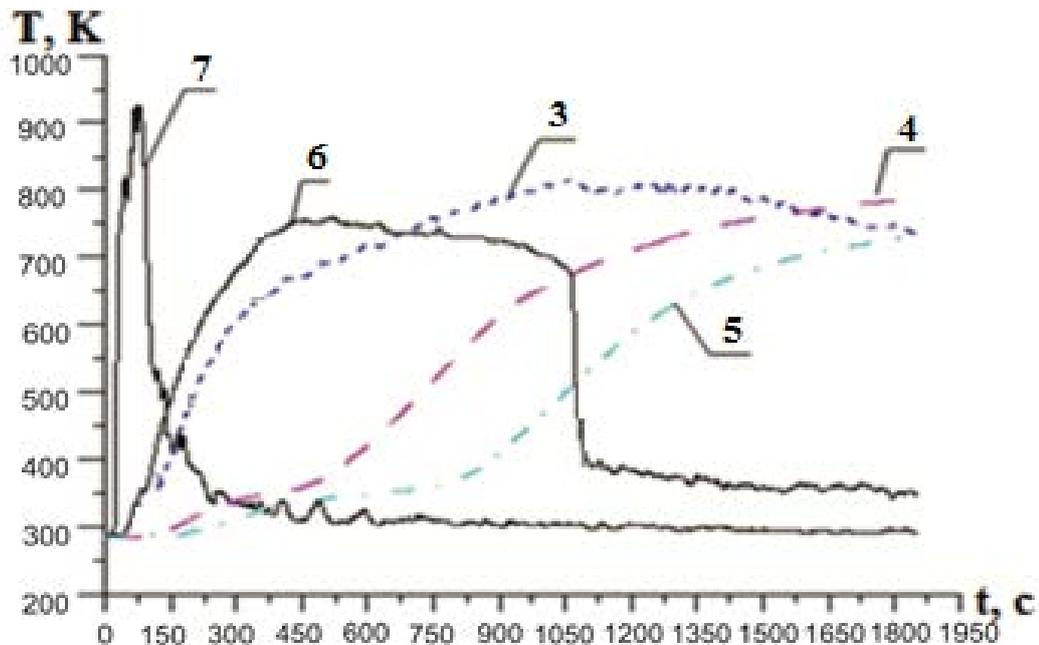


Рис. 2.10. Зависимости изменения температуры от времени для образцов с влажностью $W = 1,7\%$: 3-изменение температуры на границе ЛГМ-торф; 4, 5-изменение температуры в массе торфа; 7-кривая зависимости температуры в образце ЛГМ

На рисунке 2.10 приводится график изменения температуры от времени при влажностности $W=1,7\%$ торфа для схемы 2.7,А, когда образец торфа (травяно-сфагновый тип) частично в грунте, а частично находится на поверхности. Нумерация кривых на рисунке 2.10 соответствует нумерации на схеме 2.7,А. Фронт лесного пожара подходит слева, после чего происходит зажигание торфа и последующее распространение очага горения в горизонтальной и вертикальной плоскости. Нарастание температуры на границе ЛГМ-торф (термопара 3) идет с запаздыванием порядка 35 секунд от начала воздействия фронта горения. Изменение температуры, фиксируемое термопарами 4,5, в горизонтальном

направлении происходит с запаздыванием через 125 и 200 секунд соответственно. При этом скорость движения границы фронта пожара в горизонтальном направлении равна 1,5 мм/мин.

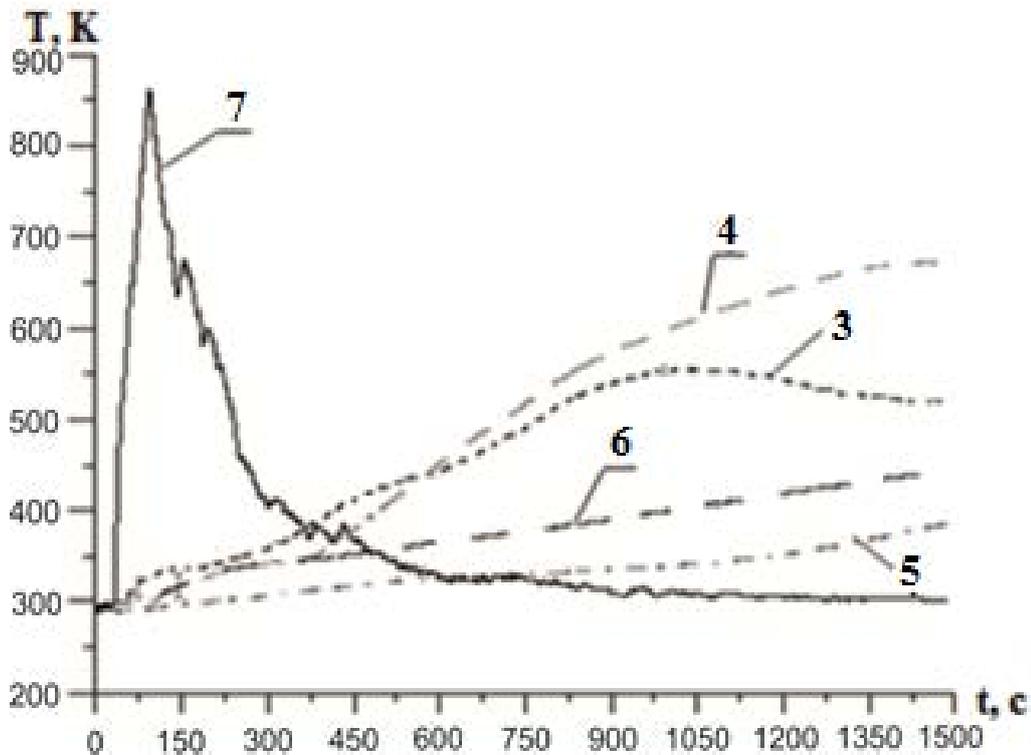


Рис. 2.11. Зависимости изменения температуры от времени для образцов с влажностью $W = 44 \%$: 3-изменение температуры на границе ЛГМ-торф; 4, 5, 6-изменение температуры в массе торфа; 7-кривая зависимости температуры в образце ЛГМ

Рисунок 2.11 характеризует изменение температуры от времени в случае, когда влажность образца торфа составляет 44 % (в соответствии со схемой 2.7,А). Нумерация кривых также соответствует нумерации на схеме 2.7,А. На графике хорошо видно, что переход горения от ЛГМ к торфу идет примерно за 80 секунд (кривая 3), что больше времени начала горения для образца с влажностью 1,7 %. По-видимому, это связано с процессом испарения воды в торфе, что отмечалось в работе [24]. Однако высокое влажностное содержание не повлияло на процесс заглужения фронта горения (кривая 5). Из анализа кривых, представленных на рис. 2.11, можно отметить, что фронт горения начинает

распространяться в вертикальной плоскости через 2 минуты от момента контакта факела пламени от ЛГМ с образцом, практически одновременно с изменением температуры на расстоянии $2 \cdot 10^{-2}$ м от границы ЛГМ-торф (кривая 4).

Графики зависимости изменения температуры от времени, когда фронт низового лесного пожара подходит к залегающему в грунте торфу (рис. 2.7,Б), представлены на рисунке 2.12 [102, 103]. Нумерация кривых на графике соответствует нумерации на схеме (рис. 2.7,Б).

Наличие нескольких термопар, как в приповерхностном слое образца, так и в его нижней части позволяло оценить направление распространения фронта горения, а также какова скорость горения по слою в верхней и нижней части массы торфа.

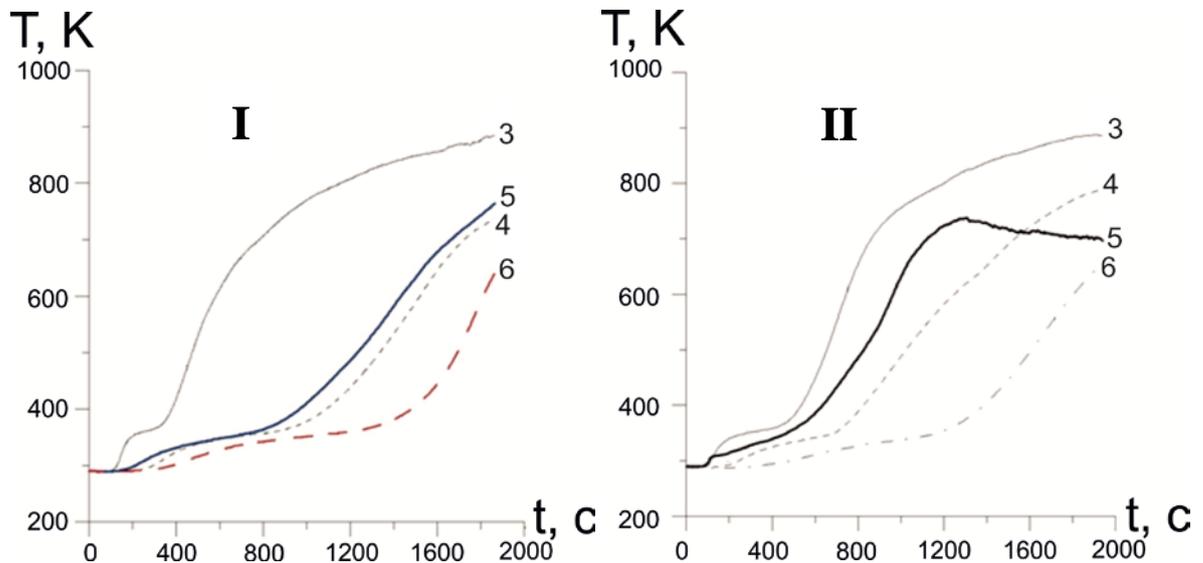


Рис. 2.12. Зависимость изменения температуры в слое торфа от времени (I – сосново-пушицевый вид торфа; II – травяно-сфагновый вид)

Наблюдается устойчивое воспламенение образца торфа, что фиксируется термопарой 3, находящейся непосредственно у его поверхности. При этом температура имеет максимальное значение в диапазоне 890 – 900 К. Следует отметить, что для травяно-сфагнового типа торфа, имеющего в своем составе преимущественно проводники горения (более 70 %, таблица 2.1), заглубление горения наступает раньше (кривая 4), чем в сосново-пушицевом. Кроме того, скорость движения фронта горения в горизонтальной плоскости по массе торфа

идет быстрее на 10 % также для травяно-сфагнового типа торфа (кривая 3 и 5). По-видимому, это связано с ботаническим составом и конфигурацией расположения компонентов, формирующих слой торфа.

На рисунке 2.13 приводится зависимость изменения температуры от времени для случая, когда очаг пожара инициировался непосредственно над залегающим торфом (рис. 2.7,С) [102].

Заглубление процесса горения первыми регистрировали термопары 3 и 6, находящиеся на границе ЛГМ-торф. Заглубление горения идет неравномерно по слою, что также объясняется влиянием ботанического состава и ориентацией положения проводников горения в их хаотичном распределении в торфе.

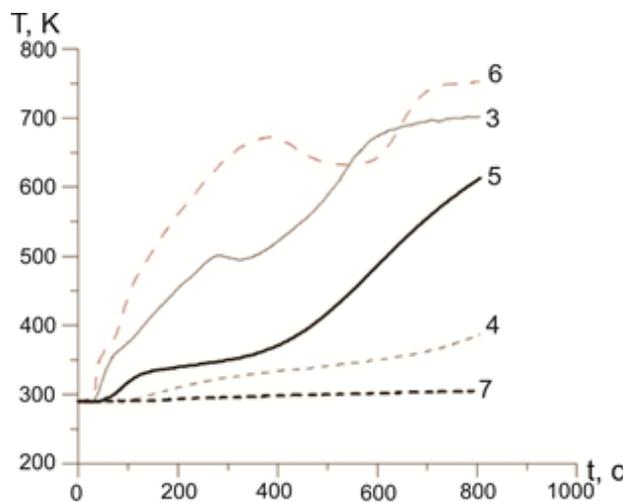


Рис. 2.13. Зависимость изменения температуры в слое торфа от времени. Расположение термопар соответствует схеме на рисунке 2.7,С

Полученные результаты по скорости горения торфа в горизонтальной и вертикальной плоскости в результате воздействия очага низового лесного пожара представлены в таблице 2.3 [103].

Таблица 2.3. Скорость горения исследуемых видов торфа

Вид торфа	W, %	v, мм/мин		
		По горизонтали	По вертикали	По диагонали
Сосново-пушицевый	1,7	1,5	1,1	1,2
Травяно-сфагновый	1,7	1,7	1,4	1,55

Следует отметить, что значения скорости распространения фронта горения в горизонтальном направлении для исследуемых видов торфа согласуются с работами [17, 24]. Из анализа значений таблицы 2.3 видно, что скорость горения по вертикали и диагонали у травяно-сфагнового вида торфа выше на 20 % и 22 % соответственно, чем у сосново-пушицевого.

Таким образом, на процесс заглубления фронта горения в массу торфа влияет его ботанический состав. Наличие проводников горения, и хаотичность их расположения способствует распространению горения, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости и влияет на направление движения фронта горения [98].

2.3. Моделирование зажигания торфа от низового лесного пожара

2.3.1. Постановка задачи

Решалась однотемпературная, одномерная, нестационарная задача, когда ось x направлена вертикально вниз, а начало координат выбирается на границе раздела слой торфа–атмосфера. Полагаем, что пожар на торфянике инициируется в результате зажигания от наземного очага горения, действие которого на слой торфа моделируется заданием температуры очага T_e и коэффициентов тепло- и массообмена α_e и β_e . Согласно [4], предполагаем, что в самом слое торфа имеют место испарение связанной воды, экзотермическая реакция горения коксика, а также гомогенные реакции пиролиза торфа и горение оксида углерода. Поэтому торф в процессе зажигания считался многофазной средой, состоящей из сухого органического вещества, гигроскопической воды, прочно связанной с этим органическим веществом [4], продукта пиролиза органического вещества –коксика, а также конденсированного и газообразного продуктов горения.

Был взят торф, у которого начальная объемная доля газовой фазы φ_{5H} ($0.1 < \varphi_{5H} < 0.2$) невелика по сравнению с объемными долями конденсированной фазы [13]. Для упрощения анализа процесс зажигания и тления торфа считались одномерными, а в результате зажигания торфа образуется фронт горения, который состоит из зон прогрева, сушки и пиролиза торфа, а также зон горения газообразных и конденсированных продуктов пиролиза с последующим образованием слоя пепла.

Математическая формулировка рассмотренной задачи представляет собой следующую систему уравнений [4]:

$$\frac{\partial \rho_5 \varphi_5}{\partial t} + \frac{\partial \rho_5 \varphi_5 v}{\partial z} = Q, \quad (2.1)$$

$$v = -\frac{\xi}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^4 c_{is} \rho_{is} \varphi_i \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_5 \varphi_5 c_{p5} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) =$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_1 r_1 + q_2 r_2 + q_{1s} R_{1s} - q_{2s} R_{2s} + q_{4s} R_{4s}, \quad (2.3)$$

$$\rho_5 \varphi_5 \left(\frac{\partial c_\alpha}{\partial t} + v \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) - c_\alpha Q + R_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.4)$$

$$\rho_{1s} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_{2s} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad (2.5)$$

$$\rho_{3s} \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - R_{3s} - \alpha_4 R_{3s}, \quad \rho_{4s} \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_4 R_{3s}, \quad (2.6)$$

$$P = \frac{\rho_s RT}{M}, \quad \sum_{\alpha=1}^N c_\alpha = 1, \quad \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i, \quad M^{-1} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{c_\alpha}{M_\alpha}.$$

С начальными и граничными условиями:

$$T_i \Big|_{t=0} = T_H, \quad i = 1, \dots, 4, \quad c_\alpha \Big|_{t=0} = c_{\alpha H}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1,$$

$$\rho_5 \Big|_{t=0} = \rho_{5H}, \quad \varphi_i \Big|_{t=0} = \varphi_{iH}, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (2.7)$$

$$\alpha_e (T_e - T_w) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (2.8)$$

Используя аналогию процессов тепло- и массообмена [13, 47] ($\beta_e = \alpha_e / c_{p5}$), имеем следующие граничные условия:

$$\beta_e (c_{\alpha,e} - c_{\alpha} \Big|_{z=0}) = \varphi_5 \rho_5 D_{\alpha} \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad P \Big|_{z=0} = P_e,$$

$$\frac{\partial c_{\alpha}}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \quad \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0. \quad (2.9)$$

В задаче было проанализировано зажигание и тление слоя торфа от наземного очага горения при различных внешних условиях [13]. Временем возникновения пожара на торфянике будем считать величину $t = t_*$, при которой для $T_{1w} \geq T_*$, скорость тления ω равна или превышает характерную величину ω_* , а температура поверхности торфа резко возрастает до $T_{1w} = 750$ К. $T_* = 650$ К и $\omega_* = 5 \cdot 10^{-6}$ м/с полагались известными из экспериментальных данных [17]. Если $\omega \leq \omega_*$ по глубине торфа, то считалось, что имеет место промежуточный режим, когда скорость тления на порядок больше скорости пиролиза. Если $T_{1w} < T_*$, то имеет место режим отсутствия тления реагента, при котором его скорость сравнима со скоростью пиролиза торфа.

Таблица 2.4. Время различных режимов тления торфа (t_* , ч)

	H_1 , м	0,5			0,25	
	α_e , Вт/(м ² ·К)	T_e , К			T_e , К	
H_2 , м		1100	1000	900	1100	1000
0,5	1,5	6,43	9,3	16,36	19,76 *	---
	1,25	8,85	12,52	41,64*	---	---
	1,0	13,27	24,57*	---	---	---
0,25	1,5	6,42	8,84	15,88	19,35*	---
	1,25	8,81	12,41	40,51*	---	---
	1,0	13,41	25,63*	---	---	---

Примечания: — - время пиролиза; * - время зажигания.

2.3.2. Методика расчета

Система уравнений (2.1)-(2.6) с начальными и граничными условиями (2.7)-(2.9) решалась при помощи итерационно-интерполяционного метода [49] с заданной точностью.

Теплофизические и термокинетические параметры торфа задавались с учетом данных работ [18, 24, 25, 32]. Результаты получены при следующих параметрах: $T_H = 293$ К, $T_* = 650$ К, $T_e = 800-1000$ К, $\omega = 10^{-5}$ м/с, $P_H = 1,013 \cdot 10^{-5}$ Н/м², $M_1 = 28$ кг/кмоль, $M_2 = 18$ кг/кмоль, $M_3 = 32$ кг/кмоль, $M_4 = 44$ кг/кмоль, $M_5 = 16$ кг/кмоль, $M_6 = 28$ кг/кмоль, $i = 1, 2$, $\alpha_e = 0,5-1,0$ Вт/(К·м²), $\mu_H = 1,81 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), $d_p = 10^{-6}$ м, $\rho_{1S} = 572-1180$ кг/м³, $\rho_{2S} = 1800$ кг/м³, $\rho_{3S} = 20$ кг/м³, $\rho_{4S} = 200$ кг/м³, $c_{1S} = 951$ Дж/(кг·К), $c_{2S} = 2100$ Дж/(кг·К), $c_{3S} = 1020$ Дж/(кг·К), $c_{4S} = 1200$ Дж/(кг·К), $d_p = 5 \cdot 10^{-6}$ м, $R = 8,314$ Дж/(моль·К), $\lambda_{1S} = 1,84$ Вт/(м·К), $\lambda_{2S} = 0,6$ Вт/(м·К), $\lambda_{3S} = 0,041$ Вт/(м·К), $\lambda_{4S} = 0,041$ Вт/(м·К), $A_S = 0,08$, $M_H = 100$ кг/кмоль, $M_C = 12$ кг/кмоль, $k_{1S} = 5 \cdot 10^3$ с⁻¹, $k_{2S} = 8 \cdot 10^3$ с⁻¹, $k_{3S} = 5 \cdot 10^3$ с⁻¹, $E_{1S} = 54,47$ кДж/моль, $E_{2S} = 16,76$ кДж/моль, $E_{3S} = 41,87$ кДж/моль, $q_{1S} = -10^4$ Дж/кг, $q_{2S} = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг, $q_{3S} = 5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $c_{1H} = 0,05$, $c_{2H} = 5 \cdot 10^{-5}$, $c_{3H} = 0,025-0,3$, $c_{4H} = 10^{-5}$, $c_{5H} = 0,2$, $c_{ae} = c_{aH}$, $\alpha = 1,2,4,5$, $s_2 = 0,08$, $s_3 = 0,05$, $c_{3e} = 10^{-3}$, $\varphi_{1H} = 0,5-0,7$, $\varphi_{2H} = 0,1-0,4$, $\varphi_{3H} = 10^{-4}$, $\varphi_{4H} = 10^{-5}$, $\alpha_4 = 0,7$, $\eta_1 = 0,2$, $\eta_2 = 0,02$, $\eta_4 = 0,3$.

2.3.3. Результаты численного решения и их анализ

В таблице 2.3 приведено время зажигания и пиролиза торфа при различных температурах очага горения T_e , коэффициенте теплообмена α_e , а также ρ_{1S} , φ_{1H} ,

φ_{2H} для $c_{3H} = 0,23$, значений плотности $\sum_{i=1}^4 \rho_{is} \varphi_{iH} = 1006 \text{ кг/м}^3$ и входных данных, взятых из [13]. Видно, что с увеличением количества влаги и с уменьшением плотности торфа ρ_{1s} , время зажигания увеличивается [93]. Этот результат связан, с одной стороны, с превышением теплоотвода за счет испарения влаги над теплоприходом от экзотермической реакции окисления оксида углерода, с другой - с наличием в порах воздуха, который снижает эффективный коэффициент теплопроводности и увеличивает время прогрева образцов. В результате при $800 \text{ К} \leq T_e \leq 900 \text{ К}$, $\alpha_e \leq 0,75 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, $\varphi_{2H} = 0.3 - 0.4$ зажигание реагента не происходит, а скорости тления образцов по порядку величины сравнимы со скоростью пиролиза торфа. Это объясняется уменьшением интенсивности воздействия внешнего очага горения, а также увеличением затрат энергии, связанных с испарением воды в торфе [93].

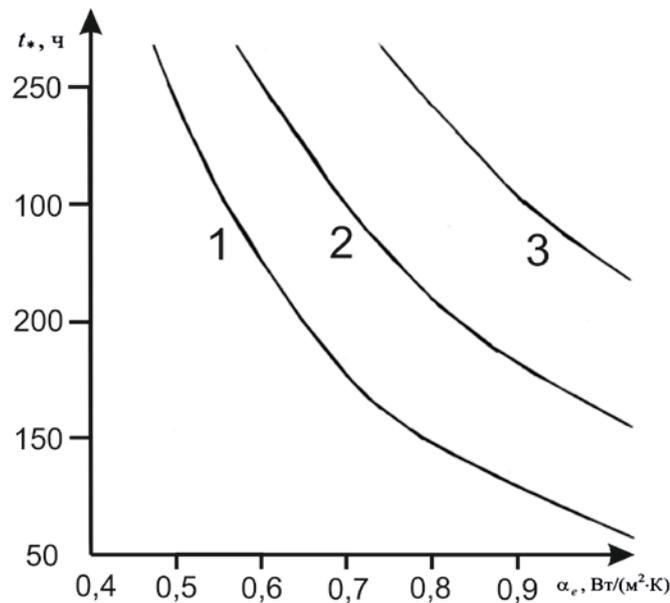


Рис. 2.16. Зависимость времени зажигания торфа от коэффициента теплообмена для внешнего источника с температурой $T_e = 1000 \text{ К}$ (кривая 1), 900 К (кривая 2), 800 К (кривая 3)

На рис. 2.16 представлено изменение времени зажигания торфа в зависимости от коэффициента теплообмена при $\varphi_{1H} = 0,7$, $\varphi_{2H} = 0,2$, $\rho_{1s} = 750 \text{ кг/}$

м^3 , $c_{3H} = 0,23$ и входных данных из [13]. В результате анализа численного решения можно сделать вывод, что с увеличением интенсивности внешнего воздействия (T_e, α_e) время зажигания сокращается. При уменьшении величины коэффициента теплообмена до $\alpha_e < 1 \text{ Вт/ (м}^2 \cdot \text{К)}$ для $900 \text{ К} \leq T_e \leq 1000 \text{ К}$ скорость тления не превышает скорости пиролиза торфа [93]. Это связано как с уменьшением массообмена с внешней средой (недостаточно кислорода в порах реагента), так и с ростом теплоотвода во внешнюю среду, который становится большим и превышает теплоприход от экзотермической реакции окисления оксида углерода. Подобный эффект отсутствия тления торфа наблюдается, если начальная концентрация кислорода в порах реагента мала ($c_{3H} < 0,05$) при $T_e \leq 900 \text{ К}$ и $\alpha_e \leq 1,5 \text{ Вт/ (м}^2 \cdot \text{К)}$.

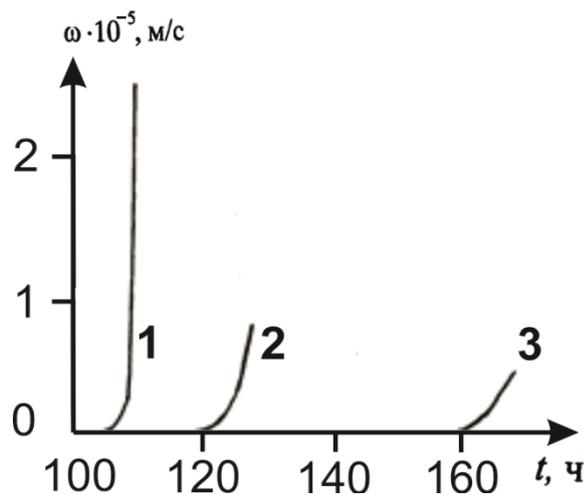


Рис. 2.17. Зависимость линейной скорости тления торфа от времени: 1 – $c_{3H} = 0,23$; 2 – $c_{3H} = 0,05$; 3 – $c_{3H} = 0,025$

На рис. 2.17 представлена величина линейной скорости процесса тления торфа от времени для $\varphi_{1H} = 0,7$, $\varphi_{2H} = 0,2$, $\rho_{1s} = 923 \text{ кг/м}^3$, $T_e = 900 \text{ К}$, $\alpha_e = 1 \text{ Вт/ (м}^2 \cdot \text{К)}$. Кривая 1 отвечает начальной концентрации кислорода $c_{3H} = 0,23$; 2 – $c_{3H} = 0,05$; 3 – $c_{3H} = 0,025$. Видно, что при уменьшении концентрации кислорода c_{3H} в воздухе с 0,23 до 0,05 и 0,025 время зажигания реагента увеличивается до $t_{*1} = 109$, $t_{*2} = 125$, $t_{*3} = 167$, что обусловлено влиянием начального содержания

окислителя в порах на процесс тления торфа. Этот результат качественно согласуется с экспериментальными данными [55], где одним из способов борьбы с пожарами на торфяниках был предложен метод, основанный на изоляции очагов горения от окружающего воздуха. При этом среднее значение скорости тления торфа (рис. 2.17) по порядку величины согласуется с экспериментальными данными [17, 24, 55].

Кроме того, представляет интерес исследование влияния зависимости скорости процесса тления торфа от содержания в нем начальных объемных долей и влаги (φ_{iH} , $i = 1, 2$) [93]. С уменьшением объемной доли влаги с $\varphi_{2H} = 0,3$ до 0,2 и 0,1 для значения $\varphi_{1H} = 0,6$ имеет место снижение времени зажигания $t_{*1} = 209$, $t_{*2} = 112$, $t_{*3} = 29$, что связано, в основном, с затратами тепла на испарение связанной воды в торфе. С уменьшением запаса начального значения исходного проницаемого реагента от $\varphi_{1H} = 0,7$ до 0,6 и 0,5 для значения влаги $\varphi_{2H} = 0,2$ время зажигания увеличивается: $t_{*3} = 109$, $t_{*4} = 120$, $t_{*5} = 194$, что связано с ростом пористости торфа – наличием воздуха, который снижает эффективный коэффициент теплопроводности и увеличивает время прогрева образцов. Этот результат качественно согласуется с экспериментальными данными [24].

2.4. Выводы

1. Экспериментально определено распространение фронта горения сосново-пушицевого и травяно-сфагнового типа торфа при различном расположении очага горения низового лесного пожара.

2. Экспериментально установлено влияние ботанического состава торфа на механизм заглублиения фронта горения в его массу.

3. Определено, что скорость горения по вертикали $v_{верт} = 1,4$ мм/мин и диагонали $v_{диаг} = 1,55$ мм/мин у травяно-сфагнового вида торфа, имеющего в

своем составе преимущественно проводники горения (более 70 %), выше, чем у сосново-пушицевого на 20 % и 22 % соответственно.

4. Численно решена одномерная задача о зажигании торфяника в результате воздействия очага горения. Отмечено, что с ростом влагосодержания и пористости торфа, а также в случае снижения концентрации кислорода в воздухе время зажигания увеличивается. Результаты расчетов по величине скорости тления имеют удовлетворительное согласование с известными экспериментальными данными.

ГЛАВА 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДЕЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПОЖАРА НА ОБРАЗЦЫ ДРЕВЕСИНЫ

3.1. Экспериментальные исследования воздействия очага горения на образцы древесины с помощью термопарного метода

Во многих случаях результатом действия природных пожаров является воспламенение с последующим горением деревянных строений в населенных пунктах. Несмотря на все принимаемые меры, природные пожары наносят огромный ущерб инфраструктуре района, подверженного воздействию огненной стихии.

Многочисленные теоретические [54, 71, 76] и экспериментальные исследования [103, 104-110] по изучению влияния пожаров не дают ответа на механизм перехода пожара на деревянные конструкции, их зажигание и последующего горения. Согласно [64, 65] древесина представляет собой пористую реакционноспособную среду, физико-химические свойства которой изменяются при нагревании и горении.

В связи с этим представляет интерес теоретико-экспериментальные исследования по зажиганию деревянных конструкций [111]. Результаты исследования воспламеняемости образцов древесины могут быть использованы для уточнения общих противопожарных требований при застройке, а также при разработке способов и устройств по локализации и тушению природных пожаров [112]. Теоретические исследования базируются на моделях реагирующих сред [47] с использованием экспериментальных данных. Эксперимент направлен на изучение в лабораторных условиях зажигания образцов древесины различной формы в результате воздействия фронта лесного пожара для установления характеристик воспламенения и горения, а также установления теплонапряженных участков на испытываемых образцах с помощью термопарного метода и методов ИК-диагностики.

3.1.1. Методика эксперимента

Для комплексного подхода к решению вопроса по воздействию природных пожаров на деревянные конструкции проводились экспериментальные исследования [111]. Схема эксперимента приведена на рисунке 3.1.

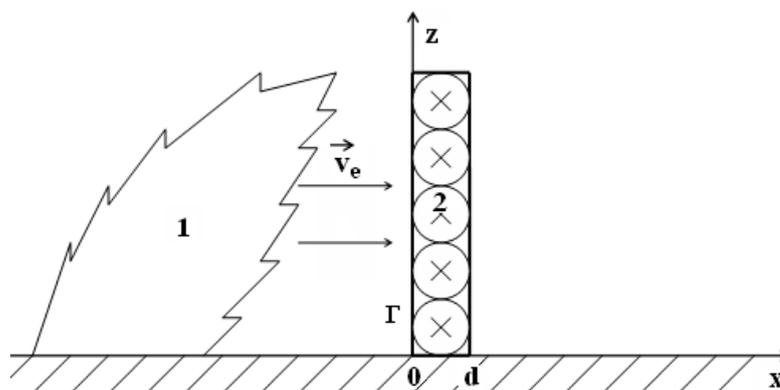


Рис. 3.1. Схема проведения эксперимента: 1 – фронт низового лесного пожара, 2 – образец древесины

За основу была взята модель низового лесного пожара слабой интенсивности, как наиболее распространенные в природных условиях, моделирование которого в лабораторных условиях не представляло существенных технических затрат.

Для изучения использовался испытательный комплекс по исследованию лесных, степных и торфяных пожаров [92]. Для регистрации входных значений, поступающих с термопар, использовалась автоматизированная система сбора и регистрации данных. Погрешность измерения термопар составила 1,5 %. Влажность образцов контролировалась с помощью анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0,01 %, масса образцов – электронными весами AND HL-400.

В качестве образцов использовались сосна и береза. Они представляли собой плоские и оцилиндрованные заготовки, имитирующие конструкцию стены деревянного строения (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Образцы древесины до эксперимента

Термопары зачеканивались в нескольких точках, что позволяло снимать температурные показания практически со всей поверхности образцов (рис. 3.3).

Слой лесного горючего материала (ЛГМ) укладывался вплотную перед образцом древесины, установленным на грунт так, чтобы исключить захлестывание пламени снизу. Размеры площадки ЛГМ и образцов представлены на рисунке 3.3.

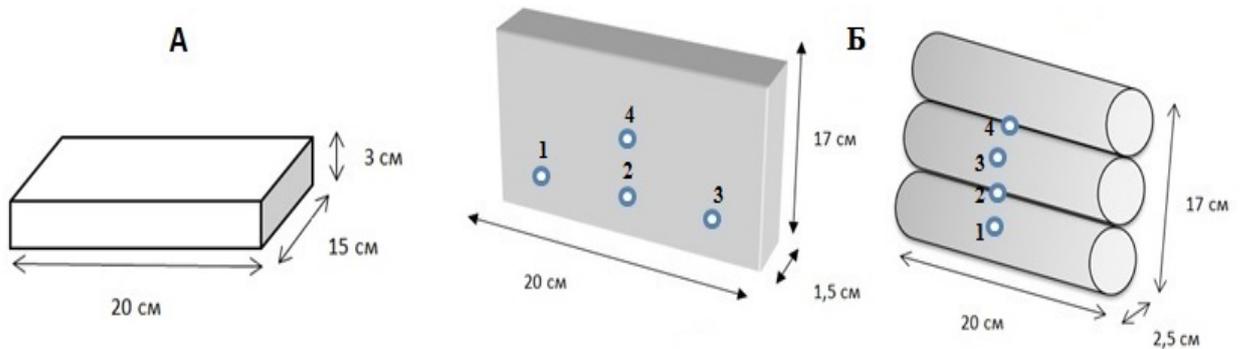


Рис. 3.3. Размеры площадки ЛГМ (А) и испытуемых образцов древесины (Б); 1 – 4 – размещение термопар в образцах

Все образцы предварительно высушивались в сушильном шкафу ШСП 0,5-200 при температуре 100°C . В качестве очага горения, моделирующего низовой лесной пожар, использовалась хвоя сосны. Во время экспериментов влагосодержание древесины составило 4,5 % (береза) и 5,8 % (сосна), слоя ЛГМ – 6,5 %. Плотность древесины $\rho_1 = 640 \text{ кг/м}^3$ (береза), $\rho_2 = 520 \text{ кг/м}^3$ (сосна).

Для действия ветра на ЛГМ использовался вентилятор. Скорость потока воздуха определялась с помощью анемометра CFM Master 8901 с погрешностью измерения 2 % и была перпендикулярна подверженной воздействию очага горения поверхности образцов древесины. Эксперименты проводились как без ветра, так и при ветре, скорость которого имела значение $1 \leq v_g \leq 3 \text{ м/с}$. Вентилятор включался сразу после зажигания слоя ЛГМ, а выключался одновременно с регистрируемой аппаратурой. Тепловой поток q измерялся экспоненциальным методом [113] с помощью датчика теплового потока с погрешностью не более $\pm 6\%$.

Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали $\delta W/W \cdot 100\% \leq 3,3\%$, $\delta m/m \cdot 100\% \leq 1,5\%$, $\delta T/T \cdot 100\% \leq 2,5\%$.

Исследования проводились в следующей последовательности: слой ЛГМ поджигался с помощью локального источника зажигания, представляющего собой спираль накаливания, и воздействовал на образец древесины.

3.1.2. Результаты исследования воздействия очага горения на древесину

Результаты экспериментальных исследований воздействия низового лесного пожара на плоские образцы древесины из березы представлены на рисунке 3.4 [114].

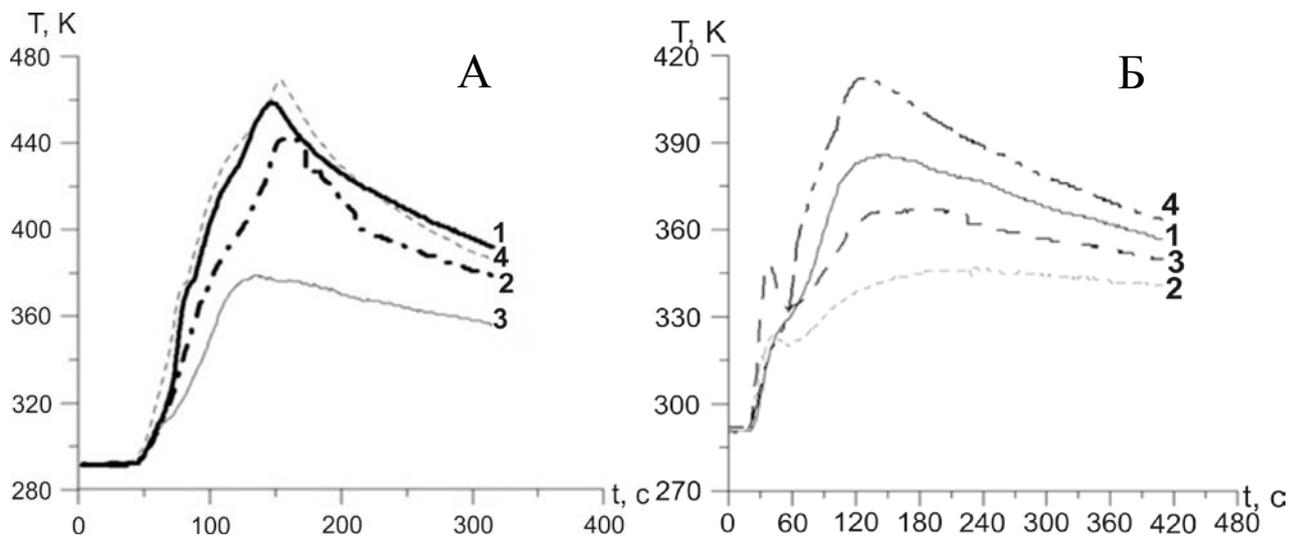


Рис. 3.4. Зависимости изменения температуры от времени у поверхности (А – в отсутствии ветра, Б – скорость ветра 3 м/с) плоских деревянных образцов из березы

Видно, что термопары 1-4 практически одновременно начинают регистрировать увеличение после 50 секунд с начала воздействия очага горения на образец. При этом первой регистрировала температуру термопара 4, находящаяся в центральной части образца. Затем через 5-7 секунд термопары 1-3 начинают одновременно регистрировать возрастание температуры. При выбранном запасе ЛГМ имело место частичное обугливание образца древесины. Термопара 4 регистрировала наибольшую температуру в диапазоне 460-470 К, а наибольшие показания термопар 1-3, находящихся в нижней части образцы древесины, были в диапазоне 430-450 К. Термопара 3, не смотря на то, что она находилась на одном уровне с термопарами 1, 2, имела более низкие температуры, что, по видимому, связано с пульсациями факела пламени.

На рисунке 3.4,Б отмечается изменение температуры на поверхности плоского образца древесины (береза) при действии воздушного потока. Видно, что максимума температура достигает в течение 110 секунд. Следует отметить, что в интервале 50-80 с поток воздуха сбивал пламя, действующее на образцы древесины, что отражалось на показаниях термопар.

Экспериментально установлено, что наличие воздушного потока $1 \leq v_g \leq 3$ м/с не позволяло воспламенить образец, причем наибольшему нагреву

подвергалась центральная часть образца, где температура принимала значения 440-450 К, фиксируемые термопарой 4, минимальное значение температуры в 360 К отмечается термопарой 2. Надо отметить, что воздействие воздушного потока на факел пламени приводило к тому, что пламя охватывало образец древесины по боковым поверхностям, в результате чего они обугливались.

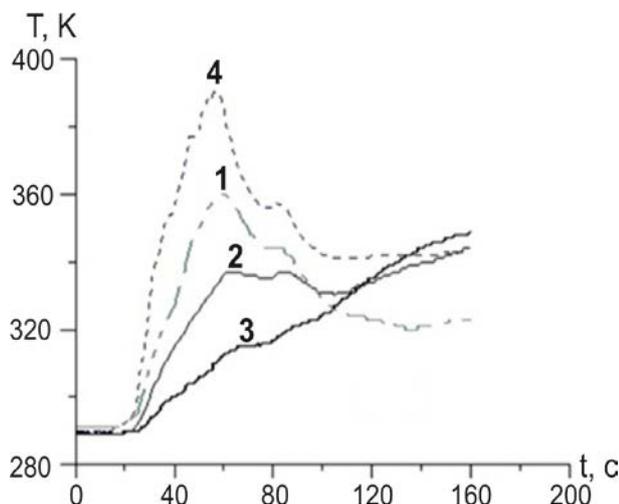


Рис. 3.5. Зависимость изменения температуры от времени на поверхности плоских деревянных образцов из сосны

На рисунке 3.5 представлено изменение температуры у поверхности образца из сосны. В случае с отсутствием ветра, имело место аналогичная картина распределения поля температуры, что и для березы (рис. 3.4А). Первыми начинают регистрировать термопара 2 и 4 (обе термопары расположены в центральной части образца), причем наибольшие значения фиксирует термопара 4 (390 К), находящаяся над термопарой 2 в центре образца. Термопара 2 регистрировала максимальное значение температуры в 360 К. Термопары 1, 3, располагающиеся слева и справа в нижней части образца, начинают регистрировать изменение температуры через 5-7 секунд после термопар 2 и 4, что также возможно связано с пульсациями факела пламени.

В результате проведенных экспериментов по воздействию очага горения модельного низового лесного пожара слабой интенсивности на плоские образцы древесины из березы и сосны следует отметить, что в условиях отсутствия ветра воздействию пожара в большей степени подвержена центральная часть, о чем свидетельствуют показания термопар в центре образца. Низкое влагосодержание

ЛГМ приводит к тому, что процесс горения протекает очень активно и быстро прекращается, воздействие теплового потока непродолжительно по времени, что не позволяет на поверхности образца достичь температуры воспламенения.



Рис. 3.6. Фотография образца древесины после проведения эксперимента (береза, скорость ветра 3 м/с)

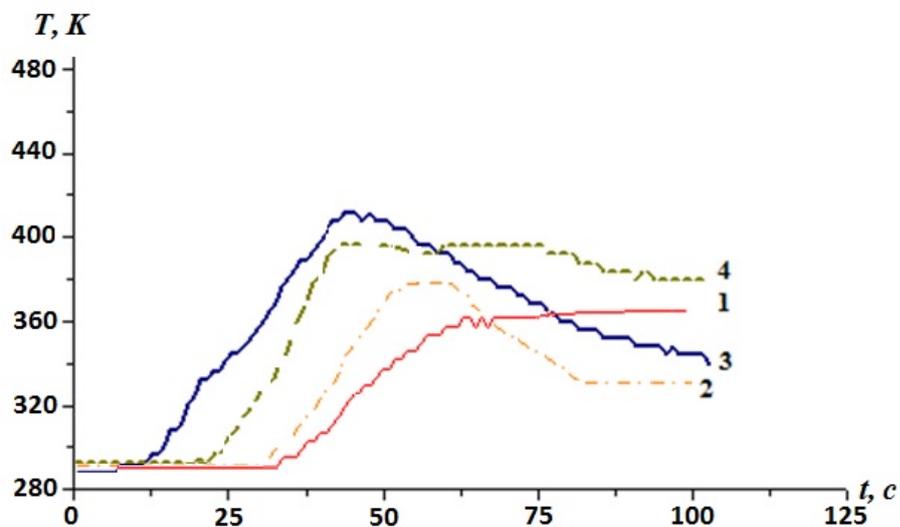


Рис. 3.7. Зависимость изменения температуры в приповерхностном слое модели из оцилиндрованного бруса из березы; 1-4 – расположение термопар

Как показывают кривые на рисунке 3.7, в случае воздействия фронта низового лесного пожара на образец древесины из оцилиндрованного бруса, вначале нагреваются выпуклые участки испытываемой модели (термопары 1,3), после чего происходит активный нагрев стыков между брусками [115].

Кроме того, представляет интерес оценка скорости обугливания образцов древесины. В случае плоских образцов из березы скорость обугливания вдоль волокон при воздействии очага горения низового лесного пожара составила 0,14 мм/мин, что согласуется с работой [67], в которой оценивалась средняя скорость обугливания древесины в зависимости от интенсивности внешнего теплового потока. Скорость обугливания вдоль волокон плоских образцов из сосны составила в экспериментах 0,21 мм/мин. При воздействии пламени перпендикулярно волокнам отмечается потемнение поверхности образца.

3.2. Исследование воздействия очага горения на образцы древесины с помощью методов ИК-диагностики

Термография является одним из методов анализа пространственного и временного распределения тепловой энергии, сопровождающимся, как правило, построением тепловых изображений (термограмм) [116]. Таким образом, инфракрасная (ИК) термография осуществляется путем анализа теплового излучения объектов.

Инфракрасную область света условно разделяют на: близкую (0,760÷2,5 мкм), среднюю (2,5÷50 мкм) и дальнюю (50÷2000 мкм).

В основе тепловизионного метода контроля заложен принцип, заключающийся в том, что все процессы, которые происходят в природе и человеческой деятельности, сопровождаются поглощением и выделением тепла, изменяя внутреннюю энергию тела, которая в состоянии термодинамического равновесия пропорциональна температуре вещества. В результате этого процесса поверхности физических тел или объектов контроля приобретают специфическое температурное распределение, испуская при этом электромагнитное излучение, называемое инфракрасным излучением. Спектр, мощность и пространственные характеристики такого излучения зависят в основном от температуры тела и его излучательной способности (степени черноты) [116].

К основным энергетическим величинам, используемым в теории ИК излучения, относится мощность излучения, энергия излучения (лучистая энергия), а также энергетическая яркость [116].

Сейчас ИК метод наряду с методами теплового неразрушающего контроля, не нарушающими целостности контролируемых объектов, представляет высокотехнологическую область прикладных исследований, которая объединяет достижения в теории теплопередачи, ИК технологии и компьютерной обработки экспериментальных данных [116].

В настоящее время при исследовании процессов горения и природных пожаров активно применяются современные методы инфракрасной (ИК) диагностики [116]. При моделировании процессов горения в лабораторных условиях достаточно использовать контактные методы для регистрации температуры, однако в натуральных условиях необходимо большое количество термопар для регистрации полей температур, что вызывает трудности при обработке результатов. В работе [117] отмечаются недостатки, свойственные контактными методами измерений применительно к изучению процессов горения:

1. учет инерционности даже при малых диаметрах спая;
2. внесение возмущения в структуру течения пламени;
3. необходимость учитывать сток тепла по свободным концам термопары;
4. низкое пространственное и временное разрешение.

Основное преимущество ИК-диагностики с применением тепловизионного оборудования заключается в высоком пространственном и временном разрешении [117]. Однако при использовании метода ИК-диагностики необходим учет спектра излучения исследуемого объекта [118, 119], выбор подходящего спектрального интервала [120], калибровка камеры тепловизора а также использование специальных пакетов для обработки данных.

Следует отметить, что в настоящее время применение тепловизионного оборудования при исследовании природных пожаров не сильно распространено, поскольку данное явление зависит от большого числа параметров и требует детального изучения таких свойств как коэффициент излучения. Кроме того

сложность исследуемого объекта предполагает использование специальных научных тепловизоров, что связано с большими денежными затратами. Не смотря на это, ввиду перспективности данного способа в исследовании характеристик фронта горения и установлении теплонапряженных участков объектов, на которые воздействует фронт пожара, можно отметить работы [59, 81, 117-120] где исследуются характеристики лесного пожара в среднем ИК-диапазоне длин волн, а в работах [121-123] приводятся результаты для спектральных интервалов 7,5-13 мкм.

Таким образом, представляет интерес изучение в лабораторных и натуральных условиях зажигания деревянных конструкций при воздействии на них очагов горения для определения вероятности воспламенения, а также нахождения теплонапряженных участков на поверхности образцов с применением методов ИК-диагностики.

3.2.1. Методика проведения эксперимента

В инфракрасной области характеристики фронта горения регистрировались с помощью тепловизора JADE J530SB с узкополосным дисперсионным оптическим фильтром со спектральным интервалом 2,5 – 2,7 мкм, позволяющим измерять температуру в диапазоне 583-1773 К с погрешностью, не превышающей 1 %. Технические данные тепловизора позволили регистрировать пламя с частотой 50 кадров в секунду. Съемка производилась с расстояния 2 м и была направлена на определение температуры на поверхности деревянных образцов при воздействии очага горения. При измерениях использовали калибровки завода-изготовителя для выбранного типа объектива и фильтра. Объектив имел фокусное расстояние $F=50$ мм, а матрица тепловизора имела разрешение 320×240 пикселей. Частота дискретизации по времени составляла 50 Гц. При такой геометрии эксперимента и выбранных оптических характеристик тепловизора (спектральный интервал 2,5-2,7 мкм выбирался в соответствии с рекомендациями работы [117])

пространственное разрешение было значительно меньше 1 мм, а программное обеспечение по работе с тепловизором позволяет с точностью до 1 мм определять размеры исследуемого объекта.

В экспериментах фронт низового лесного пожара моделировался с использованием степного горючего материала (СГМ), представляющего собой побеги злаков (пырей, типчак и др. травы) [124]. Плотность слоя составляла $\rho = 55,5 \text{ кг/м}^3$. Параметры образцов древесины, их размеры, влагосодержание, плотность и масса были те же, что описаны в методике проведения эксперимента с применением термопарного метода.

Масса степного горючего материала $M_{СГМ} = 50 \text{ г.}$, влагосодержание $W_{СГМ} = 4,5 \%$, температура окружающего воздуха $T_H = 20^0 \text{ С.}$

На рисунке 3.8 представлена схема проведения эксперимента:

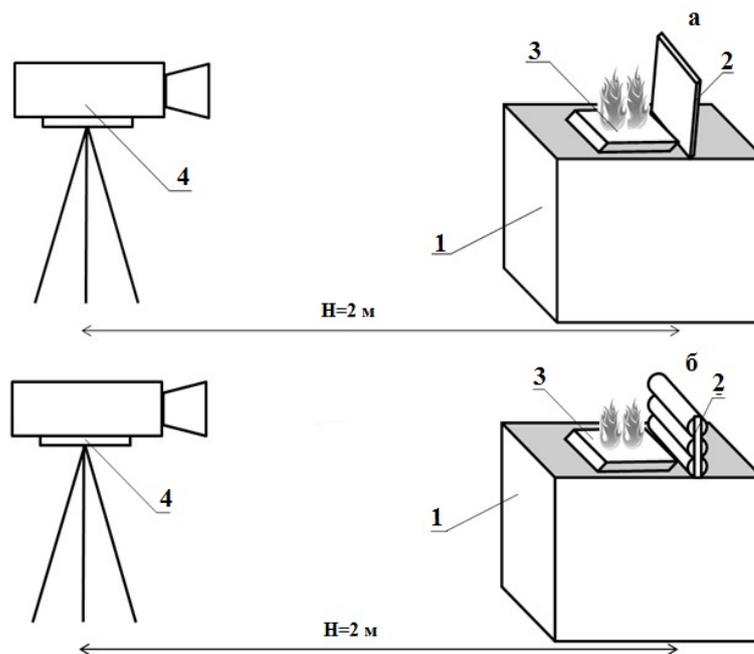


Рис. 3.8. Схема проведения эксперимента и используемое оборудование: 1 – экспериментальная площадка; 2 – слой СГМ; 3 – образец древесины (а – плоский образец, б – оцилиндрованный образец); 4 – тепловизор JADE J530SB

В качестве очага горения использовался модельный степной пожар слабой интенсивности 3 (высота факела не превышала $h_{II} \leq 15 \text{ см}$, что в соответствии с классификацией означает слабый низовой пожар), который воздействовал на образец древесины 2, установленный вертикально. Поджиг СГМ осуществлялся с

помощью спирали накаливания. На рисунке 3.9 изображена экспериментальная площадка.

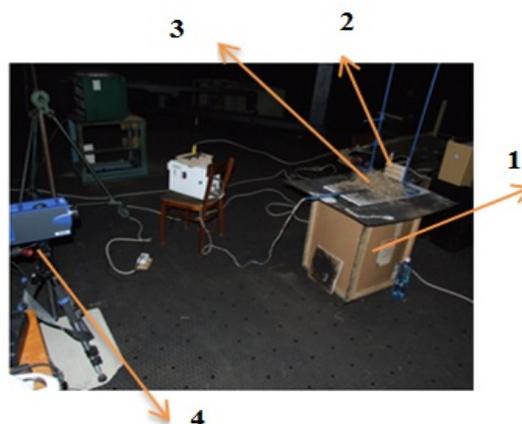


Рис. 3.9. Фото экспериментальной площадки

Съемка тепловизором начиналась в момент зажигания слоя СГМ и регистрировала не только развитие горения, но и непосредственно поверхность образца древесины после того как слой СГМ прогорал и переставал экранировать. В отличие от термопарного метода, в данном случае мы можем говорить именно о температуре на поверхности, в то время как термопарный метод ограничен условиями внедрения термопар в образцы древесины (дает некоторую погрешность, связанную с необходимостью внедрять термопары в образец древесины у поверхности). Под воспламенением понималось появление пламени на поверхности образца древесины.

Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали $\delta W / W \cdot 100\% \leq 3\%$, $\delta m / m \cdot 100\% \leq 1,5\%$, $\delta T / T \cdot 100\% \leq 4\%$.

3.2.2. Результаты экспериментов

Для того чтобы оценить воздействие очага горения на образцы древесины методом ИК-диагностики, с помощью программного обеспечения Altair по работе с тепловизором выбиралась область 1 на поверхности деревянных образцов и строился график зависимости изменения температуры по времени эксперимента (рис. 3.10) [125].

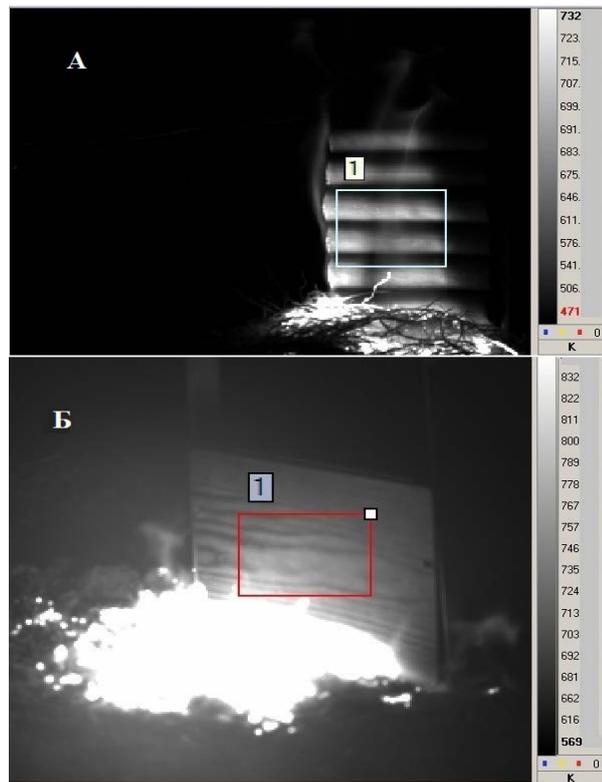


Рис. 3.10. Термограмма эксперимента по воздействию очага горения на образцы древесины: А – оцилиндрованный образец; Б – плоский образец

Программное обеспечение Altair позволяет построить график распределения максимальной, минимальной и средней температуры в выбранной области (в данном случае область 1) по времени эксперимента. На рисунке 3.11 представлена типичная зависимость изменения температуры в области 1 по времени эксперимента для оцилиндрованного образца древесины.

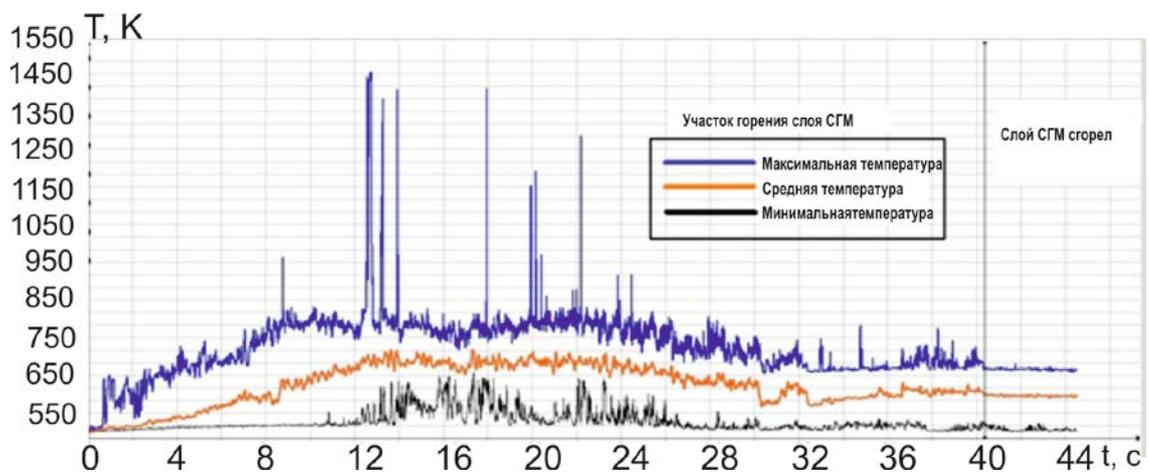


Рис. 3.11. График зависимости максимальной, минимальной и средней температуры от времени в области 1 для оцилиндрованного образца

Для того, чтобы уменьшить массив данных на рисунке 3.12, кривая зависимости максимальной и минимальной температуры от времени отбрасывалась, анализировалась средняя температура в области 1 для плоского и оцилиндрованного образца древесины.

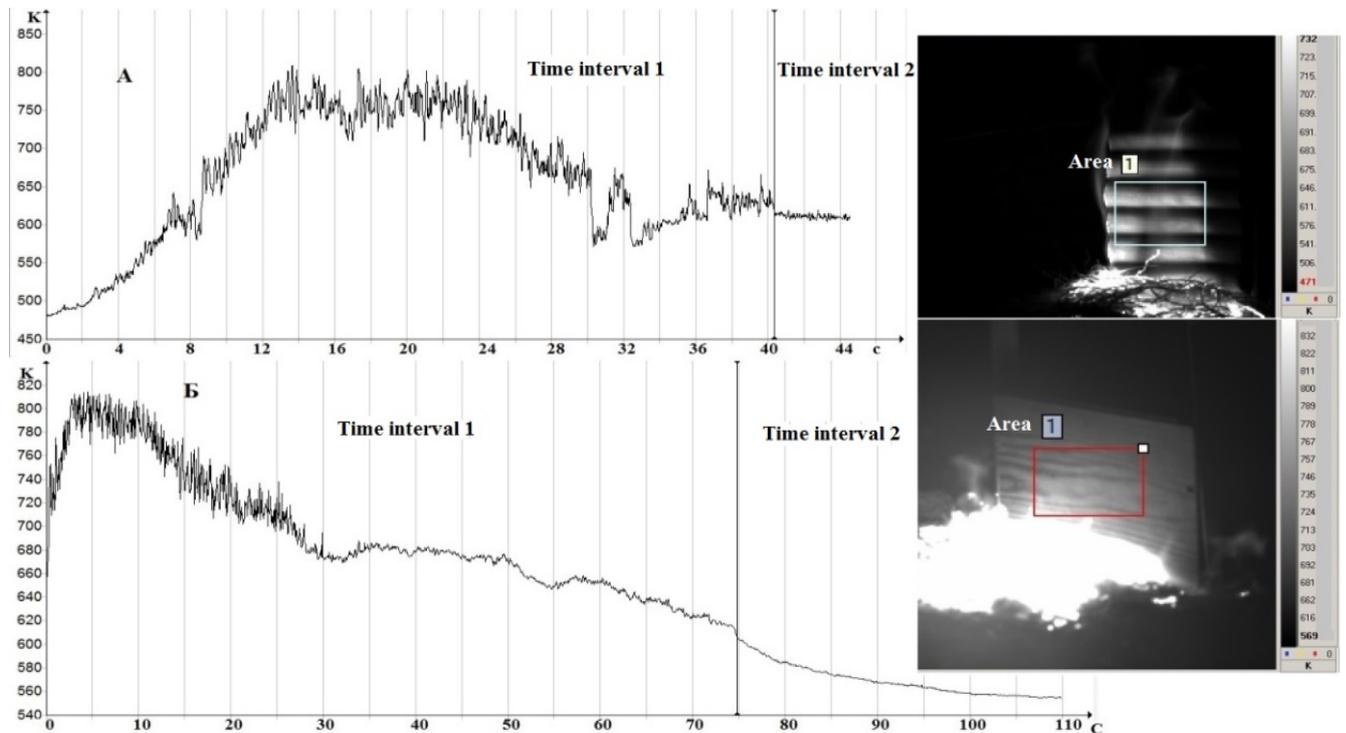


Рис. 3.12. Типичная термограмма изменения температуры от времени в выбранной области на поверхности испытуемых образцов: А – оцилиндрованный образец; Б – плоский образец

Графики на рисунке 3.12 отражают изменение средней температуры (осреднение автоматически производилось при помощи программного обеспечения Altair) во времени всего эксперимента, включая процесс развития горения слоя СГМ. Отбросив временной отрезок 1 на рис. 3.12, когда в пламенном режиме сгорал слой СГМ, тем самым экранируя интересующую нас поверхность деревянного образца в области 1, были получены графики изменения температуры на поверхности образца в области 1 после воздействия на них очага горения (рисунок 3.13).

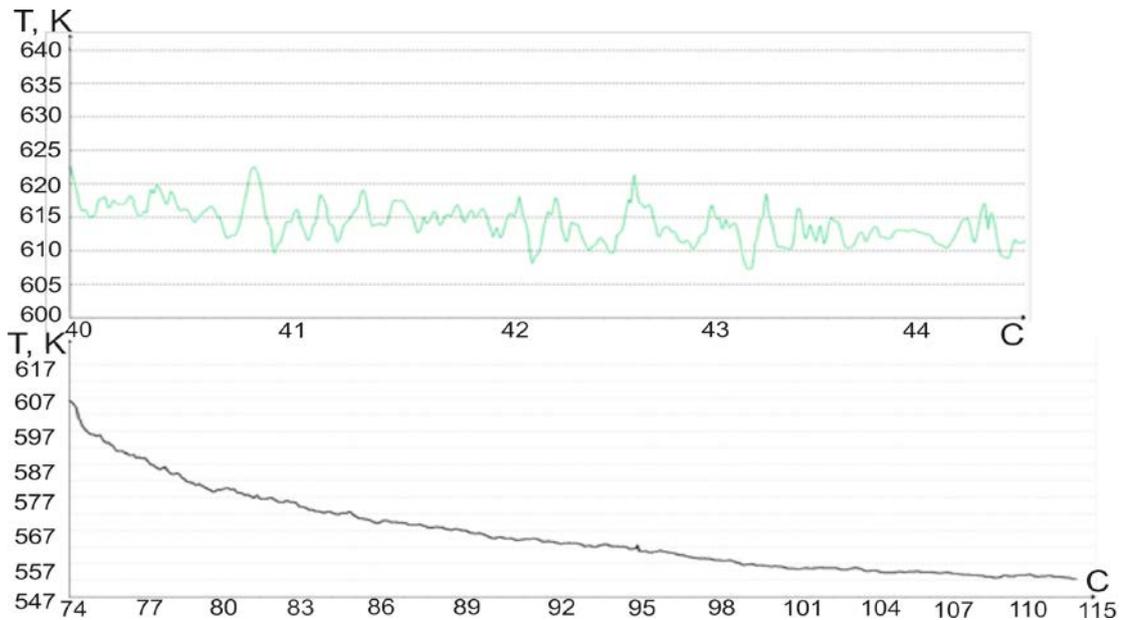


Рис. 3.13. Зависимость изменения средней температуры от времени в области 1 после воздействия очага горения СГМ

Температура на поверхности плоских образцов достигает 600-610 К. При выбранных условиях эксперимента (масса СГМ, влагосодержание образцов древесины) воспламенения не наблюдалось, образец достаточно сильно обуглился, происходило активное образование дыма, без зажигания (рис. 3.14) [126].



Рис. 3.14. Фотография плоских образцов древесины после проведения эксперимента

Температура на поверхности оцилиндрованных образцов древесины находится в диапазоне $600 \leq T_2 \leq 620$ К. Следует отметить, что в данном случае при таких-же условиях и параметрах эксперимента образцы воспламенялись, наблюдалось устойчивое горение по поверхности (рис. 3.15)[126].



Рис. 3.15. Фотография оцилиндрованных образцов древесины после проведения эксперимента

На рисунке 3.16 представлена термограмма воздействия очага горения на образцы древесины в момент времени, когда большая часть слоя горючего материала сгорела и пламя от него не экранировала поверхность исследуемых образцов древесины. В этой области на поверхности образца расположены экспериментальные точки: слева – точки 1-6, расположенные по краям, справа – точки 1-5, расположенные в центре образца.

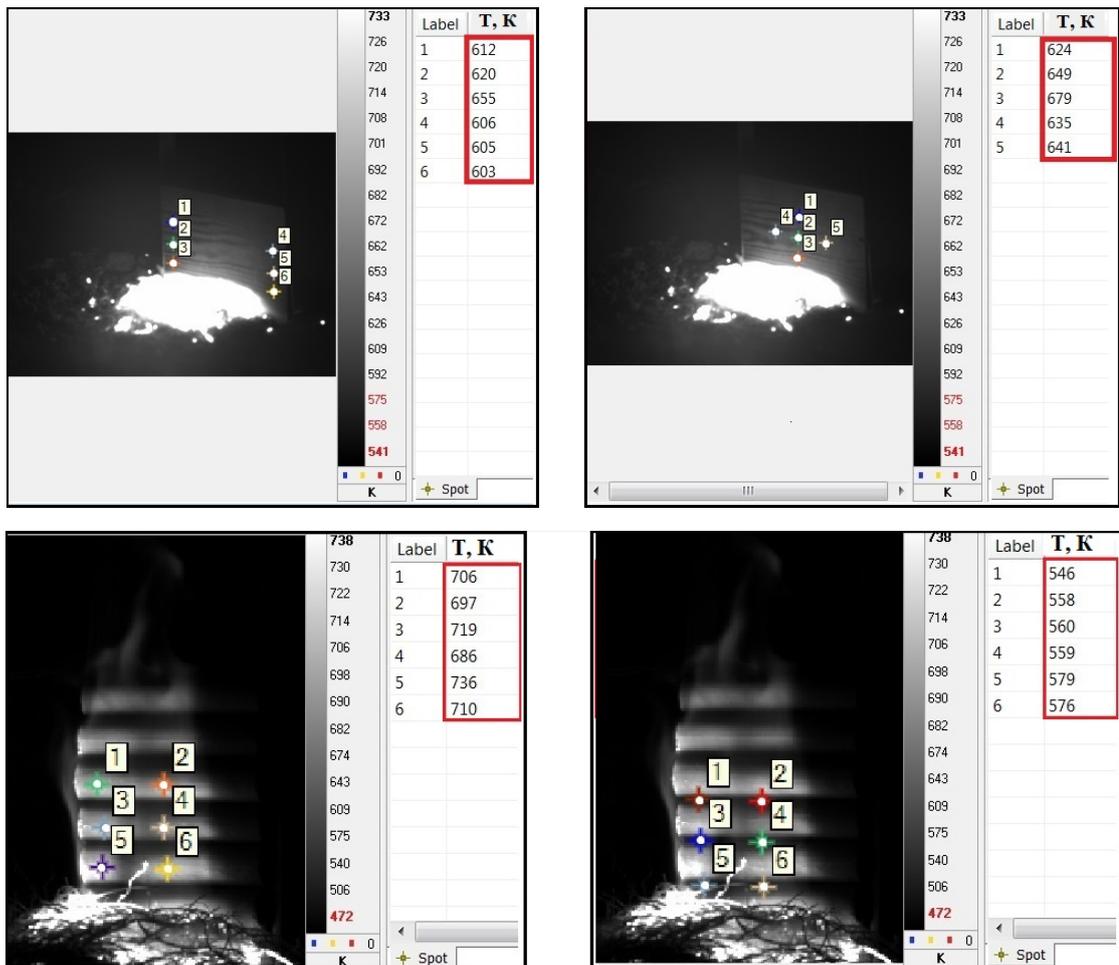


Рис. 3.16. Исследуемые участки на поверхности деревянных образцов

Также были зафиксированы участки наибольшего и наименьшего нагрева деревянных образцов при воздействии на них очага горения [127].

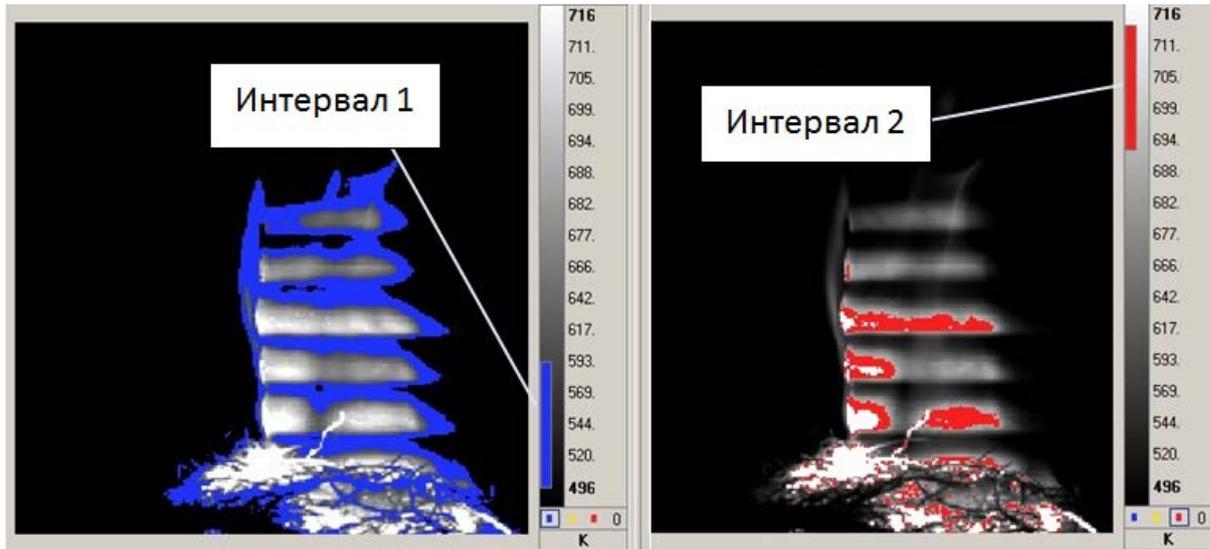


Рис. 3.17. Термограммы образца, имитирующего стенку из оцилиндрованного бруса, в момент воспламенения

На рисунке 3.17 приведена термограмма, характеризующая температуру по поверхности испытуемого образца в момент воспламенения. Интервал 1 ($496 \leq T \leq 593 \text{ K}$) на рисунке 3.17 соответствует участкам наименьшего нагрева, участок 2 ($690 \leq T \leq 716 \text{ K}$) – наибольшего. Такое распределение показывает, что для оцилиндрованного бруса наиболее подвержены возгоранию выпуклые части образца, а также боковые грани. Таким образом, вероятность воспламенения для подобных образцов выше, чем для плоских, при прочих равных условиях эксперимента.

3.3. Моделирование теплофизических процессов при зажигании древесины

3.3.1. Постановка задачи

Будем считать, что зажигание и горение древесины возникает в результате совместного действия конвективного – q_w и лучистого – q_σ тепловых потоков.

Действие конвективного потока моделируется температурой очага T_e и коэффициентами тепло- и массообмена α_e и β_e . Рассматривается пространственная задача в параллелепипеде (рис. 3.18), где ось x_3 направлена вертикально вверх, а начало координат располагается на поверхности G_3 . Суммарный тепловой поток фронта пожара $Q_w = q_w + q_\sigma$ направлен по оси x_3 перпендикулярно волокнам древесины рассмотренных пород, при этом вне области S_* лучистый тепловой поток отсутствует.

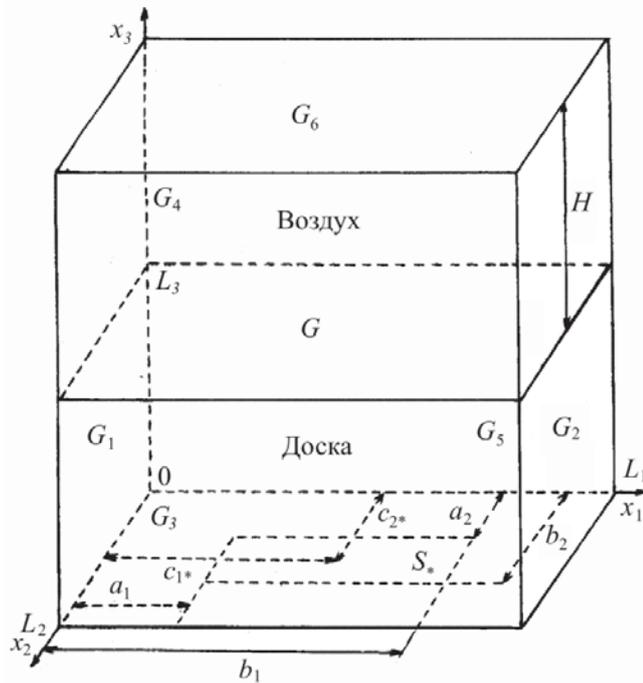


Рис. 3.18. Схема теплообмена дощечки с внешней средой:

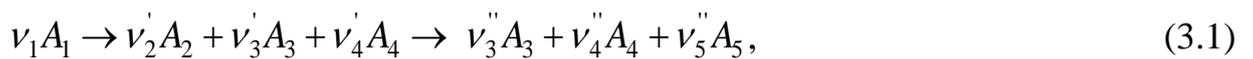
G_1 – левая грань параллелепипеда (дощечка + воздух); G_2 – правая грань; G_3 – верхняя грань; G_4 – задняя (невидимая грань); G_5 – передняя грань; G – плоскость сопряжения древесина–воздух; G_6 – верхняя грань параллелепипеда

Таблица 3.1. Зависимость температуры нагретой непроницаемой поверхности от времени

t	0	5	10	15	18	20	25	30	35	40	45	50
$T_w^{(1)}$	530	540	550	570	610	630	650	680	730	760	770	780
$T_w^{(2)}$	540	545	550	580	730	760	840	940				
$T_w^{(3)}$	540	550	590	700	945	870						

Кроме того предполагается, что воспламенение деревянной дощечки может возникать от соприкосновения с накаливаемой непроницаемой поверхностью S_* , температура ($T_w^{(i)}, i = 1, 2, 3$) которой меняется со временем (табл. 3.1). При этом площадь этой поверхности $S_* = (L_1 - 2a_1) \cdot (L_2 - 2a_2)$ меньше площади нагреваемой пластины: $G_3 = L_1 \cdot L_2$.

При выводе системы уравнений, выражающих законы сохранения массы, количества движения и энергии будем считать, что: 1) конденсированная фаза древесины в процессе горения состоит из четырех компонентов: исходного сухого материала, воды, конденсированного продукта пиролиза (угля) и продукта горения угля – золы; 2) при горении древесины в результате нагревания имеет место необратимая гомогенная реакция разложения



где $A_i, i = 1, \dots, 5$ – символы исходного конденсированного вещества – влажной древесины, связанной воды, конденсированного продукта пиролиза, газообразных горючих продуктов реакции пиролиза и пепла; $v_1, v_2', v_3', v_4', v_3'', v_4'', v_5''$ – соответствующие стехиометрические коэффициенты.

Известно [128], что при термической деструкции природных полимеров (в том числе и имеющих древесное происхождение) протекают как эндо-, так и экзотермические реакции. Причиной эндотермического эффекта является процесс "плавления" лигнина, протекающий с поглощением тепла. Процессы же, идущие с выделением тепла при недостатке или без доступа кислорода, служат реакции образования структуры полукокса. Кроме того, реакция разложения древесины (без доступа воздуха) становится экзотермической примерно при 548–553 К [65, 128], причем реакции разложения лигнина и целлюлозы происходят с выделением тепла соответственно при 543 и 573 К.

Первая стадия реакции пиролиза (3.1) включает в себя разложение древесины [65], которое протекает с поглощением тепла и образования кокса, что может быть интерпретировано как реакция синтеза, которая имеет экзотермический характер [47, 64, 128]. Вторая – стадия образования пепла из кокса, которая

происходит с экзотермическим эффектом. Считается, что энергия активации и предэкспоненты процессов разложения и синтеза близки друг другу и поэтому первую стадию в целом можно моделировать как одностадийную химическую реакцию с переменным тепловым эффектом [129, 130]. Температура перехода T_{s*} , при которой происходит смена этих режимов считается известной $T_{s*} = 550$ К.

Для упрощения анализа, следуя [47, 68], будем предполагать, что древесина является двухтемпературной горючей недеформируемой пористой средой, состоящей из следующих фаз: φ_1 – сухого органического вещества (сухая древесина состоит из лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы [64-66]), φ_2 – гигроскопической воды, связанной с этим органическим веществом в порах [64, 65], φ_3 – коксика (продукта пиролиза органического вещества), а также конденсированного и газообразного продуктов горения (объемные доли φ_4 и φ_5). Кроме того, следуя [47, 68], будем считать, что газовая фаза в слое древесины состоит из семи компонентов: CO , H_2O , O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2 и N_2 массовые концентрации которых c_α , $\alpha = 1, 2, \dots, 7$ соответственно, а в самом слое древесины имеет место испарение связанной воды и учитывается процесс фильтрации воды в древесине.

В целом считается, что фронт пожара при его заглублении в слой древесины состоит из зон: прогрева, сушки, пиролиза, зоны горения газообразных и конденсированных продуктов пиролиза высушенной древесины и слоя пепла [68, 69].

Математически сформулированная выше задача с учетом сделанных допущений сводится к решению следующей системы уравнений [47, 68]:

$$\frac{\partial \rho_5 \varphi_5}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_5 \varphi_5 \vec{W}) = Q, \quad (3.2)$$

$$\operatorname{grad} P = -\frac{\mu}{\xi} \vec{W} - \rho_5 g, \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^4 c_{is} \rho_{is} \varphi_i \frac{\partial T_1}{\partial t} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{sj} \frac{\partial T_1}{\partial x_j} \right) + A_v (T_2 - T_1) + \sum_{i=1}^4 q_{is} R_{is}, \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \rho_5 \varphi_5 c_{p5} \frac{dT_2}{dt} &= \operatorname{div}(\lambda_5 \varphi_5 \operatorname{grad} T_2) + \rho_5 \varphi_5 \operatorname{grad} T_2 \sum_{\alpha=1}^N c_{p\alpha} D_\alpha \operatorname{grad} c_\alpha + \\ &+ \sum_{i=1}^3 q_i r_i + A_v (T_1 - T_2) + c_{1s} (T_1 - T_2) (1 - \alpha_c) R_{1s} + c_{2s} (T_1 - T_2) R_{2s}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T), \quad (3.6)$$

$$\rho_5 \varphi_5 \frac{dc_\alpha}{dt} = \operatorname{div}(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \operatorname{grad} c_\alpha) - c_\alpha Q + R_\alpha, \quad \alpha = 1, \dots, N-1, \quad (3.7)$$

$$\rho_{1s} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_{2s} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s},$$

$$\rho_{3s} \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - R_{3s} - \alpha_4 R_{3s}, \quad \rho_{4s} \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = R_{4s}, \quad (3.8)$$

$$\sum_{\alpha=1}^N c_\alpha = 1, \quad \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i, \quad M^{-1} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad P = \frac{\rho_5 R T_2}{M}. \quad (3.9)$$

В системе (3.2)–(3.8) уравнения (3.6) являются уравнением теплопроводности для воздуха (см. рис. 3.1).

Для решения системы уравнений (3.2)–(3.8) были использованы следующие начальные условия:

$$\begin{aligned} T_i|_{t=0} &= T_H, \quad i = 1, \dots, 4, \quad c_\alpha|_{t=0} = c_{\alpha H}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \\ \rho_5|_{t=0} &= \rho_{5H}, \quad \varphi_i|_{t=0} = \varphi_{iH}, \quad i = 1, \dots, 4; \end{aligned} \quad (3.10)$$

Балансовые граничные условия [131]:

$$(1 - \varphi_5)[q_\sigma + \alpha_e (T_e - T_{1,S_*})] = -\lambda_{s1} \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \Big|_{S_*}, \quad a_i \leq x_i \leq b_i, \quad i = 1, 2, \quad x_3 = 0,$$

$$(1 - \varphi_5) \alpha_{a_i} (T_{a_i} - T_{1,G_3}) = -\lambda_{s1} \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \Big|_{G_3}, \quad 0 \leq x_i < a_i, \quad b_i < x_i \leq L_i, \quad i = 1, 2, \quad x_3 = 0,$$

$$\varphi_5 [q_\sigma + \alpha_e (T_e - T_{1,S_*})] = -\varphi_5 \lambda_5 \frac{\partial T_2}{\partial x_3} \Big|_{S_*}, \quad a_i \leq x_i \leq b_i, \quad i = 1, 2, \quad x_3 = 0,$$

$$\varphi_5 \alpha_{a_i} (T_{a_i} - T_{1,G_3}) = -\varphi_5 \lambda_5 \frac{\partial T_2}{\partial x_3} \Big|_{G_3}, \quad 0 \leq x_i < a_i, b_i < x_i \leq L_i, i = 1, 2, x_3 = 0. \quad (3.11)$$

Условия сопряжения на границе раздела древесина – воздух (G):

$$\lambda_{s1} \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \Big|_{G_-} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{G_+}, \quad T_1 \Big|_{G_-} = T \Big|_{G_+}, \quad T_1 \Big|_G = T_2 \Big|_G. \quad (3.12)$$

На гранях G_4, G_5 по закону Ньютона задается теплообмен при $0 < x_3 < L_3$:

$$-\lambda_{s1} \frac{\partial T_1}{\partial x_2} \Big|_{G_i} = \alpha_{G_i} (T_{1,G_i} - T_H), \quad -\lambda_5 \varphi_5 \frac{\partial T_2}{\partial x_3} \Big|_{G_i} = \alpha_{G_i} (T_{1,G_i} - T_H), \quad i = 4, 5. \quad (3.13)$$

Также в задаче задается условие тепловой изоляции:

$$\frac{\partial T_i}{\partial x_1} \Big|_{G_i} = 0, \quad i = 1, 2, \quad 0 \leq x_j \leq L_j, \quad j = 2, 3. \quad (3.14)$$

На гранях $G_m, m = 1, \dots, 6, m \neq 3$ (воздушная среда) задаются начальные условия:

$$T \Big|_{G_m} = T_H, \quad m = 1, \dots, 6, \quad m \neq 3, \quad L_3 < x_3 \leq L_3 + H. \quad (3.15)$$

Используя аналогию процессов тепло- и массообмена [13] ($\beta_e = \alpha_e / c_{p5}$), имеем граничные условия:

$$\beta_e (c_{\alpha,e} - c_{\alpha,w}) = \varphi_5 \rho_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} \Big|_{S_e}, \quad a_i \leq x_i \leq b_i, \quad i = 1, 2, \quad x_3 = 0,$$

$$\beta_{a_i} (c_{\alpha,H} - c_{\alpha,w}) = \varphi_5 \rho_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} \Big|_{G_3}, \quad 0 \leq x_i < a_i, b_i < x_i \leq L_i, \quad i = 1, 2, \quad x_3 = 0. \quad (3.16)$$

На гранях $G_m, m = 1, \dots, 5, m \neq 3$ задается условие – отсутствие выгорания концентраций компонент:

$$\frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} \Big|_{G_m} = 0, \quad m = 1, 2, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} \Big|_{G_m} = 0, \quad m = 4, 5,$$

$$\frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} \Big|_G = 0, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N - 1. \quad (3.17)$$

Отметим, что отсутствие выгорания концентраций компонент задается также в случае непроницаемой накаливаемой стенки на грани S_* при $x_3 = 0$:

$$\left. \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} \right|_{S_*} = 0, \alpha = 1, 2, \dots, N-1. \quad (3.18)$$

Кроме того, задается равенство давления в порах на границах $G, G_i, i = 1, \dots, 5$ и во внешней среде:

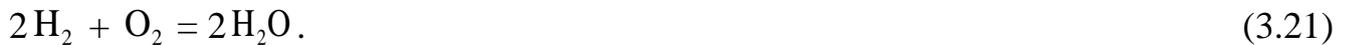
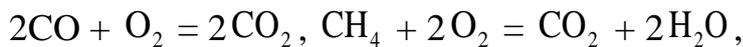
$$P|_{S_*} = P_e, P|_{G_i} = P_H, i = 1, \dots, 5, P|_G = P_H. \quad (3.19)$$

При действии непроницаемой накаливаемой стенки на грань S_* образца древесины снизу учитывается условие не протекание газовой смеси:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x_3} \right|_{S_*} = 0. \quad (3.20)$$

3.3.2. Коэффициенты переноса, теплофизические и термокинетические постоянные

Известно [47, 68], что итоговыми гомогенными химическими реакциями в проницаемом слое древесины являются:



Уравнения химической кинетики для реакций окисления оксида углерода, метана и водорода имеют вид [132]:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= -k_1 x_1 x_3^{0.25} T_2^{-2.5} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_2}\right) = -r_1, \quad \frac{dy_2}{dt} = -k_2 x_5^{-0.5} x_3^{1.5} \frac{P}{T_2} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2}\right) = -r_2, \quad \frac{dy_3}{dt} = -k_3 y_3 y_6^{1.5} \exp\left(-\frac{E_3}{RT_2}\right) = -r_3. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Для испарения связанной воды в древесине используется аналог закона Герца – Кнудсена [47, 133]:

$$R_{2s} = \frac{s_2 M_2 A_s \varphi_2 [k_{2s} \exp(-E_{2s} / RT_1) - P_2]}{(2\pi RT_1 M_2)^{0.5}}. \quad (3.23)$$

Для нахождения парциального давления паров воды в слое торфа P_2 используется закон Дальтона [133], согласно которому $P_2 / P = x_2$. Тогда для P_2 имеем выражение:

$$P_2 = P c_2 \frac{M}{M_2},$$

где давление смеси газов P находится из последней формулы (3.9).

Эффективный коэффициент диффузии берется по формуле Фристрона – Вестенберга [47, 134]:

$$D_\alpha = (1 - c_\alpha) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq \alpha}}^N \frac{x_j}{d_{\alpha,j}} \right)^{-1}, \quad d_{\alpha,j} = 1.66 \cdot 10^{-7} \frac{[(M_\alpha + M_j)/(M_\alpha M_j)]^{0.5} T_2^{1.5}}{P \sigma_{j,\alpha}^2 (\varepsilon_{j,\alpha} / kT_2)^{0.17}}.$$

Формула для коэффициентов теплопроводности компонента газовой фазы λ_j , $j = 1, 2, \dots, N$ взята из [135]:

$$\lambda_5 = \sum_{i=1}^N \lambda_i c_i, \quad \lambda_j = \lambda_j^0 (0.115 + 0.354 \frac{c_{p,j}}{R}), \quad \lambda_i^0 = 8.32 \cdot 10^{-2} \frac{(M_i / T_2)^{0.5}}{\sigma_i^2 (\varepsilon_i / kT_2)^{0.147}},$$

$$c_{p5} = \sum_{j=1}^N c_{p,j} c_j, \quad \lambda_{sj} = \lambda_{1j}^s \varphi_1 + \sum_{i=2}^4 \lambda_{\varphi_i}^s \varphi_i, \quad j = 1, 2, 3. \quad (3.24)$$

Коэффициенты теплоемкости компонента газовой фазы $c_{p,j} = a_j + b_j T_2 + c_j / T_2^2$, $j = 1, \dots, 7$ брались из [136].

Выражения для $R_1 - R_6$, Q , $R_{1s} - R_{4s}$ и μ в уравнениях (3.2), (3.3), (3.7), (3.8) имеют вид [47, 68]:

$$R_1 = \eta_1 R_{1s} - M_1 r_1, \quad R_2 = \eta_2 R_{1s} - R_{2s} + 2 M_2 (r_2 + r_3), \quad R_3 = - \eta_3 R_{3s} - \\ - M_3 (r_1 + 2 r_2 + r_3), \quad R_4 = M_4 (2 r_1 + r_2), \quad R_5 = \eta_4 R_{1s} - M_5 r_2,$$

$$R_6 = \eta_5 R_{1s} - 2 M_6 r_3, R_{1s} = k_{1s} \rho_{1s} \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_{1s}}{RT_1}\right), Q = (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + R_{3s},$$

$$R_{3s} = \frac{M_c}{M_3} s_3 k_{3s} \varphi_5 \rho_5 \varphi_3 c_3 \exp\left(-\frac{E_{3s}}{RT_1}\right), R_{4s} = \alpha_4 R_{3s}, \mu = \mu_H \left(\frac{T_2}{T_H}\right)^{0.5}, \quad (3.25)$$

$$\alpha_c = \frac{M_c}{M_H - M_c}, \eta_1 = \frac{M_1}{M_H}, \eta_2 = \frac{M_2}{M_H}, \eta_3 = \frac{M_3}{M_c}, \eta_4 = \frac{M_5}{M_H}, \eta_5 = \frac{M_6}{M_H}.$$

Сухая древесина представляет собой двухфазную систему [88], включающую в себя древесинное вещество (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин) и воздух. Однако доля воздуха (по массе) в древесине крайне мала, и теплоемкость сухой древесины практически равна теплоемкости вещества древесины. Удельная теплоемкость древесины не зависит от породы и плотности и по данным [88] при 273 К для абсолютно сухой древесины равна $1.55 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К). С повышением температуры удельная теплоемкость древесины несколько повышается по линейному закону и при 373 К увеличивается примерно на 25 %.

Представленные в (3.24) коэффициенты теплопроводности сухой древесины в продольном направлении $\lambda_{1j}^s, j = 1, 2, 3$, как известно [64, 65], в два раза выше, чем в поперечном и в зависимости от плотности породы определяется в виде [64]:

$$\lambda_{1j}^s = \lambda_{dr}^s K_\rho N. \quad (3.26)$$

В формуле (3.26) λ_{dr}^s – коэффициент теплопроводности абсолютно сухой древесины, взятой из [64], K_ρ – коэффициент, учитывающий базисную (условную) плотность древесины, N – учитывает направление теплового потока. Для тангенсального направления поперек волокон (по касательной к годичным слоям) $N = 1$, радиального $N = 1.15$, вдоль волокон хвойных и рассеянно-сосудистых пород: береза, лиственница, тополь, сосна, ель, кедр $N = 2.2$, для кольцесосудистых: дуб $N = 1.6$. Значения K_ρ и базисной плотности ρ_{bas} взяты из [88].

В табл. 3.2 приведено K_ρ в порядке возрастания базисной плотности согласно нумерации: 1 – ель, 2 – тополь, 3 – сосна, 4 – береза, 5 – лиственница, 6 – дуб. В табл. 3.3 даны плотности нормализованной ρ_n и абсолютно сухой древесины ρ_{1s} , коэффициент теплопроводности поперек и вдоль волокон древесины, начальная объемная доля сухой древесины φ_{1H} определенной породы. Начальная объемная доля связанной воды φ_{2H} вычисляется по формуле [47]:

$$\varphi_{2H} = \frac{\rho_n - \rho_{1s}\varphi_{1H}}{\rho_{2s}}. \quad (3.27)$$

Таблица 3.2. Коэффициент, учитывающий базисную плотность древесины

№	1	2	3	4	5	6
ρ_{bas}	360	360	400	500	520	550
K_ρ	1,0	1,0	1,05	1,22	1,29	1,36

Таблица 3.3. Зависимости плотности, коэффициентов теплопроводности и начальной объемной доли сухого реагента от породы древесины

№	1	2	3	4	5	6
$\rho_n, \text{кг/м}^3$	445	455	500	630	660	690
$\rho_{1s}, \text{кг/м}^3$	420	430	470	600	630	650
$\lambda_{11}^s, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	0,134	0,134	0,14	0,163	0,174	0,182
$\lambda_{12}^s, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	0,1163	0,1163	0,122	0,142	0,15	0,158
$\lambda_{13}^s, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	0,256	0,256	0,268	0,312	0,33	0,253
φ_{1H}	0,28	0,29	0,307	0,374	0,404	0,434

3.3.3. Методика расчета и исходные данные

Система уравнений (3.2)–(3.8) с краевыми условиями (3.10)–(3.20) решалась численно при помощи итерационно-интерполяционного метода [49]. Для варианта породы сосны $\varphi_{1н} = 0.307$, $\varphi_{2н} = 0.178$, $\rho_{1с} = 470 \text{ кг/м}^3$ и входных данных из этого раздела была проделана процедура тестирования численного метода. Для решения математической модели использовалась последовательность сгущающихся сеток по пространству: $h_{x_1} = 0.456 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $h_{x_2} = 0.654 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $h_{x_3} = 0.624 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и бралось $h_i = 2h_{x_i}$, $h_i = h_{x_i} / 2$, $h_i = h_{x_i} / 4$, $i = 1, 2, 3$.

Фиксировались такие параметры, как: время зажигания t_* древесины, когда максимальная температура в образце достигает 1200 К, температура каркаса и газа в различные моменты времени, а также среднее значение скорости горения древесины от времени. При этом шаг по времени был переменным и вырабатывался автоматически по заданной точности, одинаковой для всех сеток по пространству. Погрешность времени зажигания t_* падала: $\varepsilon_1 = 17.4 \%$, $\varepsilon_2 = 6.2 \%$, $\varepsilon_3 = 3.1 \%$. Тенденция уменьшения погрешности по температуре древесины сохраняется: $\varepsilon_1 = 7.2 \%$, $\varepsilon_2 = 2.3 \%$, $\varepsilon_3 = 1.7 \%$. Расхождение результатов по средней скорости горения также снижалось: $\varepsilon_1 = 19.5 \%$, $\varepsilon_2 = 10.4 \%$, $\varepsilon_3 = 6.6 \%$. Ниже результаты расчета получены для шагов по пространству $h_{x_1} = 0.228 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $h_{x_2} = 0.327 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $h_{x_3} = 0.312 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Линейная скорость горения вглубь древесины определялась по следующей формуле

$$\omega = \frac{(\Delta x)_*}{(\Delta t)_*} = \frac{x_{3(k)} - x_{3(k-1)}}{t_{*(k)} - t_{*(k-1)}}. \quad (3.28)$$

В (3.28) $t_{*(k)}$ и $t_{*(k-1)}$ – время достижения температуры горения T_* при $x_3 = x_{3(k)}$ и $x_3 = x_{3(k-1)}$, где k – текущий, а $(k-1)$ – предыдущий слой по x_3 в центре (

$x_1 = c_{1*}, x_2 = c_{2*}$) области S_* на рис. 3.1. Для теплофизических и термокинетических параметров древесины использовались данные работ [47, 74, 127, 128, 132-136]. Теплофизические характеристики воды и водяного пара брались из [137].

Таблица 3.4. Теплофизические и термокинетические коэффициенты древесины

кг/ м ³			Дж/ (кг·К)				Вт/ (м·К)		
ρ_{2s}	ρ_{3s}	ρ_{4s}	c_{1s}	c_{2s}	c_{3s}	c_{4s}	$\lambda_{\varphi_2}^s$	$\lambda_{\varphi_3}^s$	$\lambda_{\varphi_4}^s$
2000	130	130	1800	2090	1020	1020	0,6	0,041	0,041
кДж/ моль			Дж/кг				c^{-1}		
E_{1s}	E_{2s}	E_{3s}	q_{1s}^-	q_{1s}^+	q_{2s}	q_{3s}	k_{1s}	k_{2s}	k_{3s}
62,15	16,76	50,28	$-2 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^6$	$-2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^5$

Таблица 3.5. Молекулярные веса компонент газовой фазы и тепловые эффекты реакций

кг/кмоль							Дж/кг		
M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	q_1	q_2	q_3
28	18	32	44	16	2	28	$2,81 \cdot 10^5$	$4,04 \cdot 10^5$	$2,31 \cdot 10^5$

В таблицах 3.4, 3.5 приведены теплофизические, термокинетические коэффициенты древесины, теплофизические коэффициенты воздуха, молекулярные веса компонент газовой фазы и тепловые эффекты реакций.

Приведенные ниже результаты получены при $T_H = 293$ К, $T_* = 560$ К, $T_e = 1300$ К,

$T_{a_i} = 400$ К, $\alpha_{a_i} = 1,0$ Вт/(К·м²), $i = 1, 2$, $\alpha_e = 1,5$ Вт/(К·м²), $\omega_* = 2,4 \cdot 10^{-5}$ м/с,

$P_e = P_H = 1,013 \cdot 10^5$ Н/м², $\mu_H = 1,81 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), $q_\sigma = 7 \cdot 10^3$ Вт/м²,

$A_v = 4 \cdot 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}), d_p = 10^{-6} \text{ м}, \rho = 1.29 \text{ кг}/\text{м}^3, c_p = 1004 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$
 $\lambda = 0.0253 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), M_H = 130 \text{ кг}/\text{кмоль}, M_c = 12 \text{ кг}/\text{кмоль}, L_1 = 0.15 \text{ м},$
 $L_2 = 0.21 \text{ м}, L_3 = 0.02 \text{ м}, c_{1*} = 0.075 \text{ м}, c_{2*} = 0.105 \text{ м}, H = 0.5 \text{ м},$
 $R = 8.314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), s_2 = 0.05 \text{ м}^{-1}, s_3 = 0.2, \text{ м}^{-1}, A_s = 0.08, c_{\alpha,e} = c_{\alpha,H}, \alpha = 1,$
 $2, 4, 5, 6, c_{3e} = 10^{-3}, c_{1H} = 0.2, c_{3H} = 0.23, c_{5H} = 0.1, \varphi_{3H} = 10^{-3}, \varphi_{4H} = 10^{-5}, \alpha_4 = 0.7.$

3.3.4. Результаты численного решения и их анализ

В таблице 3.6 приведено время воспламенения (при $T_{1w} \geq 560 \text{ К}$, а $\omega \geq 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}/\text{с}$) различных пород древесины при одинаковой начальной объемной доле влаги $\varphi_{2H} = 0.2$. Значения температуры и скорости горения считались известными и брались из работы [67].

Таблица 3.6. Время зажигания различных пород древесины

№	ель	тополь	сосна	береза	лиственница	дуб
Время зажигания t_* , мин	0.87	0.95	1.19	1.938	2.21	2.45

Видно, что время зажигания увеличивается с ростом плотности древесины. Более плотная древесина имеет большую теплопроводность (см. табл. 3.2) и, следовательно, больше теплотеря от нагреваемого слоя древесины.

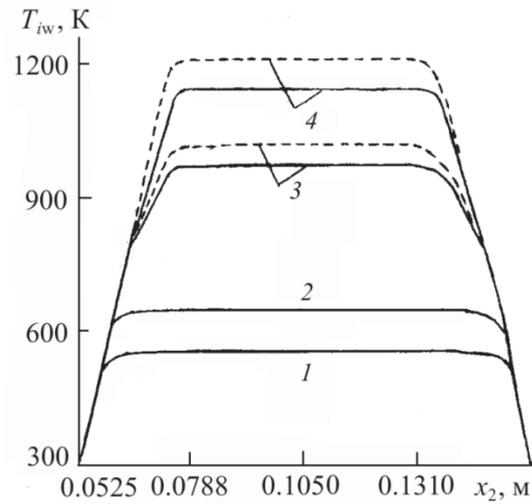


Рис. 3.19. Зависимость изменения температур поверхности каркаса сосны T_{1w} (сплошные кривые) и газа T_{2w} (штриховые линии) по продольной переменной x_2

На рисунке 3.19 представлено распределение температур поверхности каркаса сосны T_{1w} и газа T_{2w} (сплошные и штриховые кривые соответственно) по продольной переменной x_2 при $x_1 = c_{1*}$ и влажности $\varphi_{2H} = 0.178$, взятой из формулы (3.27), в различные моменты времени: 1 – 0.7 мин, 2 – 1 мин, 3 – 1,05 мин, 4 – 1,056 мин. Из графика видно, что до момента времени $t < 1.05$ мин температура газа и каркаса древесины практически совпадают. Затем при достижении времени зажигания в результате тепловыделения от экзотермической реакции окисления оксида углерода (из уравнения 3.21) температура газовой фазы T_{2w} превышает температуру каркаса T_{1w} .

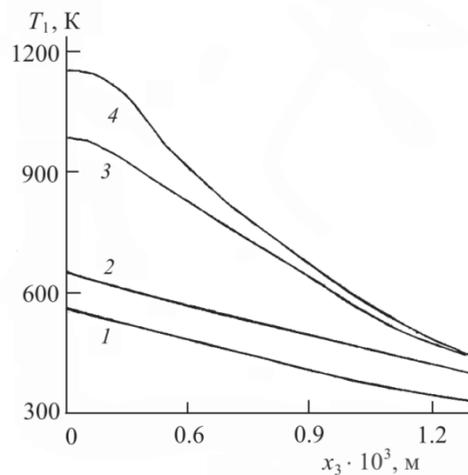


Рис. 3.20. Распределение температуры каркаса сосны по глубине слоя

На рис. 3.20 изображено распределение температуры каркаса сосны по глубине слоя x_3 при $x_1 = c_{1*}$, $x_2 = c_{2*}$. В данном случае режиму зажигания соответствуют кривые, имеющие выпуклость вверх. Из анализа численного решения задачи и результатов статьи [107] следует, что с ростом температуры проницаемого фрагмента среды сначала имеет место прогрев и испарение связанной воды, а объемная доля связанной воды при $T_1 > 373 \text{ K}$, в свою очередь, исчезает, превращаясь в концентрацию паров H_2O [107]. При $T_1 > 450 \text{ K}$ начинается процесс пиролиза сосны с появлением основной массы паров воды, углекислого газа CO_2 и кокса φ_3 [107].

Как показали результаты численного решения задачи при нагреве дощечки непроницаемой горячей поверхностью время воспламенения и горения древесины зависит как от длительности действия источника нагрева, так и от его интенсивности. В первом случае при низком значении ($T_w^{(1)}$, см. табл. 3.1) время зажигания образца из березы $t_*^{(1)} = 41.35 \text{ с}$ выше, чем при более высоких и разных интенсивностях ($T_w^{(i)}$, $i = 2, 3$, см. табл. 1) $t_*^{(2)} = 25.47 \text{ с}$ $t_*^{(3)} = 19.25 \text{ с}$. При этом максимальная температура древесины ($T_{1\max}$) достигается внутри образца и связана, по видимому, с эффектом выделения тепла от экзотермической реакции синтеза сухой древесины [128, 129].

В результате исследования влияния зависимости содержания начальной объемной доли влаги $\varphi_{2н}$ на скорость процесса горения древесины отмечено, что с уменьшением объемной доли влаги с $\varphi_{2н} = 0.25$ до $\varphi_{2н} = 0.2$ и $\varphi_{2н} = 0.15$ для значения $\varphi_{1н} = 0.374$ (порода березы под № 4 в таблице 3.2) время зажигания уменьшается $t_* = 2.21, 1.938, 1.69 \text{ мин}$. Это связано, в большей степени, с уменьшением затрат тепловой энергии на испарение связанной воды в древесине.

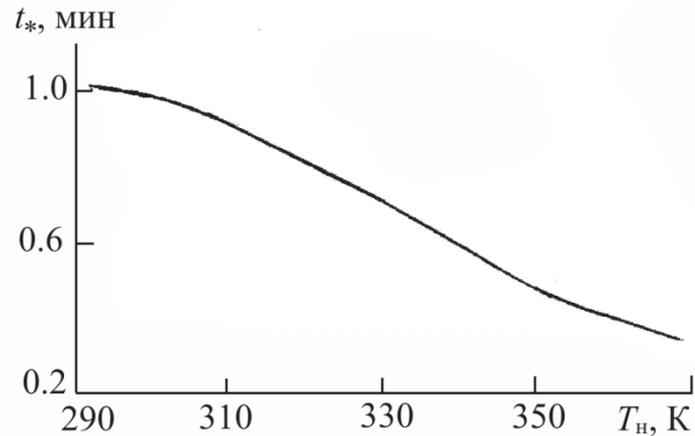


Рис. 3.21. Зависимость изменения времени зажигания от начальной температуры образца сосны

На рис. 3.21 представлены результаты по зажиганию образца сосны с различной начальной температурой T_n и начальным влажосодержанием (объемной доли φ_{2n}). Видно, что время зажигания образца, предварительно нагретого до температуры 370 К, меньше, чем образцов при $T_n < 370$ К. Это обусловлено уменьшением затрат энергии на нагрев и испарение связанной воды в древесине, что качественно согласуется с экспериментальными данными статьи [138].

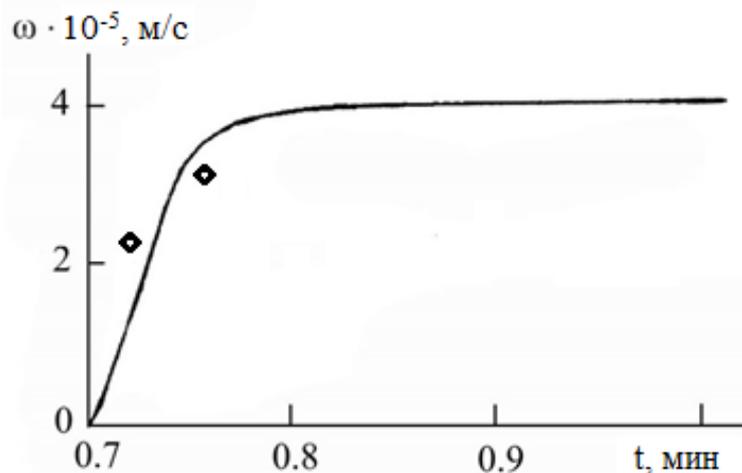


Рис. 3.22. Зависимость линейной скорости горения сосны от времени

На рисунке 3.22 представлена расчетная величина линейной скорости горения сосны от времени для входных данных рис. 3.19 и соответствующие экспериментальные точки. Из анализа графика на рис. 3.22 видно, что с увеличением времени происходит увеличение скорости горения и быстрый рост

температуры сосны (рис. 3.19, кривые 3 и 4). Результаты расчетов по величине линейной скорости горения сосны на нестационарном участке имеют хорошее согласование с экспериментом. Расхождение результатов теории и эксперимента составило 10 %. Кроме того получено, что среднее значение скорости горения древесины по порядку величины согласуется с экспериментальными данными [139].

3.4. Выводы

1. Экспериментально исследовано воздействие очага горения на плоские и оцилиндрованные образцы из березы и сосны термодпарным методом и методом ИК-диагностики. Установлено, что наибольшему воздействию как низового лесного, так и степного пожара в большей степени подвержена центральная часть образцов.

2. С помощью термодпарного метода определена температура на поверхности образцов древесины березы и сосны, подверженной воздействию очага горения, которая составила: 460-470 К для плоских образцов; 400-410 К – для оцилиндрованных образцов.

3. Методом ИК-диагностики установлено, что температура на поверхности образцов древесины принимает значения порядка 650-670 К для плоских образцов и 700-730 К – для оцилиндрованных образцов.

4. Установлено, что при скоростях воздушного потока $v_g > 1$ м/с пламя начинает воздействовать на боковые поверхности образцов древесины, при этом торцы обугливались. Скорость обугливания вдоль волокон древесины составила: для березы – 0,14 мм/мин; для сосны – 0,21 мм/мин. При воздействии пламени перпендикулярно волокнам отмечается потемнение поверхности образца.

5. В результате численного решения 3-х мерной задачи о зажигании древесины от очага пожара установлено, что время зажигания определяется интенсивностью внешнего очага горения, породой древесины, начальным

влажностью, а также начальной температурой образца. Результаты расчетов по величине линейной скорости горения сосны на нестационарном участке имеют хорошее согласование с экспериментом. Расхождение результатов теории и эксперимента составило 10 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально определено распространение фронта горения сосново-пушицевого и травяно-сфагнового типа торфа при различном расположении очага горения низового лесного пожара.

2. Экспериментально установлено влияние ботанического состава торфа на механизм заглубления фронта горения в его массу.

3. Определено, что скорость горения по вертикали $v_{верт} = 1,4$ мм/мин и диагонали $v_{диаг} = 1,55$ мм/мин у травяно-сфагнового вида торфа, имеющего в своем составе преимущественно проводники горения (более 70 %), выше, чем у сосново-пушицевого на 20 % и 22 % соответственно.

4. Численно решена одномерная задача о зажигании торфяника в результате воздействия очага горения. Отмечено, что с ростом влагосодержания и пористости торфа, а также в случае снижения концентрации кислорода в воздухе время зажигания увеличивается. Результаты расчетов по величине скорости тления имеют удовлетворительное согласование с известными экспериментальными данными.

5. Экспериментально исследовано воздействие очага горения на плоские и оцилиндрованные образцы из березы и сосны термпарным методом и методом ИК-диагностики. Установлено, что наибольшему воздействию как низового лесного, так и степного пожара в большей степени подвержена центральная часть образцов.

6. С помощью термпарного метода определена температура на поверхности образцов древесины березы и сосны, подверженной воздействию очага горения, которая составила: 460-470 К – для плоских образцов; 400-410 К – для оцилиндрованных образцов.

7. Методом ИК-диагностики установлено, что температура на поверхности образцов древесины принимает значения порядка 650-670 К для плоских образцов и 700-730 К – для оцилиндрованных образцов.

8. Установлено, что при скоростях воздушного потока $v_g > 1$ м/с пламя начинает воздействовать на боковые поверхности образцов древесины, при этом торцы обугливались. Скорость обугливания вдоль волокон древесины составила: для березы – 0,14 мм/мин; для сосны – 0,21 мм/мин. При воздействии пламени перпендикулярно волокнам отмечается потемнение поверхности образца.

9. В результате численного решения 3-х мерной задачи о зажигании древесины от очага пожара установлено, что время зажигания определяется интенсивностью внешнего очага горения, породой древесины, начальным влагосодержанием, а также начальной температурой образца. Результаты расчетов по величине линейной скорости горения сосны на нестационарном участке имеют хорошее согласование с экспериментом. Расхождение результатов теории и эксперимента составило 10 %.

Список использованной литературы

1. Российский статистический ежегодник. 2010. Статсборник. М.: Росстат. – 2010 – 813 с.
2. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов / Э.В. Конев – Новосибирск: Наука. – 1977. – 239 с.
3. Гундар С.В. Об энергетическом балансе беспламенного горения органической части почвы при лесных пожарах / С.В. Гундар // Вопросы лесной пирологии. – 1974. – С. 74-82.
4. Гришин А. М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения / А.М Гришин // Успехи механики. – 2002. – № 4(1). – С. 41-89.
5. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров / Г.А. Доррер. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2008. – 430 с.
6. Albin F.A. Physical model for fire spread in brush / F.A. Albin // 2 Int. Sympos. on Combustion. Pittsburg. – 1967. – Pз. 553–560.
7. Rothermel A. Mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels / A. Rothermel. – ASDA, Forest Service Research Paper. – 1972. – 40 p.
8. Суков Я.В. Исследование параметров зажигания и горения торфа с помощью физического и математического моделирования : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.14 / Суков Ярослав Васильевич. – Томск, 2010. – 140 с.
9. Грунтоведение / Под ред. Е.М.Сергеева.– М.: МГУ.– 1983.– 384 с.
10. Пичугин А.В. Торфяные месторождения и их разведка / А.В. Пичугин, В.М. Платон – М.: Гос.энерг. изд-во. – 1951.– 496 с.
11. Справочник по торфу / Под редакцией В.А. Миненковой. – М.: Сельхозгиз. – 1960. – 320 с.
12. Крамаренко В.В. Характеристика физических свойств верховых торфов Томской области / В.В. Крамаренко, Т. Я. Емельянова // Вестн. Том. гос. ун-та . – 2009. – №322. – С. 265-269.
13. Гришин А.М. Физическое и математическое моделирование возникновения и распространения торфяных пожаров / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Е.Л. Лобода, А.И. Фильков, А.С. Якимов. – Томск: Изд-во Том. Ун-та. – 2012. – 124 с.

14. Ландшафты болот Томской области / под ред. Н.С. Евсеевой. – Томск: Изд-во НТЛ. – 2012. – 400 с.
15. Кузнецов Г.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий / Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2009. — 301 с.
16. Воробьев Ю.Л. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы / Ю.Л. Воробьев, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов; Под общ. ред. Ю.Л. Воробьева. – МЧС России. – М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. – 312 с.
17. Борисов А.А. Экспериментальное исследование и математическое моделирование торфяных пожаров / А.А. Борисов, Ал.А. Борисов, Р.С. Горелик и др. // Теплофизика лесных пожаров. – 1984. – С. 5-22.
18. Гришин А.М. Физика лесных пожаров / А.М. Гришин. – Томск, Изд-во ТГУ. – 1994. – 217 с.
19. Никитин Ю.А. Предупреждение и тушение пожаров в лесах и на торфяниках / Ю.А. Никитин, В.Ф. Рубцов. – М.: Россельиздат. – 1986. – 95 с.
20. Субботин А.Н. Математическое моделирование распространения фронта пожара на торфяниках / А.Н. Субботин // Механика сплошных сред и ее приложения. – 1989. – С. 57-63.
21. Субботин А.Н. Влияние тепломассообмена на критические условия зажигания и горения торфяника / А.Н. Субботин // Сибирский физико-технический журнал. – 1992. – № 6. – С. 133-137.
22. Кулеш Р.Н. Зажигание торфа внешним локальным источником тепла / Р.Н. Кулеш, А.Н. Субботин // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – № 4(18). – С. 13-18.
23. Субботин А.Н. Исследование механизма и минимальной энергии зажигания торфа источником тепла / А.Н. Субботин, Р.Н. Кулеш // Пожарная безопасность. – 2009. – № 4. – С. 77-83.
24. Гришин А. М. Экспериментальное определение характеристик зажигания и горения торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Я.В. Суков, Ю.И. Прейс // Инженерно-физический журнал. – 2006. – № 1(78). – С. 137-142.

25. Гришин А.М. Экспериментальное определение теплофизических, термокинетических и фильтрационных характеристик торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Я.В. Суков // Инженерно-физический журнал. – 2006. – № 3(79). – С. 131-135.
26. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов / Н.П. Курбатский // Вопросы лесной пирологии. – 1970. – С. 3-5.
27. Авдеева А.А. Контроль сжигания газообразного топлива / А.А. Авдеева. – М.: Энергия. – 1971. – 256 с.
28. Гришин А.М. Экспериментальное исследование режимов зажигания и горения торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Я.В. Суков, А.А. Абрамовских // Инженерно-физический журнал. – 2007. – № 6(80). – С. 86-89.
29. Гришин А.М. Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.П. Зима, Д.А. Крючков, В.В. Рейно, А.Н. Субботин, Р.Ш. Цвык // ФГВ. – 1998. – № 5(34). – С. 14-22.
30. Арцыбашев Е.С. Лесные пожары и борьба с ними / Е.С. Арцыбашев. – М.: Лесная промышленность. – 1974. – 150 с.
31. Субботин А.Н. Закономерности развития подземного пожара при разных условиях тепло- и массообмена с внешней средой / А.Н. Субботин // IV Минский междунар. Форум. – 2000. – Т. 4. – С. 224-231.
32. Борисов А.А. Кинетические характеристики низкотемпературного горения торфа / А.А. Борисов, Я.С. Киселев, В.П. Удилов // Теплофизика лесных пожаров. – 1984. – С. 23-30.
33. Blake D. Peat fires and air quality: Volatile organic compounds and particulates / D. Blake, A.L. Hinwood, P. Hortwitz // Chemosphere. – 2009. – №76. – pp. 419-423.
34. Rein G. Carbon Emissions from Smouldering Peat in Shallow and Strong Fronts / G. Rein, S. Cohen, A. Simeoni // Proceedings of the Combustion Institute. – 2009. – № 32. – Pp. 2489-2496. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2008.07.008>.
35. Frandsen W.H. Ignition probability of organic soils / W.H. Frandsen // Can. J. For. Res. – 1997. – № 27. – Pp. 1471-1477.

36. Frandsen, W.H. The influence of moisture and mineral soil on the combustion limits of smouldering forest duff / W.H. Frandsen // Canadian Journal of Forest Research. – 1987. – №17(12). – Pp. 1540-1544.

37. Hartford R.A. Smoldering combustion limits in peat as influenced by moisture, mineral content and organic bulk density / Edited by D.C. Maciver, H. Auld, R. Whitewood // In Proceedings of the 10th Conference on Fire and Forest Meteorology. – Ottawa, Ontario. – 1989. № 10. – Pp. 282-286.

38. Hungerford R. Ignition and burning characteristics of organic soils / R. Hungerford, W. Frandsen, K.C. Ryan. Edited by S.I. Cerulean and R.T. Engstrom // In Proceedings of the Tall Timbers Fire Ecology Conference. – Tallahassee. – 1993. – No. 19. – Pp. 78-91.

39. Лиштван И.И. Физические процессы в торфяных залежах / И.И. Лиштван, Е.Т. Базин, В.И. Косов. – Минск: Наука и техника. – 1989. – 283 с.

40. Rein G. Smouldering natural fires: Comparison of burning dynamics in boreal peat and Mediterranean humus / G. Rein, J. Garcia, A. Simeoni, V. Tihay, L. Ferrat // In WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2008. – Vol. 119. – Pp. 183-192. doi:10.2495/FIVA080191.

41. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Часть 1 / А.М. Гришин. – Томск: Изд-во ТГУ. – 2003. – 524 с.

42. Сретенский В.А. Стратегия лесного пожаротушения / В.А. Сретенский // Лесное хозяйство. – 2008. – №4. – С.45-46.

43. Щетинский В.А. Тушение лесных пожаров / В.А. Щетинский. – М.:ВНИИЛМ. – 2002. – 103с.

44. Валдайский Н.П. Оборудование для тушения лесных и торфяных пожаров / Н.П. Валдайский, Н.И. Журавлев // Лесные пожары и технические средства борьбы с ними: сб. научн. трудов. – № 19. – 1974. – С. 148-152.

45. Белозеров В.В., Метод и автоматизированный комплекс обнаружения, предотвращения и тушения торфяных пожаров / В.В. Белозеров, А.А. Нестеров, Ю.Г. Плахотников, Ю.В. Прус // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности» (<http://ipb.mos.ru/ttb/>). – 2010. – № 5(33).

46. Чураев Н.В. Физико-химия процессов массопереноса в пористых телах / Н.В. Чураев. – М.: Химия. – 1990. – 272 с.
47. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 1981. – 277 с.
48. Гришин А.М. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред / А.М. Гришин, Зинченко В.И., А.Я. Кузин, С.П. Синицын, В.Н. Трушников. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2006. – 418 с.
49. Гришин А.М. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения / А.М. Гришин, В.И. Зинченко, К.Н. Ефимов, А.Н. Субботин, А.С. Якимов. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2004. – 320 с.
50. Гришин А.М. Математическое моделирование торфяных пожаров / А.М. Гришин, А.С. Якимов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т.51. – №12(2). – С. 112-121.
51. Kallman E.M. Numerical Modeling of Microgravity Smoldering Combustion in Polyurethane Foam / E.M. Kallman // PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley. – 2005.
52. Pastor E. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour / E. Pastor, L. Zarate, E. Planas, J. Arnaldos // Progress in Energy and Combustion Science. – 2003. – № 2(29). – Pp. 139 – 153.
53. Costa F. S. Mathematical model of a smoldering log / F.S. Costa, D.V. Sandberg // Combustion and Flame – 2004. – № 3(139). – Pp. 227-238.
54. Голованов А.Н. О математическом моделировании теплофизических процессов зажигания и тления торфа / А.Н. Голованов, А.С. Якимов, А.А. Абрамовских, Я.Р. Суков // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15. – № 4. – С. 699-710.
55. Гундар С.В. Определение минимальной концентрации кислорода при беспламенном горении почв / С.В. Гундар // Лесное хозяйство. – 1976. – № 5. – С. 53-54.

56. Гришин А.М. Математическое моделирование теплофизических процессов при зажигании и тлении торфа / А.М. Гришин, А.С. Якимов // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – № 1(17). – С. 151-167.
57. Лобода Е.Л. Некоторые результаты математического моделирования процесса зажигания торфа / Е.Л. Лобода, А.С. Якимов // Теплофизика высоких температур. – 2013. – № 6(51). – С. 923-930.
58. Вукалович М.П. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / М.П. Вукалович, С.А. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Изд-во стандартов. – 1969. – 430 с.
59. Лобода Е.Л. Экспериментальное исследование глубины фронта горения торфа ИК-методами / Е.Л. Лобода // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – № 5(25). – С. 451-455.
60. Filkov A. A comparative study to evaluate the drying kinetics of Boreal peats from micro to macro scales / A.Filkov, A.Y.Kuzin, O. Sharyov, V. Leroy-Cancellieri, D. Cancellieri, E. Leoni, A. Simeoni, G. Rein. // Energy&Fuels. – 2012. – №1(26). – С. 349-356.
61. Субботин А.Н. Распространение торфяного пожара при разных условиях тепломассообмена с внешней средой / А.Н. Субботин // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16 – № 5. – С. 42-49.
62. Кулеш Р.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса при воспламенении торфа / Р.Н. Кулеш, А.Н. Субботин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – № 4(323). – С. 85-90.
63. Persson J. A. Quantitative Thermogravimetry on Peat / J.A. Persson, E. Johansson, S. Albano // Analytical Chemistry. – 1986. – № 58. – Pp. 1172-1178. – DOI: 10.1021/ac00297a043.
64. Перелыгин Л.М. Древесиноведение / Л.М. Перелыгин // Лесная промышленность. – Москва. – 1962 – 284 с.
65. Харук Е.В. Проницаемость древесины газами и жидкостями / Е.В. Харук. – Новосибирск: Наука. – 1976. – 187 с.

66. Новосельцев В.Д. Справочник лесничего / В.Д. Новосельцев. – М.: Агропромиздат. – 1986. – 352 с.
67. Сивенков, А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства / Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков. – Монография. – М. : Академия ГПС МЧС России. – 2010. – 262 с.
68. Гришин А.М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины / А. М. Гришин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2010. – № 2(10). – С. 60–70.
69. Гришин А.М., Пугачева П.В. Аналитическое решение задачи о зажигании стены деревянного дома в результате действия фронта лесного пожара / А.М. Гришин, П.В. Пугачева // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2010. – № 3(11). – С. 88-94.
70. Cohen J.D. A brief summary of my Los Alamos fire destruction examination / J.D. Cohen // Wildfire Magazine. – 2000. – № 9(4). – Pp. 16-18.
71. Mell W.E. The wildland–urban interface fire problem – current approaches and research needs // W.E. Mell, S.L. Manzello, A. Maranghides, D. Butry, R.G. Rehm // International Journal of Wildland Fire. – 2010. – № 19. – Pp. 238–251. – doi:10.1071/WF07131.
72. Babrauskas V. Charring rate of wood as a tool for fire investigations / V. Babrauskas // Fire Safety Journal. – 2005. – № 40. – Pp. 528-554. – doi:10.1016/j.firesaf.2005.05.006.
73. Frangi A. Charring rates and temperature profiles of wood sections / A. Frangi, M. Fontana // Fire Materils. – 2003. – № 27. – Pp. 91-102. – doi: 10.1002/fam.819.
74. Babrauskas V. Ignition of Wood: A Review of the State of the Art / V. Babrauskas // Interflam. London: Interscience Communications Ltd., 2001. Pp. 71-88.
75. Frangi A. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire / A. Frangi, M. Fontana, E. Hugli, R. Jubstl // Fire Safety Journal. –2009. – № 44. – Pp. 1078–1087. – doi:10.1016/j.firesaf.2009.07.007.
76. Cohen J.D. Preventing disaster: Home ignitability in the wildland-urban interface / J.D. Cohen // Journal of Forestry. – 2000. – № 3(98). – Pp. 15-21.

77. Гришин А.М. Анализ действия лесного пожара на город Лос-Аламос и новая детерминированно-вероятностная модель прогноза пожарной опасности в поселках и городах / Гришин А.М., Пугачева П.В. // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии: Избранные доклады 7-й Международной научной конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – С. 107-120.

78. Гришин А.М. Лабораторные исследования возникновения и распространения низового лесного пожара / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.П. Зима, А.В. Исаков, В.В. Рейно, Р.Ш. Цвык // ФГВ. – 1996. – Т. 32. – № 6. – С. 3-11.

79. Morandini F. Experimental investigation of the physical mechanisms governing the spread of wildfires / F. Morandini, X. Silvani // International Journal of Wildland Fire. – 2010. – № 19 (5). – Pp. 570-582.

80. Гришин А.М. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в природных условиях / А.М. Гришин, А.И. Фильков, Е.Л. Лобода, В.В. Рейно, Ю.А. Руди, В.Т. Кузнецов, В.В. Карavaев // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – № 2. – С. 91-102.

81. Гришин А.М. Природные экспериментальные исследования воздействия полевого пожара на деревянные ограждения и слой торфа / А.М. Гришин, А.И. Фильков, Е.Л. Лобода, В.В. Рейно, В.Т. Кузнецов, А.С. Якимов, Д.П. Касымов, С.М. Андреюк, А.И. Иванов, Н.Д. Столярчук, И.С. Ануфриев, Ю.А. Аникин, И.В. Савченко, Р.Н. Абдуллаев // Пожарная Безопасность. – 2013. – № 3. – С. 52-58.

82. Chandler C. Forest Fire Behavior and Effects (Fire in Forestry) / C. Chandler, P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud, D. Williams. –Wiley, New York. – 1983. – Vol. 1. – 450 p.

83. Campbell J.L. Forest wildfire, fuel reduction treatments, and landscape carbon stocks: A sensitivity analysis / J.L. Campbell, A.A. Ager // Journal of Environmental Management. – 2013. – Vol. 121. – Pp. 124-132.

84. North M. Stephens S. Using fire to increase the scale, benefits, and future maintenance of fuels treatments / M. North, B.M. Collins, S. Stephens // *Journal of Forestry*. – 2012. – Vol. 110(7). – Pp. 392-401.

85. Rehm R.G. Community-scale fire spread / R.G. Rehm, A. Hamins, H.R. Baum et al. // *Proceedings of the California's 2001 Wildfire Conference*. – California. – 2001. – Pp. 126-139.

86. Di Blasi C. Modeling and Simulation of Combustion Processes of Charring and Non-Charring Solid Fuels / C. Di Blasi // *Progress in Energy and Combustion Science*. — 1992. — Vol. 19. — Pp. 71-104.

87. Atreya A. A Model for Opposed Flow Flame Spread Over Charring Materials / A. Atreya, H.R. Baum // *Proceedings of the Combustion Institute*. — 2002. — Vol. 29. — Pp. 227-236.

88. Уголев Б.Н. Дровесиноведение с основами лесного товароведения / Б.Н. Уголев. – М.: Изд-во МГУЛ. – 2001. – 340 с.

89. Lowden L. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction / L. Lowden, T. Hull // *Fire Science Reviews*. – 2013. – № 2(4). Pp. 1-19. – doi:10.1186/2193-0414-2-4.

90. Mikkola E. Charring of wood / E. Mikkola. – Espoo: Technical Research Centre of Finland. – 1990. – 35 p.

91. Friquin K.L. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber / K.L. Friquin // *Fire and Materials*. – 2010. – № 35. – Pp. 303-327.

92. Гришин А.М. Комплекс экспериментальных установок для исследования природных пожаров / А.М. Гришин, В.П. Зима, В.Т. Кузнецов и др. // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2009. – Т.52. – №2(2). – С. 84-89.

93. Гришин А.М. Экспериментальные и теоретические исследования зажигания торфа от низового лесного пожара / А.М. Гришин, В.П. Зима, Д.П. Касымов, А.С. Якимов // *Пожарная безопасность*. – 2012. – № 1. – С. 90-94.

94. Прохоренко Н.Б. Классификация и состав торфов: учебно-методическое пособие / Н.Б. Прохоренко – Казань: Казанский (Приволжский) Федеральный университет. – 2013. – 56 с.

95. Гришин А.М. Физическое моделирование возникновения и распространения торфяных пожаров / А.М. Гришин, В.Т. Кузнецов, В.П. Зима, Д.П. Касымов // Проблемы мониторинга окружающей среды: Сборник трудов XI Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. – Кемерово: КемГУ. – 2011. – С. 63-67.

96. Гришин А.М. Физическое моделирование возникновения и распространения торфяных пожаров / А.М. Гришин, В.П. Зима, В.Т. Кузнецов, Д.П. Касымов // Материалы международной конференции по механике и баллистике «VII Окуневские чтения». – Санкт-Петербург. – 2011. – С. 46-48.

97. Курбатский Н.П. Лесные почвенные пожары и борьба с ними / Курбатский Н.П., Красавина Н.И., Жданко В.А. – Ленинград. – 1957. – 32 с.

98. Гришин А.М. О механизме заглубления очага горения торфа / А.М. Гришин, В.П. Зима, Д.П. Касымов // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86. – № 5. – С. 937-942.

99. Касымов Д.П. Экспериментальные и теоретические исследования зажигания торфа от низового лесного пожара / Д.П. Касымов // Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции «Современные проблемы математики и механики». – Томск. – 2011. – С. 135-139.

100. Касымов Д.П. Экспериментальное исследование структуры торфа, а также тепловизионной картины во фронте торфяного пожара, инициированного действием низового лесного пожара / Д.П. Касымов // Тезисы докладов международной конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». – Новосибирск. – 2012. – С. 58.

101. Касымов Д.П. Экспериментальное исследование структуры торфа и тепловизионной картины во фронте торфяного пожара / Д.П. Касымов // Материалы X международной Школы молодых ученых "Физика окружающей среды". – Томск: ТМЛ-Пресс. – 2012. – С. 112-114.

102. Гришин А.М. Экспериментальное исследование структуры торфа и тепловизионной картины во фронте торфяного пожара / А.М. Гришин, Д.П. Касымов, В.П. Зима // *Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф»*. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2012. – С.31.
103. Denis Kasymov Experimental research of penetration hearth of burning in the peat layer / Kasymov Denis, A.M. Grishin, V.P. Zima // *Advances in Forest Fire Research*. Book chapter. – Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra. – 2014. – Pp. 1683-1689. – http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6_185.
104. Perminov V.A. Mathematical simulation of the origination and propagation of crown fires in averaged formulation / V.A. Perminov // *Technical Physics*. – 2015. – V. 60. – № 2. – Pp. 180-187.
105. Перминов В.А. Математическое моделирование лесных пожаров: возникновение верховых и массовых лесных пожаров / В.А. Перминов. – Saarbrucken (Germany): Lambert Academic Publishing. – 2011. – 292 с.
106. Kuznetsov V.T. Ignition of Various Wood Species by Radiant Energy / V.T. Kuznetsov, A.I. Fil'kov // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2011. – Vol. 47. – No. 1. – Pp. 65-69.
107. Гришин А. М. Математическое моделирование процесса зажигания древесины / А.М. Гришин, А.С. Якимов // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2013. – Т. 20. – № 4. – С. 473-486.
108. Grishin A.M. A Model of Prediction of Forest Fire Hazard / A.M. Grishin, A.I. Fil'kov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2003. – № 5(76). – Pp. 1139-1144.
109. Grishin A.M. A Deterministic-probabilistic System for Predicting Forest Fire Hazard / A.M. Grishin, A.I. Filkov // *Fire Safety Journal*. – 2011. – V.46. – Pp. 56–62.
110. Rossi J.-L. Simplified flame models and prediction of the thermal radiation emitted by a flame front in an outdoor fire / J.-L. Rossi, K. Chetehouna, A. Collin, B.

Moretti, J.-H. Balbi // *Combustion Science and Technology*. – 2010. – Vol. 182. – Pp. 1457-1477. –doi:10.1080/00102202.2010.489914.

111. Grishin A. M. A Field Experiment on Grass Fire Effects on Wooden Constructions and Peat Layer Ignition / A. M. Grishin, A. I. Filkov, E. L. Loboda, V. V. Reyno, A. V. Kozlov, V. T. Kuznetsov, Kasymov D.P., S. M. Andreyuk, A. I. Ivanov // *International Journal of Wildland Fire*. – 2014. – V. 23(3). – Pp. 445-449. DOI: <http://dx.doi.org/10.1071/WF12069>.

112. Гришин А.М. Методы и устройства для тушения природных пожаров в рамках новой концепции борьбы с природными и техногенными катастрофами / А.М. Гришин, В.П. Зима, Д.П. Касымов // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 759-766.

113. Гришин А. М., Голованов А. Н. О влиянии малых акустических возмущений на процессы сушки, пиролиза и зажигания лесных горючих материалов // *Сиб. физ.-техн. журн.* 1992. Вып. 6. С. 102–106

114. Касымов Д.П. Экспериментальные и теоретические исследования зажигания смоделированной стены деревянного дома в результате действия фронта лесного пожара / Д.П. Касымов, А.М. Гришин, В.П. Зима // *Материалы X международной Школы молодых ученых "Физика окружающей среды" им. А.Г. Колесника*. – Томск: ТМЛ-Пресс. – 2012. – С. 115-117.

115. Гришин А.М. Физическое и математическое моделирование низовых лесных пожаров и их действия на смоделированную деревянную стену / А.М. Гришин, В.П. Зима, Д.П. Касымов, Е.Л. Лобода // *Материалы международной конференции по механике и баллистике «VIII Окуневские чтения»*. – Балт. гос. техн. ун-т. – СПб. – 2013. – С. 117-119.

116. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. – М.: ИД Спектр. – 2009. – 544 с.

117. Loboda E.L. Choice for research spectral response of combustion processes using the method of IR diagnostics / E.L. Loboda, V.V. Reyno // *Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics*. – 2014. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2074710>.

118. Boulet P. On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires / P. Boulet, G. Pareut, Z. Acem, A. Collin, O. Sero-Guillaume // *Fire Safety Journal*. – 2011. – №. 46. – Pp. 21-26.
119. Qian C. Measurements of Pool-Fire Temperature Using IR Technique / C. Qian, K. Saito // *Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings*. – San Antonio. – 1995. – Pp. 81-86.
120. Rinieri F. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels / F. Rinieri, J. H. Balbi, P.A. Santoni // *QIRT*. – 2006. Available at: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (accessed 04.10.2014).
121. Лобода Е.Л. Экспериментальное исследование воспламенения древесины в результате воздействия фронта горения слоя торфа / Е.Л. Лобода // *Пожарная безопасность*. – 2012. – № 3. – С. 81-86.
122. Dupuy J. Thermal infrared emission–transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner / J. Dupuy, P. Vachet, J. Maréchal, J. Meléndez, A.J. de Castro // *International Journal of Wildland Fire*. – 2007. – № 16. – Pp. 324-340.
123. Tadashi Konishi, Akihiko Ito, Kozo Saito Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread Over Liquids / K. Tadashi, I. Akihiko, S. Kozo // *Appl. Opt.* – 2000. – Vol. 39. – Pp. 4278-4283.
124. Касымов Д.П. Экспериментальные исследования воздействия низового лесного пожара на модели деревянных конструкций / Д.П. Касымов // *Доклады X Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии»*. – Новосибирск: Параллель. – 2014. – С. 98-101.
125. Касымов Д.П. Экспериментальные исследования воздействия фронта модельного лесного пожара на деревянную преграду / Д.П. Касымов // *Материалы XI Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника*. – Томск: ТМЛ-Пресс. – 2014. – С. 87-89.

126. Касымов Д.П. Лабораторные исследования зажигания моделей деревянной стены в результате действия фронта лесного пожара. / Д.П. Касымов // Теплофизика и энергетика: конференция с международным участием "VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике": тезисы докладов. – Екатеринбург, УрФУ. – 2013. – С. 79.
127. Касымов Д.П. Лабораторные исследования воздействия фронта низового лесного пожара на модели деревянных конструкций методом ИК-диагностики / Д.П. Касымов, О.П. Коробейничев // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: Тезисы докл. Всерос. школы-конф. с международным участием. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. – 2014.– С. 71-72.
128. Левин Э. Д. Причины, обуславливающие знак и величину теплового эффекта пиролиза древесины / Э.Д. Левин // Химия древесины. – 1969. – № 4. – С. 143–148.
129. Богомолов В. Д. Кинетические параметры процесса щелочной делигнификации древесины / В.Д. Богомолов, В.М. Соколов, А.С. Чудинова // Лесной журнал. – 1976. – № 1. – С. 109-115.
130. Гришин А. М. Режимы воспламенения стеклопластиковой трубы с учетом смешанной конвекции окислителя / А.М. Гришин, А.С. Якимов, В.Л. Миков // Физика горения и взрыва. – 1981. – Т. 17. – № 2. – С. 13-22.
131. Гришин А. М. Сопряженный теплообмен в композиционном материале / Гришин А.М., Голованов А.Н., Якимов А.С. // ПМТФ. – 1991. – № 4. – С. 141-148.
132. Щетинков Е.С. Физика горения газов / Е.С. Щетинков. – Москва: Наука. – 1965. – 739 с.
133. Алексеев Б.В. Физическая газодинамика реагирующих сред / Б.В. Алексеев, А.М. Гришин. – Москва: Высшая школа. – 1985. – 464 с.
134. Campbell E. C. Reaction kinetics thermodynamics and transporting the hydrogen bromine system / E.C. Campbell, R.M. Fristrom // Chemical Reviews. – 1958. – Vol. 38. – No. 2. – Pp. 173-234.

135. Померанцев В.В. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов. Под ред. В. В. Померанцева. – Ленинград: Энергия. – 1973. – 264 с.
136. Барон Н.М. Практические работы по физической химии : учеб. пособие для химико-технолог. вузов и фак. / Н.М. Барон, Э.И. Квят, Е.Н. Под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя. – 2-е изд., перераб. – Л.: Госхимиздат. – 1961. – 375 с.
137. Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: Издательство МЭИ. – 1999. – 168 с.
138. Кузнецов В.Т. Воспламенение различных видов древесины потоком лучистой энергии / В.Т. Кузнецов, А.И. Фильков // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 74-79.
139. Демидов П.Г. Горение веществ и способы тушения / П.Г. Демидов. – Москва: Изд-во Наркомхоз РСФСР. – 1955.