

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

**Жданова Алёна Олеговна**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПАРОВ, КАПЕЛЬ И ПЛЕНОК  
ВОДЫ С ТЕРМИЧЕСКИ РАЗЛАГАЮЩИМСЯ  
ЛЕСНЫМ ГОРЮЧИМ МАТЕРИАЛОМ**

**01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных  
состояний вещества**

**01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико–математических наук,  
доцент Стрижак П.А.

Томск – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ ВОДЯНОГО ПАРА, КАПЕЛЬ И ПЛЕНОК ВОДЫ</b> .....	14
Выводы по первой главе.....	23
<b>ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ХИМИЧЕСКОГО РЕАГИРОВАНИЯ ПРИ ВЗАМОДЕЙСТВИИ ВОДЯНОГО ПАРА, КАПЕЛЬ И ПЛЕНОК ВОДЫ С ТЕРМИЧЕСКИ РАЗЛАГАЮЩИМСЯ ЛЕСНЫМ ГОРЮЧИМ МАТЕРИАЛОМ</b> .....	24
2.1 Экспериментальный стенд и методы исследований.....	24
2.2 Физические и математические модели термического разложения в условиях интенсивных фазовых превращений.....	30
2.3 Методы численного решения.....	46
2.4 Алгоритм оценки достоверности результатов численного моделирования.....	48
2.5 Решение тестовых задач.....	51
Выводы по второй главе.....	62
<b>ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДЯНОГО ПАРА, КАПЕЛЬ И ПЛЕНОК ВОДЫ С ТЕРМИЧЕСКИ РАЗЛАГАЮЩИМСЯ ЛЕСНЫМ ГОРЮЧИМ МАТЕРИАЛОМ</b> .....	63
3.1 Результаты экспериментальных исследований условий и характеристик протекания процессов термического разложения типичных лесных горючих материалов при воздействии на них паров воды.....	63

3.2. Результаты теоретических исследований процесса подавления реакции пиролиза лесных горючих материалов при воздействии паров воды.....	65
3.3 Испарение пленки воды на поверхности лесного горючего материала при его термическом разложении.....	71
3.4 Прекращение реакции деструкции лесного горючего материала при испарении пленки воды с твердыми включениями на его поверхности.....	77
3.5. Влияние группы капель воды на поверхности лесного горючего материала на интенсивность его термического разложения.....	84
3.6. Особенности испарения воды в порах лесного горючего материала в процессе его деструкции.....	92
3.7. Рекомендации по использованию полученных результатов и дальнейшему развитию сформулированного в диссертации подхода	99
<b>ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....</b>	<b>102</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>104</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация является лидером по площади, занятой лесами. Бореальная зона лесов РФ составляет 809 тысяч га [1], что составляет 20% общей площади лесов мира.

В настоящее время охрана лесов от пожаров является весьма актуальной задачей всего мирового сообщества [2–7]. Созданы и успешно эксплуатируются системы дистанционного [8–11], в первую очередь космического мониторинга состояния лесов. В 2014 году на территории РФ зарегистрировано 16,9 тыс. лесных пожаров [8]. Относительно 2013 года [12, 13] число пожаров увеличилось на 6,9 тыс. и, даже несмотря на то, что данный показатель снизился относительно среднегодового значения за 5 лет на 4,96 тыс. возгораний, проблема лесных пожаров остается нерешенной [8].

Борьба с лесными пожарами предполагает решение трех основных задач: прогноз лесной пожарной опасности [14–18], прогноз распространения лесных пожаров [19–28] и непосредственно тушение пожаров [29–34].

Решение задачи тушения лесных пожаров сводится к определению объема воды, необходимого и достаточного для прекращения реакции термического разложения ЛГМ [2, 34].

На сегодняшний день получили известность такие системы тушения, как «водяной туман» [35], «тонкораспыленная вода» [36–40], «водяная завеса» [41]. Главным назначением данных систем является решение трех задач: снижение температуры в области горения (за счет поглощения энергии в результате фазового перехода), создание облака водяных паров для предотвращения поступления окислителя (воздуха) в зону горения, а также максимальное снижение концентрации горючего (непосредственно подавление реакции термического разложения за счет интенсивного снижения температуры в зоне пиролиза ЛГМ до значений ниже температуры начала термического разложения этого материала).

Авиация для борьбы с лесными пожарами применяется несколько десятилетий [29–32]. Несмотря на столь длительный период, к настоящему времени не разработан метод определения объема воды, необходимого и достаточного для прекращения реакции термического разложения ЛГМ. Отсутствие теоретических рекомендаций, в первую очередь, можно объяснить не изученными в полной мере закономерностями воздействия воды (паров, капель и пленок) на нагретый до высоких температур приповерхностный слой даже типичных ЛГМ (листья березы, хвоя сосны и ели).

Как правило [29–32], технология ликвидации пожаров включает локальный сброс воды из емкостей самолетов и вертолетов. Тушащая жидкость поступает в зону горения в виде «снарядов» массой до нескольких тонн. Локальный сброс тушащей жидкости, как правило, приводит к существенному заливанню ограниченных по характерным размерам участков лесных пожаров [30, 32]. Часто локальное воздействие не является гарантией ликвидации очага горения [2, 34], поскольку фронт пожара может обойти залитую водой малую площадь, на которой подавлен процесс термического разложения ЛГМ за счет избыточного поступления воды. Необходима разработка методических рекомендаций о тушении лесных пожаров водой, в частности установлении необходимых и достаточных объемов тушащей жидкости для прекращения реакции пиролиза ЛГМ по всей площади пожара.

Целью работы является экспериментальное и теоретическое определение условий и характеристик прекращения процесса термического разложения ЛГМ при взаимодействии с паром, каплями и пленками воды.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Экспериментальное исследование условий и характеристик протекания процессов термического разложения типичных ЛГМ при воздействии на них пароводяным облаком.
2. Разработка физических и математических моделей физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии термически разлагающихся

ЛГМ с паром, каплями и пленками воды в системах «смесь продуктов сгорания и водяных паров – нагретый до высоких температур слой ЛГМ», «однородная пленка воды – ЛГМ», «вода в порах нагретого до высоких температур слоя ЛГМ – ЛГМ», «вода с твердыми включениями – ЛГМ», «группа капель воды – ЛГМ».

3. Разработка алгоритмов решения задач диссертации и оценки достоверности теоретических результатов.
4. Численное исследование влияния температуры паров воды и характерных толщин слоя лесного горючего материала на интенсивность термического разложения последнего.
5. Определение необходимых и достаточных толщин пленок жидкости на поверхности интенсивно пиролизующегося материала для его охлаждения до температур, при которых прекращается реакция термического разложения.
6. Численное исследование влияния пленки воды (с включениями в виде элементов ЛГМ) на поверхности термически разлагающегося материала на условия прекращения реакции его пиролиза.
7. Анализ влияния глубины проникновения воды в поры ЛГМ на интенсивность подавления реакции его термического разложения.
8. Численное исследование влияния расстояния между каплями жидкости на поверхности ЛГМ на условия его термической деструкции.
9. Определение необходимых и достаточных условий прекращения термического разложения ЛГМ при взаимодействии с пленками и каплями воды, водяным паром и пароводяным облаком.
10. Разработка рекомендаций по использованию результатов исследований при тушении лесных пожаров.

Научная новизна работы. Впервые проведены экспериментальные исследования физико-химических процессов в условиях взаимодействия интенсивно пиролизующегося ЛГМ с пароводяным облаком. Поставлена и решена группа задач математического моделирования физико-химических

процессов, протекающих в условиях термического разложения типичных ЛГМ при воздействии пара, капель и пленок воды. Разработаны физические и математические модели теплопереноса для систем: «смесь продуктов сгорания и водяных паров – нагретый до высоких температур ЛГМ», «однородная пленка воды – ЛГМ», «вода с твердыми включениями – ЛГМ», «группа капель воды – ЛГМ», «вода в порах нагретого до высоких температур слоя ЛГМ – ЛГМ». Задачи не имеют аналогов по постановке, алгоритму решения и полученным результатам.

Практическая значимость. Разработаны физические и математические модели, алгоритмы численного решения задач теплопереноса в условиях физико-химических превращений, протекающих при взаимодействии термически разлагающегося ЛГМ с паром, каплями и пленками воды. Полученные аппроксимационные выражения для основных характеристик исследуемых процессов могут быть использованы при определении необходимых и достаточных объемов тушащей жидкости для подавления пиролиза типичных ЛГМ. Результаты исследований условий и характеристик прекращения деструкции ЛГМ при заполнении водой его приповерхностного слоя позволяют разработать технологии подавления реакции термического разложения последнего в течение относительно небольших времен (нескольких минут). Установленные (численно и экспериментально) условия и значения характеристик процессов подавления реакции термического разложения позволяют в несколько раз снизить времена ликвидации лесных пожаров. Сформулированные в тексте рукописи рекомендации могут служить основой повышения эффективности существующих и развития новых технологий пожаротушения.

Достоверность результатов численных исследований. Проведены экспериментальные исследования физико-химических процессов в условиях взаимодействия пиролизующегося ЛГМ с пароводяным облаком. Установлена удовлетворительная корреляция интегральных характеристик процесса, полученных в выполненных экспериментах, с результатами

теоретических исследований. Оценка достоверности результатов выполненных теоретических исследований проводилась также проверкой консервативности используемых разностных схем (разработаны соответствующие алгоритмы).

Связь работы с научными программами и грантами. Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 14-39-00003), Президента РФ (проекты № МК-620.2012.8, МД-2806.2015.8), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-08-33002, 14-08-00057) и Национального исследовательского Томского политехнического университета (проект № ВИУ\_ЭНИН\_94\_2014). Основные положения диссертации используются в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке магистров техники и технологии по направлениям «Теплоэнергетика» и «Машиностроение», а также кандидатов наук по специальностям «01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества», «01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Тематика исследований соответствует приоритетному направлению развития науки и техники в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.) «Безопасность и противодействие терроризму», а также критическим технологиям «предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

Научные положения и основные результаты, выносимые на защиту:

1. Реакция деструкции в слое типичного ЛГМ прекращается в течение 6–13 минут (в зависимости от условий охлаждения) при воздействии пароводяным облаком с температурой ниже 340 К.
2. Подавление реакции термического разложения обеспечивается при толщинах пленки воды 0,03–0,09 мм на поверхности ЛГМ.
3. Условия подавления реакции пиролиза ЛГМ обеспечиваются даже при достаточно высоких температурах внешней парогазовой среды, если

расстояние между каплями жидкости (на поверхности термически разлагающегося материала) менее 0,02 м.

4. Методика и результаты экспериментальных исследований закономерностей физико-химических процессов, протекающих в условиях взаимодействия термически разлагающегося ЛГМ с пароводяным облаком.
5. Физические и математические модели процессов, протекающих при термическом разложении ЛГМ, отличающиеся от известных учетом влияния на процесс пиролиза паров, капель и пленок воды.
6. Результаты численных исследований влияния группы факторов (температура парогазовой среды, толщина пленки жидкости на поверхности термически разлагающегося ЛГМ, толщина «буферного слоя» (воды с твердыми включениями), расстояние между каплями жидкости, достигших поверхности ЛГМ) на основные характеристики процессов, протекающих при термической деструкции лесных горючих материалов.

Личный вклад автора состоит в проведении экспериментальных исследований, постановке задач взаимодействия интенсивно пиролизующегося ЛГМ с пароводяным облаком, каплями и пленками воды, выборе методов и разработке алгоритмов решения задач, установлении основных закономерностей протекания физико-химических процессов, обработке и анализе полученных результатов, разработке рекомендаций по повышению эффективности существующих и развитию новых технологий пожаротушения, формулировании выводов и заключений диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2013 г.
2. Международная конференция «VIII Окуневские чтения», г. Санкт-Петербург, 2013 г.
3. I Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 2013 г.
4. III Межотраслевая научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения и защиты окружающей природной среды, г. Харьков, 2014 г.
5. XX юбилейная Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ–2014», г. Томск, 2014 г.
6. «Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»», г. Иваново, 2014 г.
7. «Всероссийская конференция «XXXI Сибирский теплофизический семинар», посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе»», г. Новосибирск, 2014 г.
8. «Шестая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-6)», г. Москва, 2014 г.
9. V Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2014 г.
10. XX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», г. Звенигород, 2015 г.
11. XIII Международный саммит по лесным пожарам и 4 конференция «Человеческий фактор в лесных пожарах» (13th International Wildland Fire Safety Summit and 4th Human Dimensions of Wildland Fire) (США, 2015).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационных исследований опубликованы в 21 печатной работе, в том числе 10 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Химическая физика и мезоскопия», «Пожарная безопасность», «Пожаровзрывобезопасность», «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций», «Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация». Опубликовано 6 работ в журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»: «Journal of Engineering Physics and Thermophysics», «Applied Mechanics and Materials», «Advanced Materials Research», «European Physical Journal Web of Conferences». Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Диссертация изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков, 4 таблицы. Библиография включает 164 наименования.

Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

В первой главе проанализировано современное состояние теоретических и экспериментальных исследований физико-химических процессов, протекающих в условиях термического разложения ЛГМ. Показано, что отсутствуют результаты исследований комплекса основных условий и закономерностей физико-химических процессов при взаимодействии интенсивно пиролизующегося ЛГМ с водяным паром, каплями и пленками воды.

Во второй главе представлена разработанная методика экспериментальных исследований основных характеристик процесса подавления реакции термического разложения ЛГМ при взаимодействии с пароводяным облаком. Приведены постановки задач нестационарного

теплопереноса, позволяющие выполнять численные исследования физико-химических процессов, протекающих в процессе прекращения реакции термического разложения ЛГМ при воздействии водяного пара, пароводяного облака, капель и пленок воды. Описаны используемые методы решения нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных. Представлены алгоритмы решения задач и проверки консервативности разностной схемы. Приведены результаты численного решения тестовых задач для верификации разработанного алгоритма и выбранных методов решения основной задачи.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований (с применением высокоскоростных регистрирующих видеокамер и панорамных оптических методов) основных макроскопических закономерностей физико-химических процессов, протекающих при воздействии паров воды на термически разлагающийся ЛГМ. Выполнен теоретический анализ закономерностей и условий протекания основных физико-химических процессов при воздействии на ЛГМ воды (паров, капель и пленок). Установлено влияние группы факторов на процессы, протекающие в условиях взаимодействия паров, капель и пленок воды с ЛГМ, нагретым до высоких температур. Выделен интервал времени, в течение которого необходимо удерживать паровое облако с низкой температурой над термически разлагающимся ЛГМ для прекращения пиролиза последнего. Установлено влияние толщины пленки жидкости на скорость подавления процесса термического разложения ЛГМ, а также влияние на его термическую деструкцию «буферного слоя» (воды с твердыми включениями) на поверхности последнего. Определены условия прекращения распространения термического разложения ЛГМ при воздействии капель жидкости на его поверхность с различным расстоянием между ними. Получены соответствующие аппроксимационные выражения для интегральных характеристик исследуемых процессов. Разработаны

рекомендации по использованию полученных результатов и дальнейшему развитию сформулированного в диссертации подхода.

В заключении подведены основные итоги экспериментальных и теоретических исследований, а также сформулированы соответствующие **выводы**.

# **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ ВОДЯНОГО ПАРА, КАПЕЛЬ И ПЛЕНОК ВОДЫ**

Борьба с возгоранием бореальной зоны лесов предполагает решение ряда задач. На сегодняшний день известны результаты теоретических исследований, посвященных прогнозу лесной пожарной опасности [14–18, 42–47]. Разработана классификация моделей лесных пожаров [3, 48–50]. Также одним из направлений в исследованиях по борьбе с возгораниями лесного массива является прогнозирование распространения лесных пожаров [19–28, 51–58]. Особое внимание ранее уделялось процессам развития волны горения по пористому слою ЛГМ [51]. Экспериментальные исследования [52] позволили установить характерные скорости горения растительного покрова и распределения температуры фронта пламени в пространстве и во времени. Сделаны заключения [29–34], что решение задачи эффективного тушения больших (по площади) лесных пожаров невозможно без применения авиации (как правило, самолеты и вертолеты).

Перспективные направления тушения низовых и степных пожаров основаны на применении водяного пара, комбинаций пара и тонкораспыленной воды [59]. Повышение эффективности подавления горения возможно [59, 60], в основном, за счет введения в воду солей, других примесей и применения систем полидисперсного распыления воды [60] (за счет оптимального соотношения мелких и крупных капель воды в потоке).

Известно, что полная ликвидация очага горения [2, 34] в условиях типичного лесного пожара возможна только при прекращении реакции термического разложения в приповерхностных слоях ЛГМ. Изучение процесса прекращения реакции пиролиза ЛГМ [40] как метода борьбы с лесными пожарами способствует активному развитию аэрозольных

технологий [35, 41, 59] со специфическими названиями – «водяной туман», «тонкораспыленная вода», «паровая завеса» и другие.

Можно отметить широкий спектр работ, направленных на оценку эффективности пожаротушения тонкораспыленной водой с применением, в частности, авиационных методов [31, 32, 36–40]. Исследованы [36–40] характеристики струй тонкораспыленной воды при жидкостном и газожидкостном способах распыления. Сформулированы рекомендации [38, 40] по способам формирования высокодисперсных капельных потоков для воздействия в модельный очаг пожара.

Основным способом тушения лесных пожаров, занимающих большие площади, является локальный сброс определенных масс воды из специальных емкостей самолетов или вертолетов [30, 31]. При этом [30, 31, 59], как правило, жидкость сбрасывается в зону горения в виде «снарядов» с максимально возможной для воздушного судна массой (до нескольких тонн). К настоящему времени для реальных условий крупного лесного пожара в полной мере не разработан подход, обеспечивающий оценку массы жидкости, достаточной для локализации пламени и последующей ликвидации горения по всей площади распространения пожара. При тушении возгораний бореальной зоны авиационной техникой, скорее всего, возможна деформация сбрасываемого массива воды большого объема (по всем трем координатным направлениям [61]). При этом вероятно возникновение как вертикальных, так и горизонтальных «разрывов», которые изменяют условия теплопереноса в водяном массиве (в первую очередь, теплофизические характеристики его гетерогенной структуры) [61]. Провести экспериментальные исследования процесса взаимодействия больших масс жидкости (например, воды) с продуктами сгорания типичных горючих веществ и материалов затруднительно [62, 63]. Результатов теоретических исследований рассматриваемых процессов опубликовано мало. Этим можно объяснить отсутствие эффективных технологий тушения крупных лесных пожаров. Так, например, предполагается [63], что процесс движения

«водяного снаряда» через пламя не играет определяющей роли. Важна только стадия снижения температуры непосредственно ЛГМ [63]. Существуют другие точки зрения. Например, исследование [64] по применению водяного пара, комбинаций пара и тонкораспыленной воды для тушения пожаров. В соответствии с заключениями [64] целесообразно специальное распыление тушащих веществ в зоне пламени.

Опубликованы результаты численного анализа интегральных характеристик испарения одиночных (и групп) капель распыленной жидкости при движении через пламена фиксированной высоты [65–67] и определены условия полного испарения распыленной жидкости в зоне высоких температур. Однако до сих пор отсутствуют результаты теоретических и экспериментальных исследований, которые иллюстрировали бы возможность повышения эффективности использования воды для борьбы с огнем на больших площадях лесных пожаров. В последние годы тонкораспыленная вода рассматривается как один из самых перспективных флегматизаторов горения [68–71]. Но физические основы технологии тушения пожаров таким распыленным флегматизатором, достаточные для создания общей теории процесса, не разработаны до настоящего времени.

Масштабность процесса горения во времени и в пространстве даже при относительно умеренных площадях распространения пожаров [3] делает нецелесообразным экспериментальное исследование характеристик теплопереноса при взаимодействии больших масс воды с пламенем, на малоразмерных моделях. Полученные в таких экспериментах результаты затруднительно использовать при анализе реальных физико-химических превращений, протекающих при тушении возгораний лесного массива водой. Известны [65, 66, 72–75] результаты численных исследований, выполненных для монодисперсной совокупности капель тонкораспыленной воды при ее прохождении через высокотемпературные продукты сгорания. Исследованы условия испарения одиночной [65, 66], двух [72] и группы из четырех [73] и пяти [74] капель. Определены зависимости времени испарения от скорости

движения, температуры продуктов сгорания, размеров и расстояния между каплями для нескольких наиболее типичных систем пламя - «водяной снаряд» [65, 66, 72–74]. Проанализированы условия движения капель в струях тушащей жидкости [75]. Однако не проведен анализ влияния условий распыления флегматизатора горения на температуру в следе «водяного снаряда». Также достоверно не установлено влияние температуры внешней парогазовой смеси на времена прекращения реакции термического разложения ЛГМ. Представляет интерес определение предельных температур в следе «водяного снаряда», при которых обеспечиваются условия прекращения реакции пиролиза в слое ЛГМ. Кроме того, важно оценить влияние толщины прореагировавшего слоя ЛГМ на условия, при которых деструкция ЛГМ прекратится.

Выдвинута гипотеза [32, 35] о том, что далеко не вся сбрасываемая жидкость эффективно используется при тушении (большая часть проходит через пламя с минимальной потерей массы при испарении), но установить в реальных условиях пожара количество требуемой для полной ликвидации очага горения жидкости (с минимальным избытком массы) практически невозможно.

Локальный сброс воды с воздушных судов в зону горения, как правило, приводит к существенному заливанню ограниченных по характерным размерам участков лесных пожаров [30, 38]. Достаточно часто это не является гарантией ликвидации очага горения [3, 34], поскольку фронт пожара может обойти залитую водой малую площадь, на которой подавлен процесс термического разложения ЛГМ за счет избыточного поступления воды. Рассматриваемые в качестве перспективных в последние годы водяные и пароводяные «завесы» [35, 39, 63] призваны покрыть большую площадь пожара по сравнению с «монолитными» массами воды (при этом экономится достаточно много жидкости). Эффективность применения таких подходов для локализации пламен обоснована известными результатами теоретических и экспериментальных исследований, например [36–38, 76]. Однако

открытыми остаются вопросы о необходимых и достаточных (минимальных) объемах жидкости для прекращения реакции пиролиза в слоях типичных ЛГМ. Поскольку при прохождении пламенной зоны горения не вся жидкость испаряется, часть ее может достигнуть поверхности термически разлагающегося ЛГМ [76, 77]. Не изучено влияние на физико-химические процессы при термической деструкции пиролизующихся ЛГМ процессы образования пленок жидкостей на их поверхности. Также не установлены значения толщин пленок и образовавшихся гетерогенных слоев, необходимых для подавления реакции термического разложения типичных ЛГМ.

Вместе с водой поверхности термически разлагающегося ЛГМ могут достигать кора, листья, ветки и другие компоненты лесного массива [2, 34]. В таком случае на поверхности пиролизующегося ЛГМ может сформироваться неоднородная (гетерогенная) система, включающая воду, листья, хвоинки и кору. Над таким слоем, как правило, формируется типичный для «водяных снарядов» (большой совокупности капель) [65] след (парогазовая смесь). Формирование слоя воды с фрагментами бореального массива в значительной степени может изменить условия теплообмена в окрестности прогретого до высоких температур ЛГМ и повлиять на процесс пиролиза последнего [30, 32]. К настоящему времени влияние этого фактора не проработано.

За последние годы выполнен цикл теоретических [76, 77] и экспериментальных [77, 78] исследований процессов испарения воды при ее движении через пламя в виде капель, струй и больших масс («водяных снарядов»). Показано [76, 77], что 95 % сбрасываемой (нераспыленной) жидкости проходит через пламенную зону горения без испарения, и, как следствие, не используется фактически при тушении пожаров.

Известно [79–81], что для максимально возможного снижения температуры в пламенной зоне горения целесообразно мелкодисперсное распыление жидкости (в частности, воды). Так, например, показано [80], что

при средних размерах (условных радиусах) капель воды от 50 мкм до 500 мкм реализуется практически полное испарение жидкости в области пламени. Определяющая доля энергии пламени поглощается вследствие большого теплового эффекта парообразования (2,26 МДж/кг [82]). Температура смеси продуктов сгорания и водяных паров ( $T_m$ ) снижается до 300–450 К [40, 65, 79]. Формирующуюся при этом парогазовую смесь принято считать [40, 76, 80] следом «водяного снаряда». При тушении крупных лесных пожаров особое внимание [2, 34, 63] уделяется процессам химического реагирования в прогретых слоях термически разлагающихся ЛГМ. Результаты исследований [83–85] показывают, что теплосодержание области непосредственного газофазного горения листьев березы, хвои сосны и ели в десятки раз превышает теплосодержание приповерхностного слоя прогретых до высоких (более 600 К) температур ЛГМ. Для снижения температуры пиролизуемого ЛГМ до  $T_d=350–500$  К (значения соответствуют началу термического разложения) необходимо не более 3 % воды, затрачиваемой на подавление непосредственно пламени в зоне газофазного горения [83–85]. Характерные размеры последней могут достигать 10–15 м [80], в то время как толщина прогретого слоя ЛГМ в условиях лесных пожаров составляет не более 0,1 м (как правило, изменяется от 0,02 м до 0,06 м [2, 34]). К настоящему времени не изучены условия прекращения реакции термического разложения типичных ЛГМ при воздействии на их приповерхностные слои водой (механизм этого процесса может существенно измениться при прохождении воды в поры ЛГМ или растекании жидкости по его поверхности). Эти выводы являются следствием анализа результатов исследований процессов теплопереноса для влажной древесины и ЛГМ, например [85–87]. Поэтому целесообразным является численное исследование физико-химических процессов при испарении воды, заполняющей поры термически разлагающегося ЛГМ, и формировании водяной пленки на его поверхность.

Известны результаты исследований процессов теплопереноса при горении ЛГМ [3, 86, 88–92]. Эксперименты [93–96] позволили установить физико-химические характеристики этого процесса.

Исследованию процессов, протекающих при термической деструкции древесных лиственных и хвойных пород, посвящены работы научных коллективов и отдельных исследователей: Макарова А.А., Грачева А.Н., Сафина Р.Г., Шаймуллина А.Т. [97, 98], Герасимова М.К., Петрова В.И. [98], Серкова Б.Б., Асеевой Р.М., Сивенкова А.Б. [99, 100], Seefeld H., Braun U. [101], Wu W., Yang L., Gong J., Qie J., Wang Y., He C., Xu Y. [102, 103], Blasi Colomba Di, Branca Carmen, Galgano Antonio [104, 105], Inari G.N., Mounquengui S., Dumarçay S. Pétrissans M., Gérardin P [106], Lim S.M., Chew M.Y.L. [105, 107, 108], Zhang Y., Ji J., Li J., Sun J., Wang Q., Huang X. [109], Moghtaderi B., Novozhilov V., Fletcher D., Kent J.H. [110].

Изучение процесса термического разложения древесных пород, как правило, сводится к определению таких параметров, как температура начала термического разложения древесины, средняя скорость образования летучих продуктов сгорания и выхода коксового остатка [99]. Определены [100] характеристики химического состава и структуры древесины различных пород, оказывающие влияние на скорость образования и толщину поверхностного коксового слоя.

Установлена возможность образования «жидкой» и газофазной фракций при термическом разложении древесины [99]. В экспериментах [92, 100] выделен двухстадийный характер изменения скорости потерь масс. Первая стадия, как правило, связана с термическим разложением компонентов древесины и образованием «углистого» [100] продукта. Окисление и выгорание кокса характеризует вторую стадию [92, 100]. Практическое применение результатов [92, 99–102] для анализа физико-химических процессов при взаимодействии термически разлагающихся древесных пород с жидкостью затруднительно, так как в реальных условиях переменного типа пожара горючие материалы древесных хвойных и

лиственных пород сгорают в режиме верхового пожара [3]. Основной же участок леса при нестационарном характере распространения возгорания бореальной зоны сгорает в режиме низового пожара [3, 93].

Исследованию процессов термического разложения ЛГМ посвящены труды Гришина А.М., Зимы В.П., Кузнецова В.Т., Скорика А.И. [3, 88, 90, 111, 112], Палецкого А.А., Гончикжапова М.Б., Коробейничева О.П. [113, 114], Барановского Н.В. [63, 115], Гомана П.Н. [64, 116] и других.

Установлены [113, 114] кинетические параметры пиролиза ЛГМ, определены его основные стадии (выход связанной воды; выход летучих продуктов разложения ЛГМ и образование углеродистого остатка). Однако кинетические параметры [113, 114] могут быть использованы в моделях для описания распространения пожаров только с высокой скоростью [113], что значительно снижает возможность практического применения результатов данных теоретических исследований для всех видов пожаров бореальной зоны.

Математическая модель [3] лесных пожаров, включающая групповое диффузионное приближение переноса излучения, позволяет учитывать основные физико-химические процессы термического разложения ЛГМ [93]. Теория [3] послужила основой анализа выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Этим можно объяснить, в частности, сложность применения данной модели для изучения физико-химических процессов, протекающих при прекращении реакции термического разложения водяным паром, каплями и пленками воды.

Теоретическое исследование [110] учитывает процесс пламенного горения, в котором нагрев и разложение органического материала являются определяющими стадиями. В постановке [110] базовым параметром для установления зависимости времени задержки воспламенения является критическая температура поверхности материала. Определена [110] зависимость времени задержки воспламенения от плотности теплового потока, а также толщины образца древесины и теплофизических свойств

материала. Но не выделены [110] механизм и кинетика химических реакций, что является важным аспектом исследований.

Математические модели [97, 98] термического разложения древесины в режиме абляции учитывают влияние режимных параметров процесса (температуры, давления), толщину слоя промежуточного вещества (интермедиата) на скорость термического разложения. Практическим применением результатов теоретических исследований [98] является вычисление скорости убыли конкретного вида сырья при определенных входных параметрах. Можно отметить, что термическое разложение в режиме абляции характеризуется малой величиной зоны реакции, обусловленной значительными скоростями подвода теплоты к поверхности древесины и удалением продуктов реакции из зоны термической деструкции [98]. Этим можно объяснить трудности применения модели [98] для рассмотрения процессов разложения древесины с большей (от 0,02 м до 0,06 м [2, 34]) толщиной прогретого слоя ЛГМ, типичной для лесных пожаров.

Теоретическое исследование [110] испарения влаги в древесине при высоких температурах, в условиях конвективного нагрева в инертной среде основано на одномерных нестационарных уравнениях сохранения энтальпии, массы и импульса для твердой, жидкой и газовой фаз. Исследована высокотемпературная сушка древесины в зависимости от условий нагрева, физических свойств, начального содержания влаги, а также размеров образцов. Однако следует учесть, что модель, в основном, ориентирована на сушку древесных пород. Очень сложно оценить условия и закономерности фазового перехода (испарения влаги) с поверхности термически разлагающегося материала при тушении пожара, так как ЛГМ зачастую достигает «водяной снаряд», и возможно как проникновение воды в поры материала, так и образование капель и пленок жидкости на последнем. В таких условиях трудно использовать модель [110] для оценки физико-химических процессов, протекающих при прекращении деструкции ЛГМ при воздействии воды.

Оценивая результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов термической деструкции хвойных и лиственных древесных пород и ЛГМ, можно сделать вывод, что процессы, протекающие при подавлении пиролиза ЛГМ водяным паром, каплями и пленками воды до настоящего времени не исследованы. Соответственно, нет физических и математических моделей, описывающих полный комплекс физико-химических процессов, при взаимодействии термически разлагающегося ЛГМ с парами, каплями и пленками воды.

### **Выводы по первой главе**

Оценивая известные результаты исследований, направленных на локализацию пламени и последующую ликвидацию горения, можно сделать вывод о том, что в настоящее время отсутствуют физические и математические модели, описывающие полный комплекс основных физико-химических процессов при подавлении реакции термического разложения жидкостью с использованием различных вариантов ее прохождения через пламя (образование пленки воды, слоя с твердыми включениями на поверхности интенсивно пиролизующегося ЛГМ, проникновение тушащей жидкости в поры приповерхностного слоя ЛГМ, влияние расстояния между каплями воды на поверхности ЛГМ). Проведение экспериментальных исследований затруднительно в силу масштабности процесса горения во времени и в пространстве. Поэтому численное моделирование представляется наиболее целесообразным подходом к решению вопросов исследования физико-химических процессов при прекращении реакции термического разложения лесных горючих материалов в условиях воздействия на последние паров, капель и пленок воды.

## **ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ХИМИЧЕСКОГО РЕАГИРОВАНИЯ ПРИ ВЗАМОДЕЙСТВИИ ВОДЯНОГО ПАРА, КАПЕЛЬ И ПЛЕНОК ВОДЫ С ТЕРМИЧЕСКИ РАЗЛАГАЮЩИМСЯ ЛЕСНЫМ ГОРЮЧИМ МАТЕРИАЛОМ**

На основании анализа результатов исследований по проблеме подавления процессов термического разложения в ЛГМ (глава 1) установлено, что в полной мере не изучены физико-химические и теплообменные процессы, протекающие при взаимодействии разогретого до высоких температур ЛГМ с парами, каплями и тонкими пленками воды.

В настоящей диссертационной работе предпринята попытка изучения комплекса физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии интенсивно пиролизующегося ЛГМ с водой (парами, каплями и пленками воды) в типичных для современных технологий пожаротушения условиях и перспективных для дальнейшей проработки (но не изученных) вариантах воздействия воды или водяных паров на ЛГМ. Ниже приведено описание методики экспериментальных исследований физико-химических процессов, протекающих в условиях уменьшения температуры термически разлагающегося ЛГМ ниже температуры начала его деструкции за счет воздействия паров воды (парового облака). Также для идентичных условий приведены постановки задач нестационарного сопряженного теплопереноса. Представлен разработанный алгоритм и методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. Выполнена верификация сформулированных физической и математической моделей на базе решения группы тестовых задач теплопереноса.

### **2.1 Экспериментальный стенд и методы исследований**

При экспериментальных исследованиях процесса подавления реакции термического разложения парокapельной смесью температурой начала деструкции ЛГМ считалось значение  $T_d=500$  К (в соответствии с

рекомендациями и заключениями [20, 51, 88, 93, 100, 110, 114]). При моделировании процессов теплопереноса в условиях фазовых превращений и химического реагирования при взаимодействии паров, капель и пленок воды с термически разлагающимся ЛГМ температура начала деструкции материала принималась идентичной ( $T_d=500$  К).

Для проведения экспериментальных исследований закономерностей физико-химических процессов в условиях интенсивных фазовых превращений в малой окрестности зоны реакции термического разложения ЛГМ при воздействии на них паров воды разработан экспериментальный стенд (рис. 2.1.1).

Основными элементами регистрирующей аппаратуры стенда являются: высокоскоростная видеокамера 1 (формат изображений 1024x1024 пикселей, частота кадров до 100000 в секунду), кросскорреляционная видеокамера 2 (формат изображения – 2048x2048 пикселей, кадровая частота – 1,5 Гц, минимальная задержка между двумя последовательными кадрами – 5 мкс), двойной импульсный твердотельный лазер 14 (с активной сферой «алюмоиттриевый гранат» и добавками неодима, длина волны – 532 нм, минимальная энергия в импульсе – 70 мДж, максимальная длительность импульса – 12 нс, частота повторений – 15 Гц), синхронизирующий процессор (максимальная дискретизация сигналов – 10 нс, поддержка режимов внешнего и внутреннего запуска).

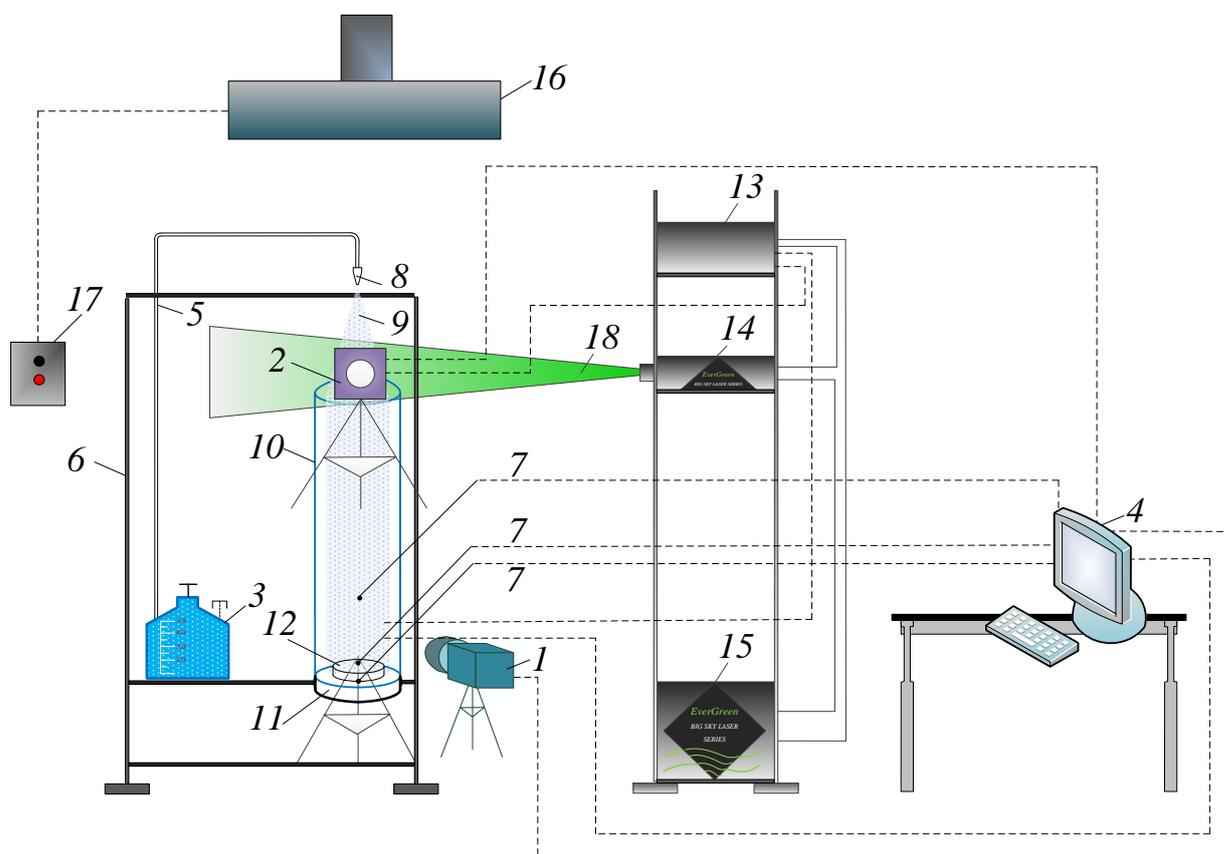


Рисунок 2.1.1. Схема экспериментального стенда: 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – кросскорреляционная камера; 3 – емкость с водой; 4 – ПК; 5 – канал подачи воды; 6 – штатив; 7 – термопары; 8 – распылитель; 9 – поток воды; 10 – полый канал цилиндра; 11 – подложка; 12 – навеска лесного горючего материала; 13 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 14 – двойной твердотельный импульсный лазер; 15 – генератор лазерного излучения; 16 – нагнетательная система; 17 – пульт управления нагнетательной системы; 18 – световой «нож» лазера

При проведении экспериментальных исследований создавалась парокапельная смесь (пароводяное облако) с заданной температурой над разлагающимся ЛГМ ( $T_m=300-450$  К). Фиксировалось время, за которое температура нагретого ЛГМ становилась ниже температуры начала его термического разложения. Эта величина соответствовала условиям прекращения реакции пиролиза ЛГМ. Образцом ЛГМ считался слой

(заполняющий цилиндрический канал 10) лесного горючего материала толщиной от 0,02 м до 0,06 м.

Для каждой навески ЛГМ цикл опытов включал две серии по десять экспериментов. В первой серии экспериментов фиксировались видеокadres с газопарокапельной смесью на входе в цилиндрический канал 10 (высота 1 м, диаметр 0,2 м), заполненный высокотемпературными газами. Во второй серии регистрировались изображения парогазовой смеси и термически разлагающегося образца ЛГМ.

Каждая серия эксперимента включала несколько этапов:

- ✓ к выходу канала 5, соединенного с емкостью 3, подключался распылитель 8, настраиваемый в зависимости от необходимых параметров газопарокапельной смеси;
- ✓ распылитель 8 устанавливался на штативе 6 на 0,5 м выше верхней грани цилиндра 10 (это расстояние обусловлено необходимостью защиты распылителя 8 от оплавления выходящими из канала 10 высокотемпературными газами);
- ✓ высота фотоштатива кросскорреляционной камеры 2, а также высота установки лазера 14 выбирались таким образом, чтобы оптическая ось камеры и плоскость светового «ножа» лазера 18 пересекались под углом 90 градусов (точка их пересечения находилась в регистрационной области видеокadres);
- ✓ проводилась калибровка кросскорреляционной камеры 2 (с определением масштабного коэффициента на персональном компьютере (ПК) 4, а также настройка «перетяжки» светового «ножа» 18 лазера 14;
- ✓ при использовании источника локального нагрева образец ЛГМ 12 нагревался до температуры существенно большей температуры начала его термического разложения;
- ✓ контролировалась температура продуктов сгорания и образца ЛГМ (двумя хромель-алюмелевыми термопарами 7). Первая из них размещалась в верхней части образца, вторая – в нижней. Расстояние между

термопарами варьировалось в зависимости от толщины ЛГМ (для контроля температуры на верхней и нижней поверхностях образца);

✓ при достижении на нижней границе слоя ЛГМ (переходе от инертного прогрева к интенсивному реагированию) значений температуры  $T_d$  запускался процесс распыления воды в пламенную зону горения. Размеры капель воды изменялись в диапазоне  $0,030 < R_d < 0,100$  мм в соответствии с рекомендациями [115, 116]. Этот интервал изменения размеров капель обусловлен тем, что по условиям экспериментов планировалось испарение жидкости в области высокотемпературных продуктов сгорания. Основная масса жидкости (до 95%) испарялась. При этом лишь малая часть воды стекала по стенкам цилиндра и достигала поверхности ЛГМ. Капли с характерными размерами менее 0,03 мм либо уносились высокотемпературными продуктами сгорания, либо испарялись еще на входе в канал. Капли с характерным размером более 0,1 мм достигали поверхности образца ЛГМ. Расход жидкости составил около 1,7 мл/с при объеме емкости 5 л и давлении в ней 2 атм;

✓ одновременно с процессом распыления на ПК 4 запускалось специализированное программное обеспечение (обеспечивающее применение оптических методов диагностики «Particle Image Velocimetry» (PIV) и «Interferometric Particle Imaging» (IPI)), и проводилась процедура регистрации видеogramм с газопарокапельной смесью;

✓ контролировалась температура ( $T_m$ ) газопарокапельной смеси над разлагающимся ЛГМ хромель-алюмелевой термопарой 7 с целью поддержания ее значений в интервале 300–450 К [76, 117];

✓ регистрировался интервал времени, в течение которого температура на нижней поверхности образца ЛГМ становилась меньше принятой предельной температуры ( $T_d=500$  К).

По результатам обработки видеок кадров с применением метода цифровой трассерной визуализации PIV [118–121] строились «двухкомпонентные» поля скорости перемещения «трассеров» и

определялись скорости движения отдельных капель. Измерение мгновенного поля скорости в заданном сечении основано на регистрации перемещения «трассеров», находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени [122]. Размеры, плотность и массовая концентрация «трассирующих» частиц  $\text{TiO}_2$  подбирались таким образом, чтобы эффекты, связанные с плавучестью частиц и другими факторами, были минимальны [123]. Установлено, что наночастиц с концентрацией 0,5 %  $\text{TiO}_2$  в водном растворе достаточно для видеорегистрации капель жидкости в проводимых опытах.

Измерительной областью видеокadres кросскорреляционной камеры считалась плоскость «светового ножа» лазера 18 (рис. 2.1.1). «Трассирующие» частицы в измерительной плоскости потока многократно освещались. Образы частиц регистрировались на цифровую видеокамеру. Последующая обработка изображений позволяла рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить «двухкомпонентные» поля скорости «трассеров» [119]. Эти процедуры основаны на итерационном кросскорреляционном алгоритме, представляющем метод быстрого преобразования Фурье с добавлением условий выполнения «корреляционной теоремы» [124].

При обработке видеogramм рассчитывался масштабный коэффициент  $S$ , который для исследуемых рабочих областей (на входе канала 10) составил 0,043 мм/пикс. При обработке каждая видеogramма разбивалась на регистрационные области 32x32 пикс. Для каждой области рассчитывалась корреляционная функция. Максимум корреляционной функции соответствовал наиболее вероятному сдвигу частиц в регистрационной области [121]. Согласно основным положениям [121] считалось, что скорость потока в элементарной области неизменна и у всех частиц одинаковые перемещения (т.е. у корреляционной функции существует один наиболее ярко выделенный максимум на фоне возможных шумов).

Размеры капель в регистрационных областях видеogramм определялись с использованием оптического метода IPI [121]. Капли многократно освещались «ножом» 18. Наблюдалась интерференция между отраженным и преломленным водой светом. Выполнялась процедура видеофиксации изображений с использованием кросскорреляционной камеры. По числу наблюдаемых на видеogramмах интерференционных полос определялись размеры капель в потоке газов [121].

Начальная температура воды  $T_w$  и температура поверхности образца ЛГМ  $T$  измерялась хромель-алюмелевыми термопарами. Использовалась методика термопарных измерений [125]. Систематические погрешности измерения температуры  $T$  и  $T_w$  не превысили 2,5 % [125], размеров капель – 1,5 % [126], скоростей «трассеров» – 2 % [121]. Максимальные случайные погрешности измерения температур составляли не более 19 %.

## **2.2 Физические и математические модели термического разложения в условиях интенсивных фазовых превращений**

В диссертации разработана группа моделей для анализа наиболее типичных современным технологиям пожаротушения условий теплообмена у поверхности ЛГМ при термическом разложении последнего. Рассматривались схемы, представленные на рис. 2.2.1–2.2.5.

При постановке задачи физико-химических превращений [127–129] (рис. 2.2.1) предполагалось, что водяной массив (большая совокупность капель воды) полностью испарился при движении через пламя, и над поверхностью типичного ЛГМ сформировалась смесь водяных паров и продуктов сгорания с некоторой известной температурой  $T_m$ .

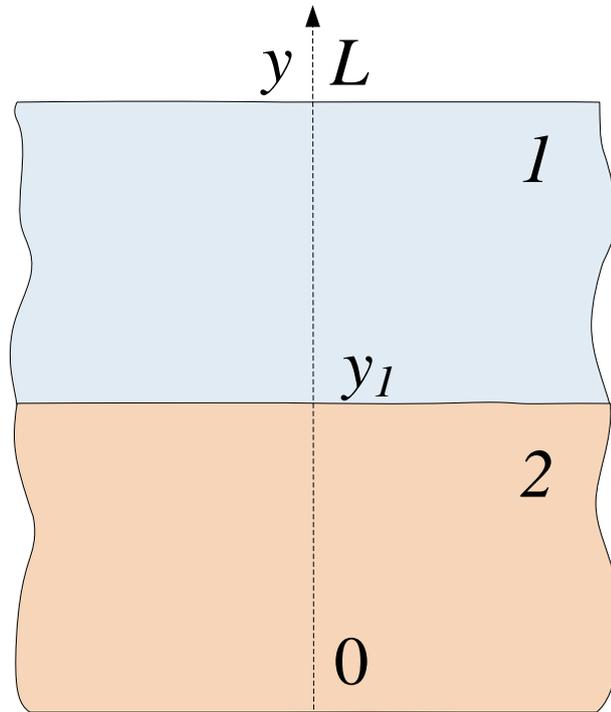


Рисунок 2.2.1. Схема области решения задач при  $0 < t < t_d$  для парогазовой смеси над ЛГМ: 1 – смесь продуктов сгорания и водяных паров, 2 – нагретый до высоких температур приповерхностный слой ЛГМ

Можно отметить, что согласно результатам [76, 130] в малой окрестности следа типичного «водяного снаряда» концентрации окислителя близки к нулю за счет интенсивного парообразования и вдува водяных паров. Принималось, что парогазовая смесь состоит из водяных паров (90 %) и продуктов сгорания (10 %) [76, 130]. Поэтому при моделировании процессов теплопереноса в газовой фазе не учитывались возможные реакции окисления продуктов термического разложения ЛГМ.

Математическая модель нестационарных дифференциальных уравнений теплопереноса в частных производных для системы «ЛГМ – смесь продуктов сгорания и водяных паров» (рис. 2.2.1) согласно основным положениям [131, 132] при  $0 < t < t_d$  имеют следующий вид.

Уравнение энергии для парогазовой смеси ( $y_1 < y < L$ ):

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2}. \quad (2.2.1)$$

Уравнение энергии для слоя ЛГМ ( $0 < y < y_1$ ):

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + Q_2 W_2. \quad (2.2.2)$$

Уравнение химического реагирования в прогретом слое ЛГМ ( $0 < y < y_1$ ):

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = (1 - \varphi_2) k_2^0 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2}\right), \quad (2.2.3)$$

Здесь  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – теплоемкость, Дж/(кгК);  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(мК);  $Q$  – тепловой эффект термического разложения, Дж/кг;  $W$  – массовая скорость термического разложения, кг/(м<sup>3</sup>с);  $\varphi$  – относительная доля способного к термическому разложению вещества;  $k^0$  – предэкспонент реакции термического разложения, с<sup>-1</sup>;  $E$  – энергия активации реакции термического разложения, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(мольК); индексы: 1 – парогазовая смесь, 2 – ЛГМ.

Начальные условия ( $t=0$ ):

$$\varphi_2 = \varphi_0, \quad T_2 = T_0(x) \quad \text{при } 0 < y < y_1;$$

$$T_1 = T_m \quad \text{при } y_1 < y < L,$$

где  $\varphi_0$  – начальная доля термически разлагающегося компонента;  $T_0(x)$  – начальная температура ЛГМ (принималась согласно распределению, приведенному на рис. 3.2.1), К;  $T_m$  – начальная температура парогазовой смеси, К.

Граничные условия при  $0 < t \leq t_d$ :

$$y=0 \quad \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0; \quad (2.2.4)$$

$$y=L \quad T_1 = T_m; \quad (2.2.5)$$

$$y=y_1 \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} - Q_2 W_2^\Sigma = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad (2.2.6)$$

$$T_2 = T_1,$$

где  $W_2^\Sigma = \int_{y=0}^{y=y_1} \varphi_2 \rho_2 k_2^0 \exp(-\frac{E_2}{RT_2}) dy$ .

Объемные доли компонентов газовой смеси вычислялись из следующих выражений:

$$\varphi_4 = (C_g / \rho_4) / ((C_0 / \rho_5) + (C_g / \rho_4) + (C_w / \rho_6)), \quad (2.2.7)$$

$$\varphi_5 = (C_0 / \rho_5) / ((C_0 / \rho_5) + (C_g / \rho_4) + (C_w / \rho_6)), \quad (2.2.8)$$

$$\varphi_6 = 1 - \varphi_4 - \varphi_5, \quad (2.2.9)$$

где индексы «4», «g» соответствуют газообразным продуктам термического разложения; «5», «0» – воздуху, «6», «w» – парам воды.

Теплофизических характеристик газовой смеси вычислялись с учетом концентраций компонентов:

$$\lambda_1 = \lambda_5 \varphi_5 + \lambda_4 \varphi_4 + \lambda_6 \varphi_6, \quad (2.2.10)$$

$$C_1 = C_5 \varphi_5 + C_4 \varphi_4 + C_6 \varphi_6, \quad (2.2.11)$$

$$\rho_1 = \rho_5 \varphi_5 + \rho_4 \varphi_4 + \rho_6 \varphi_6. \quad (2.2.12)$$

При рассмотрении системы «смесь продуктов сгорания и водяных паров – нагретый до высоких температур ЛГМ» (рис. 2.2.1) температура парогазовой смеси варьировалась в диапазоне  $T_m=280-340$  К. Толщина приповерхностного слоя ЛГМ изменялась в диапазоне  $L_f=35-80$  мм. Размеры области решения изменялись в зависимости от значений  $L_f$  в диапазонах  $H=0,1-0,5$  м и  $L=0,1-0,5$  м.

Численное моделирование исследуемого процесса проводилось при следующих значениях параметров [2, 34, 133–136]: начальная температура приповерхностного слоя ЛГМ  $T_0(x)$  принималась в виде распределения, приведенного на рис. 3.2.1; температура начала термического разложения ЛГМ  $T_d=500$  К; параметры химической реакции  $k_2^0=3,63 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ,  $E_2=78,114$  кДж/моль,  $Q_2=10^3$  Дж/кг,  $\varphi_0=1$ . Теплофизические характеристики взаимодействующих веществ принимались следующими [133–136]: ЛГМ

(хвоя сосны) –  $\lambda_2=0,102$  Вт/(мК),  $C_2=1400$  Дж/(кгК),  $\rho_2=500$  кг/м<sup>3</sup>; парогазовая смесь –  $\lambda_1=0,026$  Вт/(мК),  $C_1=1190$  Дж/(кгК),  $\rho_1=1,161$  кг/м<sup>3</sup>.

Модель (2.2.1) – (2.2.6) позволила проанализировать влияние температуры парогазовой смеси и толщины прогретого приповерхностного слоя на процесс прекращения реакции термического разложения ЛГМ.

Для системы, представленной на рис. 2.2.2, предполагалось [127, 137, 138], что водяной массив прошел через пламя, и вода равномерно растеклась по поверхности ЛГМ. В результате образовалась пленка жидкости фиксированных размеров (толщина  $L_w$ ).

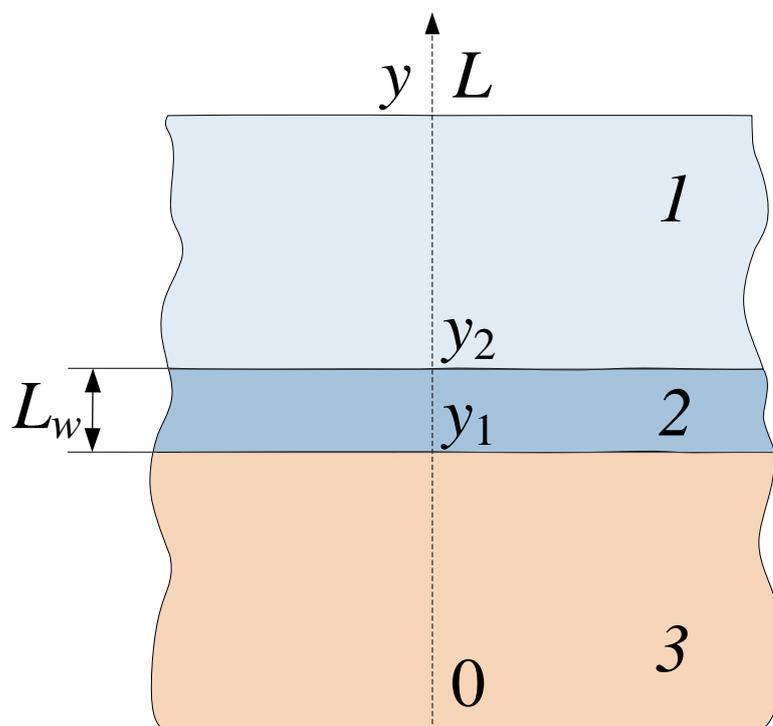


Рисунок 2.2.2. Схема области решения задач теплопереноса при  $0 < t < t_d$  при испарении однородной пленки воды на поверхности ЛГМ:

1 – парогазовая смесь, 2 – пленка воды, 3 – ЛГМ

На основании заключений [2, 3, 34] считалось, что жидкость прогревается за счет теплообмена с термически разлагающимся ЛГМ. На границе «пленка воды – ЛГМ» при достижении условий фазового перехода происходит парообразование (испарение). За счет теплоты эндотермического

фазового перехода температура ЛГМ снижается. В процессе интенсивного парообразования толщина пленки жидкости уменьшается. Фиксировалось время ( $t_d$ ) снижения температуры ЛГМ относительно температуры начала термического разложения  $T_d$ . Величина  $t_d$  иллюстрирует время прекращения реакции термического разложения ЛГМ. Также вычислялась толщина испарившегося слоя жидкости  $L_e$ , которая иллюстрирует массу жидкости, необходимую для прекращения пиролиза ЛГМ.

Математическая модель, соответствующая принятой постановке задачи (рис. 2.2.2), для рассматриваемой системы отличается от системы (2.2.1) – (2.2.6) уравнением теплопроводности для пленки воды (2.2.13).

Уравнение теплопроводности для пленки воды ( $y_1 < y < y_2$ ):

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2}. \quad (2.2.13)$$

Начальные условия ( $t=0$ ):

$$\varphi_3 = \varphi_0(x), \quad T_3 = T_0(x) \quad \text{при } 0 < y < y_1;$$

$$T_1 = T_n \quad \text{при } y_1 < y < L,$$

где  $T_n$  – начальная температура воды и парогазовой смеси, К.

Граничные условия при  $0 < t \leq t_d$ :

$$y=0 \quad \frac{\partial T_3}{\partial y} = 0; \quad (2.2.14)$$

$$y=L \quad \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0; \quad (2.2.15)$$

$$y=y_1 \quad -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} - Q_3 W_3^\Sigma = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} + Q_2 W_2, \quad (2.2.16)$$

$$T_3 = T_2;$$

$$y=y_2 \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad (2.2.17)$$

$$T_2 = T_1,$$

$$\text{где } W_3^\Sigma = \int_{y=0}^{y=y_1} \varphi_3 \rho_3 k_3^0 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_3}\right) dx.$$

Теплофизические характеристики приповерхностного слоя ЛГМ вычислялись с учетом реакции термического разложения:

$$\lambda_3 = \lambda_{31} \varphi_3 + \lambda_{32} (1 - \varphi_3), \quad (2.2.18)$$

$$C_3 = C_{31} \varphi_3 + C_{32} (1 - \varphi_3), \quad (2.2.19)$$

$$\rho_3 = \rho_{31} \varphi_3 + \rho_{32} (1 - \varphi_3), \quad (2.2.20)$$

где индексы «31» и «32» соответствуют непрореагировавшему ЛГМ и продуктам его термического разложения.

Скорость термического разложения ЛГМ вычислялась по формуле [132]:

$$W_3 = \varphi_3 \rho_3 k_3^0 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_3}\right). \quad (2.2.21)$$

Численное моделирование исследуемых процессов при следующих значениях параметров [83, 133, 134, 136, 139–141]: начальная температура воды и парогазовой смеси  $T_n = 300$  К; профили  $T_0(x)$  и  $\varphi_0(x)$  задавались в соответствии с результатами решения задачи [138] в виде распределений, приведенных на рис. 3.3.1; температура начала термического разложения ЛГМ  $T_d = 500$  К; параметры химической реакции ЛГМ принимались следующими: (листья березы) –  $k_3^0 = 4,09 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>,  $E_3 = 88,13$  кДж/моль,  $Q_3 = 1,14 \cdot 10^3$  Дж/кг; (хвоя сосны) –  $k_3^0 = 3,63 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>,  $E_3 = 78,221$  кДж/моль,  $Q_3 = 1,02 \cdot 10^3$  Дж/кг; (хвоя ели) –  $k_3^0 = 2,786 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>,  $E_3 = 60,03$  кДж/моль,  $Q_3 = 0,782 \cdot 10^3$  Дж/кг; безразмерный коэффициент конденсации (испарения)  $\beta = 0,1$ ; молярная масса воды  $M = 18$  кг/кмоль; тепловой эффект испарения воды  $Q_e = 2,26$  МДж/кг. Толщина приповерхностного слоя ЛГМ варьировалась в диапазоне  $L_f = 0,02–0,06$  мм. Толщина пленки жидкости принималась равной  $L_w = 0,01$  мм. Размер области решения изменялся в зависимости от значений  $L_f$  в диапазоне  $L = 0,02–0,2$  м.

Теплофизические характеристики взаимодействующих веществ [83, 133, 134, 136, 139]: ЛГМ (листья березы) –  $\lambda_{31}= 0,150$  Вт/(мК),  $C_{31}= 1250$  Дж/(кгК),  $\rho_{31}= 600$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_{32}= 0,024$  Вт/(мК),  $C_{32}= 2026$  Дж/(кгК),  $\rho_{32}= 2,2$  кг/м<sup>3</sup>; (хвоя сосны) –  $\lambda_{31}=0,102$  Вт/(мК),  $C_{31}=1397$  Дж/(кгК),  $\rho_{31}=320$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_{32}= 0,027$  Вт/(мК),  $C_{32}= 2280$  Дж/(кгК),  $\rho_{32}= 2,5$  кг/м<sup>3</sup>; (хвоя ели) –  $\lambda_{31}=0,110$  Вт/(мК),  $C_{31}=2300$  Дж/(кгК),  $\rho_{31}=740$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_{32}= 0,029$  Вт/(мК),  $C_{32}= 2449$  Дж/(кгК),  $\rho_{32}= 2,7$  кг/м<sup>3</sup>; вода –  $\lambda_2=0,56$  Вт/(мК),  $C_2=4200$  Дж/(кгК),  $\rho_2=1000$  кг/м<sup>3</sup>; парогазовая смесь –  $\lambda_1=0,026$  Вт/(мК),  $C_1=1190$  Дж/(кгК),  $\rho_1=1,161$  кг/м<sup>3</sup>.

Для системы «ЛГМ – вода с твердыми включениями» область решения рассматриваемой задачи [142] представлена на рисунке 2.2.3.

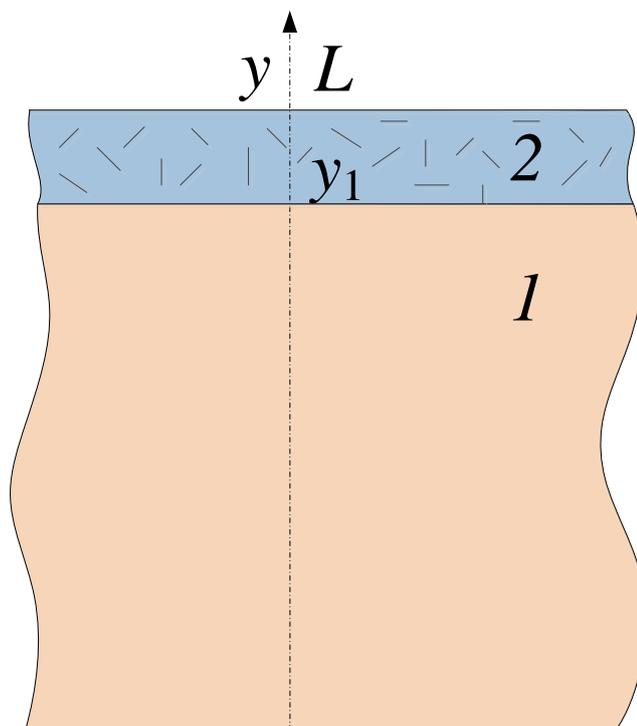


Рисунок 2.2.3. Схема области решения задач теплопереноса при  $0 < t < t_d$  при испарении пленки воды с твердыми включениями:

$1$  – ЛГМ,  $2$  – вода с твердыми включениями («буферный слой»)

Предполагалось, что «водяной снаряд» [65, 85] прошел через пламя, частично испарился и достиг поверхности ЛГМ. Рассматривались три

варианта ЛГМ: листья березы, хвоя сосны и ели. Считалось, что вместе с жидкостью достигли поверхности ЛГМ и листья, ветки деревьев, кора ствола дерева, хвоя. Таким образом, между слоем ЛГМ с температурой  $T \gg T_d$  и следом «водяного снаряда» формируется гетерогенная система – вода с твердыми включениями. На границе «ЛГМ – вода с твердыми включениями» при достижении условий фазового перехода интенсифицируется парообразование. За счет теплоты эндотермического фазового перехода и кондуктивного теплообмена температура ЛГМ снижается. По результатам численного моделирования определялось время ее уменьшения до температуры начала термического разложения  $T_d$ . Оценивалось влияние толщины «буферного слоя» на характерные времена прекращения реакции термического разложения.

Математическая модель, соответствующая принятой постановке задачи (рис. 2.2.3), отличалась от системы (2.2.13) – (2.2.21) учетом теплофизических характеристик «буферного слоя», характеризующих долю жидкости в последнем, и конвективного теплообмена (граничное условие 2.2.23) на границе буферного слоя.

Начальные условия ( $t=0$ ):

$$\varphi_1 = \varphi_0(x), T_1 = T_0(x) \text{ при } 0 < y < y_1;$$

$$T_1 = T_n \text{ при } y_1 < y < L.$$

Граничные условия при  $0 \leq t \leq t_d$ :

$$y=0 \quad \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0; \quad (2.2.22)$$

$$y=L \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \alpha(T_1 - T_m); \quad (2.2.23)$$

$$y=y_1 \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} - Q_1 W_1^\Sigma = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} + Q_2 W_2, \quad (2.2.24)$$

$$T_1 = T_2;$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $T_m$  – температура в следе «водяного снаряда», К;  $Q_2$  – тепловой эффект испарения воды, Дж/кг;  $W_2$  –

массовая скорость испарения, кг/(м<sup>2</sup>с);  $W_1^\Sigma = \int_{y=0}^{y=y_1} \phi_1 \rho_1 k_1^0 \exp(-\frac{E_1}{RT_1}) dx$

(аналогично [142]).

Теплофизические характеристики «буферного слоя» вычислялись с учетом доли жидкости в этом слое ( $\gamma$ ):

$$\lambda_2 = \lambda_{21}\gamma + \lambda_{11}(1-\gamma), \quad (2.2.25)$$

$$C_2 = C_{21}\gamma + C_{11}(1-\gamma), \quad (2.2.26)$$

$$\rho_2 = \rho_{21}\gamma + \rho_{11}(1-\gamma), \quad (2.2.27)$$

где индекс «21» соответствует воде.

Для вычисления массовой скорости испарения воды использовалось выражение [142]:

$$W_2 = \frac{\beta}{1 - k_\beta \beta} \frac{(P^n - P)}{\sqrt{2\pi RT_{2s} / M}}, \quad (2.2.28)$$

где  $\beta$  – безразмерный коэффициент испарения;  $k_\beta$  – безразмерный коэффициент ( $k_\beta \approx 0,4$  [142]);  $P^n$  – давление насыщенных паров воды, Н/м<sup>2</sup>;  $P$  – давление паров воды вблизи границы испарения, Н/м<sup>2</sup>;  $T_{2s}$  – температура на границе «ЛГМ – вода с твердыми включениями», К;  $M$  – молярная масса воды, кг/кмоль.

Для системы «вода с твердыми включениями – ЛГМ» (рис. 2.2.3) численные исследования выполнены при коэффициенте теплообмена  $\alpha=5-40$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Такие значения  $\alpha$  соответствуют как условиям водяного, так и воздушного охлаждения поверхности ЛГМ. Температура в следе водяного массива принималась  $T_m=350$  К. Толщина «буферного слоя» составляла  $L_{w-f}=0,002-0,01$  м. Характерный размер области решения изменялся в зависимости от значений  $L_f$  и  $L_{w-f}$  в диапазоне  $L=0,04-0,12$  м.

В системе «вода в порах приповерхностного слоя – ЛГМ» [143, 144] (рис. 2.2.4.) предполагалось, что массив воды (большая совокупность капель)

прошел через пламя, и жидкость равномерно распределилась в приповерхностном слое ЛГМ. Анализировались два возможных механизма теплопереноса в окрестности границы «ЛГМ – вода». В первом случае моделировались процессы при прохождении всей воды в поры прогретого до  $T > T_d$  слоя ЛГМ. Считалось, что над поверхностью ЛГМ формируется парогазовая смесь с некоторой температурой, соответствующей типичным следам «водяных снарядов» (от 300 К до 450 К) [74, 76]. Во втором случае моделирование выполнялось для системы, в которой вода заполнила поры приповерхностного слоя ЛГМ и над этим слоем образовалась пленка воды.

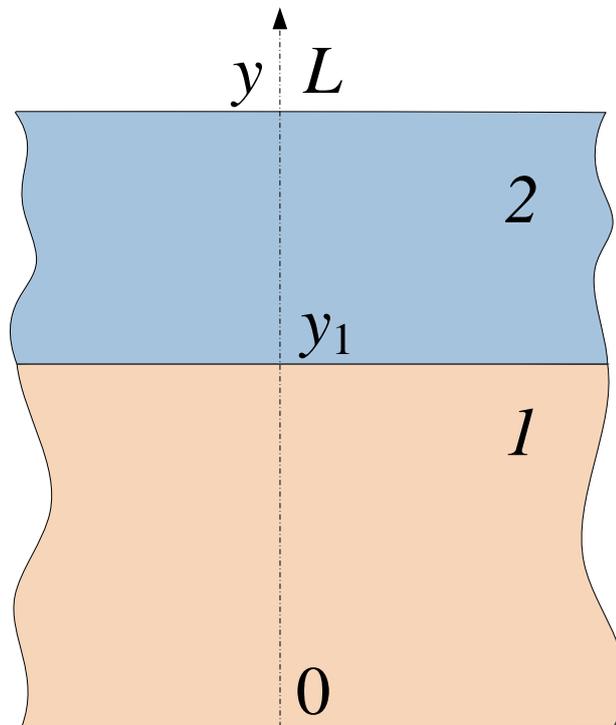


Рисунок 2.2.4. Схема области решения задач теплопереноса при  $0 < t < t_d$  при проникновении воды в поры ЛГМ: 1 – сухой ЛГМ с  $T > T_d$ , 2 – слой ЛГМ с порами, заполненными водой

Предполагалось, что на границе «вода – термически разлагающийся ЛГМ» ( $y=y_1$ ) при достижении условий фазового перехода происходит испарение. За счет теплоты эндотермического фазового превращения температура ЛГМ снижается. Вычислялось время снижения температуры

ЛГМ до температуры начала термического разложения  $T_d$ . Оценивалось влияние толщины слоя ЛГМ с водой в порах, а также внешних условий теплообмена на характерные времена  $t_d$ .

При решении данной задачи в отличие от схемы на рис. 2.2.3 теплофизические характеристики ЛГМ определялись, как эффективные, с учетом ЛГМ и воды. В частности, теплофизические характеристики слоя ЛГМ с порами, заполненными водой, рассчитывались с учетом коэффициента  $\gamma$ , соответствующего относительной доле жидкости:

$$\lambda_2 = \lambda_{21}\gamma + \lambda_{11}(1-\gamma), \quad (2.2.29)$$

$$C_2 = C_{21}\gamma + C_{11}(1-\gamma), \quad (2.2.30)$$

$$\rho_2 = \rho_{21}\gamma + \rho_{11}(1-\gamma), \quad (2.2.31)$$

где индекс «21» соответствует воде.

Численное моделирование исследуемых процессов проводилось при следующих значениях параметров [112, 130, 131, 137, 142, 145]: температура в следе «водяного снаряда»  $T_m=300-350$  К. Толщина слоя ЛГМ с водой в порах составляла  $L_{w-h}=0,001-0,003$  м. Характерный размер области решения изменялся в зависимости от значений  $L_f$  и  $L_{w-h}$  в диапазоне  $L=0,04-0,12$  м.

При постановке задачи [146, 122] в системе «группа капель воды – ЛГМ» (рис. 2.2.5) предполагалось, что «водяной снаряд» (большая совокупность капель воды) прошел через пламя и испарился. Поверхности интенсивно пиролизующегося ЛГМ достигла лишь малая группа капель.

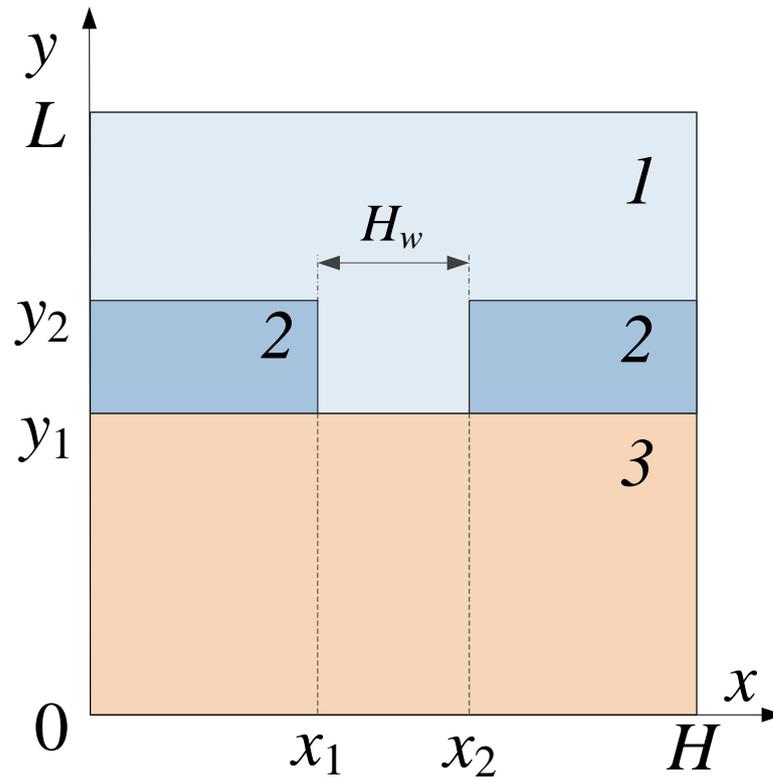


Рисунок 2.2.5. Схема области решения задач теплопереноса при  $0 < t < t_d$  для двух капель на поверхности ЛГМ:

1 – парогазовая смесь, 2 – капли воды, 3 – ЛГМ

В общем случае возможны различные расстояния между отдельными каплями воды на поверхности термически разлагающегося ЛГМ. Из всего многообразия вероятных расположений группы капель на поверхности ЛГМ наиболее значимым для последующего анализа является вариант двух капель (рис. 2.2.5), находящихся на определенном расстоянии друг от друга ( $H_w = x_2 - x_1$ ). Все остальные схемы являются модификацией варианта двух соседних капель.

Математическая модель нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений тепломассопереноса в частных производных при  $0 < t < t_d$  для системы «группа капель воды – ЛГМ» (рис. 2.2.5), соответствующие сформулированной физической постановке задачи, имеют следующий вид.

Уравнение энергии для ЛГМ ( $0 < x < H, 0 < y < y_1$ ):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right) + Q_3 W_3. \quad (2.2.32)$$

Уравнение химического реагирования в прогретом слое ЛГМ ( $0 < x < H$ ,  $0 < y < y_1$ ):

$$\frac{d\varphi_3}{dt} = (1 - \varphi_3) k_3^0 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_3}\right). \quad (2.2.33)$$

Уравнение теплопроводности для капель воды ( $0 < x < x_1$ ,  $x_2 < x < H$ ,  $y_1 < y < y_2$ ):

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right). \quad (2.2.34)$$

Уравнение энергии для парогазовой смеси ( $x_1 < x < x_2$ ,  $y_1 < y < y_2$ ,  $0 < x < H$ ,  $y_2 < y < L$ ):

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right). \quad (2.2.35)$$

Уравнение диффузии продуктов термического разложения ЛГМ ( $x_1 < x < x_2$ ,  $y_1 < y < y_2$ ,  $0 < x < H$ ,  $y_2 < y < L$ ):

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = D_{11} \left( \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_f}{\partial y^2} \right). \quad (2.2.36)$$

Уравнение диффузии паров воды ( $x_1 < x < x_2$ ,  $y_1 < y < y_2$ ,  $0 < x < H$ ,  $y_2 < y < L$ ):

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} = D_{12} \left( \frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} \right). \quad (2.2.37)$$

Здесь  $C_f$  – безразмерная концентрация газообразных продуктов термического разложения ЛГМ;  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C_v$  – безразмерная концентрация паров воды; индексы: 1 – парогазовая смесь, 2 – вода, 3 – ЛГМ, 11 – водяной пар, 12 – газообразные продукты термического разложения.

Начальные ( $t=0$ ) условия (рис. 2.2.5):  $T=T_0(x, y)$  и  $\varphi_3=\varphi_0(x, y)$  при  $0 < x < H$ ,  $0 < y < y_1$ ;  $T=T_w$  при  $0 < x < x_1$ ,  $x_2 < x < H$ ,  $y_1 < y < y_2$ ;  $T=T_m$ ,  $C_v=0$ ,  $C_f=0$  при  $x_1 < x < x_2$ ,  $y_1 < y < y_2$ ,  $0 < x < H$ ,  $y_2 < y < L$ . Здесь  $T_0(x, y)$ ,  $\varphi_0(x, y)$  – начальные распределения температуры и доли способного к термическому разложению вещества в ЛГМ;  $T_w$  – начальная температуры капель воды, К;  $T_m$  – начальная температура парогазовой смеси, К.

Граничные условия при  $0 < t < t_d$  (рис. 2.2.5):

$$x=0, x=H, 0 < y < y_1 \quad \frac{\partial T_3}{\partial x} = 0; \quad (2.2.38)$$

$$x=0, x=H, y_1 < y < y_2 \quad \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0; \quad (2.2.39)$$

$$x=0, x=H, y_2 < y < L \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C_v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C_f}{\partial x} = 0; \quad (2.2.40)$$

$$y=0, 0 < x < H \quad \frac{\partial T_3}{\partial y} = 0; \quad (2.2.41)$$

$$y=y_1, 0 < x < x_1, x_2 < x < H \quad -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} - Q_3 W_3 - Q_2 W_2 = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}; \quad (2.2.42)$$

$$y=y_1, x_1 < x < x_2 \quad -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} - Q_3 W_3 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad \frac{\partial C_f}{\partial y} = \frac{W_3 \Sigma}{\rho_{11} D_{11}}, \quad \frac{\partial C_v}{\partial y} = 0; \quad (2.2.43)$$

$$x=x_1, x=x_2, y_1 < y < y_2 \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - Q_2 W_2 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}, \quad \frac{\partial C_v}{\partial x} = \frac{W_2}{\rho_{12} D_{12}}, \quad \frac{\partial C_f}{\partial x} = 0; \quad (2.3.44)$$

$$y=y_2, 0 < x < x_1, x_2 < x < H \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} - Q_2 W_2 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad \frac{\partial C_v}{\partial y} = \frac{W_2}{\rho_{12} D_{12}}, \quad \frac{\partial C_f}{\partial y} = 0; \quad (2.2.45)$$

$$y=L, 0 < x < H \quad \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 C_f}{\partial y^2} = 0, \quad (2.2.46)$$

где  $Q_2$  – тепловой эффект испарения, Дж/кг;  $W_2$  – массовая скорость испарения, кг/(м<sup>2</sup>с).

Массовая скорость испарения жидкости вычислялась по формуле [142]:

$$W_2 = \frac{\beta}{1 - k_\beta \beta} \frac{(P^n - P)}{\sqrt{2\pi R T_{2s} / M}}, \quad (2.2.47)$$

где  $\beta$  – безразмерные коэффициенты (эмпирические константы) испарения [147];  $P^n$  – давление насыщенных паров воды, Н/м<sup>2</sup>;  $P$  – давление паров воды вблизи границы испарения, Н/м<sup>2</sup>;  $T_{2s}$  – температура на границе испарения жидкости, К;  $M$  – молярная масса, кг/кмоль.

Безразмерные параметры  $\beta$  и  $k_\beta$  принимались равными 0,1 и 0,4 в соответствии с результатами исследований [76, 84].

Для вычисления массовой скорости термического разложения ЛГМ использовалось выражение [142]:

$$W_3 = \varphi_3 \rho_3 k_3^0 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_3}\right). \quad (2.2.48)$$

Коэффициент диффузии продуктов термического разложения ЛГМ в воздухе вычислялся по интерполяционной формуле [134]:

$$D_{11} = D_0 (T_{12}/273)^n, \quad (2.2.49)$$

здесь  $D_0$  и  $n$  – постоянные ( $D_0=0,812$  см<sup>3</sup>/сек,  $n=1,7$ ).

Коэффициент диффузии паров воды вычислялся по интерполяционной формуле [147]:

$$D_{12} = D_0 (T_{11}/273)^n, \quad (2.2.50)$$

здесь  $D_0$  и  $n$  – постоянные ( $D_0=0,216$  см<sup>3</sup>/сек,  $n=1,8$ ).

Давление паров воды рассчитывалось по уравнению Клапейрона-Менделеева [148].

Для учета вдува паров воды и продуктов термического разложения в системе, приведенной на рис. 2.2.5, из-под капель применялись алгоритмы и методы, описанные в [149, 150].

Теплофизические характеристики ЛГМ вычислялись с учетом их изменения в процессе пиролиза:

$$\lambda_3 = \lambda_{31}\varphi_3 + \lambda_{32}(1-\varphi_3), \quad (2.2.51)$$

$$C_3 = C_{31}\varphi_3 + C_{32}(1-\varphi_3), \quad (2.2.52)$$

$$\rho_3 = \rho_{31}\varphi_3 + \rho_{32}(1-\varphi_3), \quad (2.2.53)$$

где индексы: 31, 32 – твердые и газообразные продукты пиролиза ЛГМ.

Для модели «группа капле воды – ЛГМ» (рис. 2.5.5) выполнены численные исследования при температуре парогазовой смеси  $T_m=300-800$  К. Продольные и поперечные размеры капле варьировались в диапазоне  $H_{dr}=0,01-0,05$  м при  $L_{dr}=0,01$  м, а расстояние между каплями – в диапазоне  $H_w=0,001-0,09$  м. Характерные размеры области решения изменялись в

зависимости от значений  $H_{dr}$ ,  $H_w$  и  $L_f$  в диапазонах  $H=0,05-0,1$  м,  $L=0,05-0,1$  м.

Численный анализ исследуемых физико–химических процессов выполнен при следующих допущениях, не накладывающих существенных ограничений на общность постановки задач:

1. В соответствии с результатами [35, 151] принято, что в малой окрестности следа типичного водяного массива концентрация окислителя близка к нулю за счет достаточно интенсивного парообразования.
2. Принималось, что парогазовая смесь состоит из водяных паров (90 %) и продуктов сгорания (10 %) [35, 151].
3. При моделировании процессов теплопереноса в газовой фазе не учитывались возможные реакции окисления продуктов пиролиза ЛГМ.
4. При постановке задач теплопереноса предполагалось, что теплофизические характеристики ЛГМ и воды не зависят от температуры.

### 2.3 Методы численного решения

На примере двумерной модели, приведенной на рис. 2.2.5, ниже приведено описание разработанного алгоритма (использовался при решении всех задач диссертации). Также приведены выбранные методы численного решения дифференциальных уравнений (энергии, диффузии, термического разложения), описывающих процесс прекращения реакции термического разложения ЛГМ в условиях интенсивных фазовых превращений.

Для решения всех задач использован метод конечных разностей [131]. Дифференциальные уравнения (2.2.32) – (2.2.37) с соответствующими начальными и граничными условиями (2.2.38) – (2.2.46) заменялись их разностными аналогами. Полученная система алгебраических уравнений решалась методом прогонки [145, 152–156].

При использовании локально–одномерного метода выполнялся переход к разностной форме двумерных дифференциальных уравнений [145].

Для решения одномерных разностных уравнений применялся метод прогонки с использованием неявной четырехточечной схемы [157]. Нелинейные уравнения решались методом итераций [157]. Для повышения точности решения использовалась «неравномерная» в малой окрестности границы раздела «ЛГМ – внешняя среда» разностная сетка. Количество узлов по каждой из координат выбиралось от 200 до 400. Вычисления проводились сквозной прогонкой через всю область решения задачи (рис. 2.2.5).

При решении системы дифференциальных уравнений (2.2.32) – (2.2.37) с соответствующими краевыми условиями использовались шаги по времени ( $10^{-4} \div 10^{-2}$  с) и координатам ( $10^{-8} \div 10^{-6}$  м). Методика оценки достоверности результатов выполненных теоретических исследований, основанная на проверке консервативности применяемой разностной схемы, аналогична [149, 150].

Алгоритм решения:

1. Строился итерационный цикл на каждом шаге по времени для расчета температурного поля в области моделирования (рис. 2.2.5). В качестве начального приближения задавалось значение температуры на предшествующем временном слое. Итерационный цикл заканчивался при достижении условия:

$$\max |T^{(s)} - T^{(s-1)}| \leq \delta, \quad (2.3.1)$$

где  $\delta$  – допустимое отклонение результатов вычислений температуры, К;  $s$  – номер итерации.

Если по завершению одной итерации условие (2.3.1) не выполнялось, приближение  $T^{(s)}$  задавалось в качестве начального в системе разностных аналогов решаемых уравнений для расчета следующего приближения  $T^{(s-1)}$ . При достижении допустимого отклонения выполнялся переход к следующему временному слою.

С целью выполнения условия сходимости итераций при высоких скоростях протекания физико-химических процессов схема итерационного алгоритма дополнялась процедурой «усреднения итераций» [158]. Вводился

коэффициент усреднения итераций  $\gamma$ . Значение искомой функции  $T^{(s+1)}$ , используемой на каждой последовательной итерации отличалось от вычисленного на предшествующей итерации значения  $T^{(s)}$  и вычислялось для каждого узла разностной сетки по формуле:

$$T_*^{(s+1)} = T^{(s)} + \gamma(T^{(s+1)} - T^{(s)}), 0 < \gamma < 1. \quad (2.3.2)$$

Описанная процедура обеспечивала сходимость.

Максимальная допустимая величина  $\delta$  при вычислении температуры принималась равной  $\delta=1$  К на каждом шаге итерации.

2. Концентрации газообразных продуктов термической деструкции ЛГМ и паров воды вычислялись в результате решения уравнений диффузии.

3. После вычисления концентраций компонентов газовой смеси вычислялись значения теплофизических характеристик.

4. В завершение одного шага по времени проверялось выполнение условий окончания вычислений по критерию снижения температуры ЛГМ до значений, не превышающих температуру начала термического разложения ( $T < T_p$ ). В случае невыполнения условий завершения процесса вычислений выполнялся переход на следующий временной слой, и определялись поля температуры, концентраций компонентов газовой смеси, проверялась достоверность полученных результатов и условий окончания вычислений по п. 1–4 сформулированного алгоритма.

В случае выполнения условий прекращения вычислений рассчитывалась продолжительность исследуемого процесса до прекращения реакции термического разложения  $t_d$  в рассматриваемой системе (рис. 2.2.5).

## **2.4 Алгоритм оценки достоверности результатов численного моделирования**

Для оценки адекватности результатов численного моделирования на каждом временном слое выполнялась проверка консервативности используемых разностных схем. Также проведено тестирование использовавшихся численных методов и разработанного алгоритма решения

систем нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями (п.2.2) на примере нескольких менее сложных задач теплопроводности. Кроме того, выполнены серии экспериментальных исследований. Результаты верификации теоретических следствий приведены в главе 3.

Проверка консервативности используемой разностной схемы выполнялась по выполнению закона сохранения энергии в области решения задачи (рис. 2.2.5).

Погрешность по балансу энергии (%) определялась из выражения:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{тр}} - Q_{\text{ЛГМ}} - Q_{\text{ф}} - Q_{\text{в}} - Q_{\text{ж}}}{Q_{\text{тр}}} \cdot 100, \quad (2.4.1)$$

где  $Q_{\text{тр}}$  – тепло, выделяющее в результате термического разложения ЛГМ, МДж/кг;  $Q_{\text{ЛГМ}}$  – тепло, отведенное от термически разлагающегося лесного горючего материала в воздух и жидкость, МДж/кг;  $Q_{\text{ф}}$  – тепло фазового перехода (испарения жидкости), МДж/кг;  $Q_{\text{в}}$  и  $Q_{\text{ж}}$  – тепло, аккумулированное в воздухе и жидкости, МДж/кг.

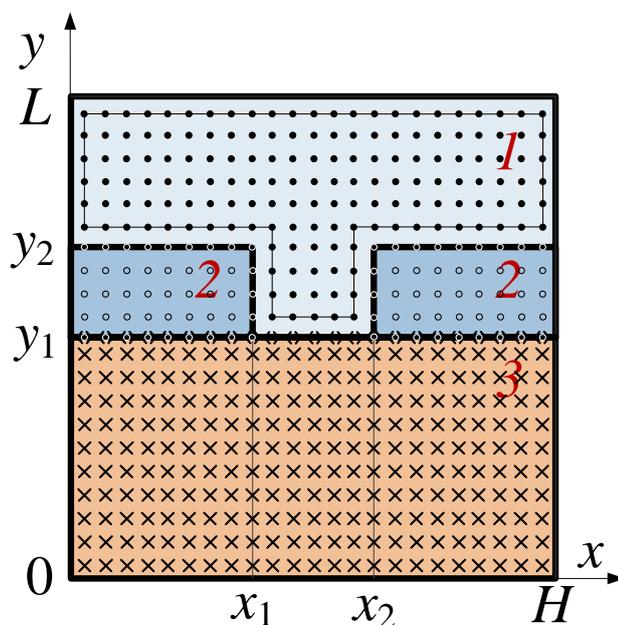


Рисунок 2.4.1. Область вычисления погрешности баланса энергии: 1 – парогазовая смесь, 2 – капли воды, 3 – ЛГМ

Тепло, выделяющее в результате термического разложения ЛГМ за время  $K \cdot \Delta t$ :

$$Q_{\text{тр}} = \sum_{j=1}^{N_{y1}} \sum_{i=1}^{N_x} Q_3 \cdot W_3 \cdot h_x \cdot h_y \cdot K \cdot \Delta t \quad (2.4.1)$$

Тепло, отведенное от термически разлагающегося ЛГМ в воздух и жидкость за время  $K \cdot \Delta t$ :

$$Q_{\text{ЛГМ}} = Q_{\text{от}}, \quad (2.4.2)$$

где  $Q_{\text{от}}$  – тепло, отведенное через нагреваемую поверхность ЛГМ:

$$Q_{\text{от}} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^x \lambda_3 \cdot [T^n(i, N_{y1}) - T_3^n] \cdot h_x \cdot \Delta t; \quad (2.4.3)$$

Энергия, поглощаемая при испарении жидкости:

$$\begin{aligned} Q_{\Phi} = & \sum_{i=1}^{N_{x1}} Q_u \cdot W_u \cdot h_x \cdot h_y \cdot K \cdot \Delta t |_{j=N_{y1}} + \sum_{i=1}^{N_{x1}} Q_u \cdot W_u \cdot h_x \cdot h_y \cdot K \cdot \Delta t |_{j=N_{y2}} + \\ & + \sum_{j=N_{y1}}^{N_{y2}} Q_u \cdot W_u \cdot h_x \cdot h_y \cdot K \cdot \Delta t |_{i=N_{x1}} + \sum_{i=N_{x2}}^x Q_u \cdot W_u \cdot h_x \cdot h_y \cdot K \cdot \Delta t |_{j=N_{y1}} + \\ & + \sum_{i=N_{x2}}^x Q_u \cdot W_u \cdot h_x \cdot h_y \cdot K \cdot \Delta t |_{j=N_{y2}} + \sum_{j=N_{y1}}^{N_{y2}} Q_u \cdot W_u \cdot h_x \cdot h_y \cdot K \cdot \Delta t |_{i=N_{x2}}; \end{aligned} \quad (2.4.4)$$

Тепло, аккумулированное в воздухе и жидкости за время  $K \cdot \Delta t$ :

$$\begin{aligned} Q_B = & \sum_{j=N_{y2}}^{N_y} \sum_{i=1}^x C_1 \cdot \rho_1 \cdot [T(i, j, k-1) - T(i, j, k)] \cdot h_x \cdot h_y + \\ & + \sum_{j=N_{y1}}^{N_{y2}} \sum_{i=N_{x1}}^{N_{x2}} C_1 \cdot \rho_1 \cdot [T(i, j, k-1) - T(i, j, k)] \cdot h_x \cdot h_y; \end{aligned} \quad (2.4.5)$$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{ж}} = & \sum_{j=N_{y1}}^{N_{y2}} \sum_{i=1}^{N_{x1}} C_2 \cdot \rho_2 \cdot [T(i, j, k-1) - T(i, j, k)] \cdot h_x \cdot h_y + \\
& + \sum_{j=N_{y1}}^{N_{y2}} \sum_{i=N_{x2}}^N C_2 \cdot \rho_2 \cdot [T(i, j, k-1) - T(i, j, k)] \cdot h_x \cdot h_y;
\end{aligned} \tag{2.4.6}$$

Здесь  $T(i, j, k-1)$  – температура на  $(k-1)$ -ом временном слое;  $T(i, j, k)$  – температура на  $k$ -ом временном слое;  $i$  и  $j$  – номера узлов координатной сетки по  $x$  и  $y$  соответственно;  $N_x$  и  $N_y$  – число узлов координатной сетки по  $x$  и  $y$  соответственно;  $\Delta t$  – шаг по времени;  $K$  – число шагов по времени.

Анализ влияния сеточных параметров на погрешность выполнения баланса энергии показал, что при  $\Delta t=0,01$  с для области решения размерами  $N_x=40$  мм и  $N_y=40$  мм сетка  $200 \times 200$  дает приемлемый результат (соответствует  $\delta=1$  К).

## 2.5 Решение тестовых задач

Поскольку результатов решений задач, аналогичных рассматриваемым в диссертации, до настоящего времени не опубликовано, тестирование алгоритма (п. 2.2) выполнено на примере группы менее сложных нестационарных нелинейных задач теплопроводности [157].

### 2.5.1 Одномерный теплоперенос в плоской бесконечной пластине с химической реакцией в материале

#### Физическая постановка

Рассматривается теплоперенос в пластине в условиях термического разложения [157] (рис. 2.5.1). Материал пластины – полимер ( $\lambda=0,7$  Вт/(м·К),  $\rho=1500$  кг/м<sup>3</sup>,  $C=750$  Дж/(кг·К)). На границах  $x=0$  и  $x=L$  приняты условия конвективного теплообмена с окружающей средой ( $\kappa=40$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $T^e=243$  К). Тепловой эффект химической реакции  $q_c=10^3$  Дж/кг, предэкспонент  $k_0=3 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>, энергия активации  $E_a=8 \cdot 10^4$  Дж/моль, универсальная газовая

постоянная  $R=8,31$  Дж/(моль·К). Начальная температура области решения  $T_0=298$  К. Толщина пластины  $L=0,2$  м. Рассчитывалось распределение температуры в пластине.

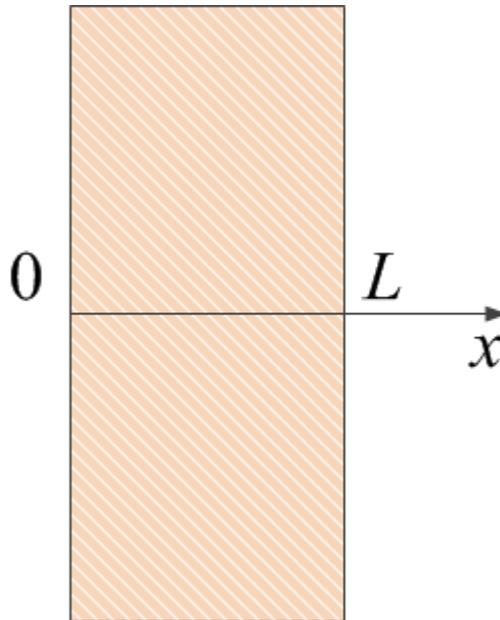


Рисунок 2.5.1. Геометрия задачи

### Математическая постановка

Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_c k_0 \rho \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad 0 < x < L. \quad (2.5.1)$$

Начальные и граничные условия:

$$t=0, \quad 0 \leq x \leq L: \quad T=T_0; \quad (2.5.2)$$

$$t>0, \quad x=0: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k_0(T^e - T); \quad (2.5.3)$$

$$t>0, \quad x=L: \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k_0(T^e - T). \quad (2.5.4)$$

### Результаты решения

Для оценки адекватности полученных значений температур в пластине в таблице 2.5.1 приведены результаты [157] и настоящей работы. На рисунке 2.5.2 представлены распределения температуры по толщине пластины в различные моменты времени (600, 1800 и 3600 с), полученные в результате

решения задачи с шагом по координате  $h_x=1\cdot 10^{-4}$  м и шагом по времени  $\Delta t=10^{-3}$  с.

Таблица 2.5.1. Результаты сравнения распределений температуры ( $T$ , К) при  $t=600$  с

$x$ , м	0,02	0,06	0,1	0,14	0,18	0,2
Настоящая работа	285,53	297,12	298	297,12	285,53	265,44
Результаты [157]	285,48	297,06	298	297,06	285,48	265,40
Отклонение, %	0,01	0,02	0	0,02	0,01	0,01

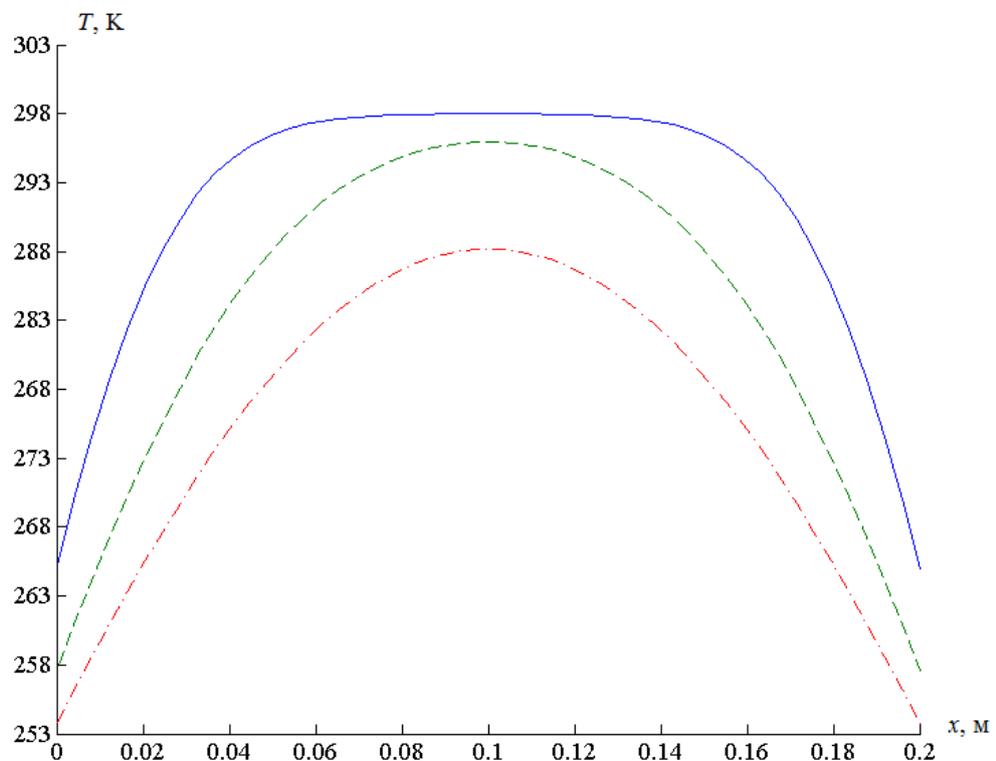


Рисунок 2.5.2. Распределения температуры (К) по толщине пластины в различные моменты времени ( — при  $t=600$  с, - - - при  $t=1800$  с, - · - · при  $t=3600$  с)

## 2.5.2. Одномерное уравнение теплопроводности с фазовым переходом на границе (испарение материала)

### Физическая постановка

Приведено моделирование процесса теплопроводности в пластине с сублимацией на двух границах трифторида алюминия  $AlF_3$  [157] (рис. 2.5.3). Толщина пластины  $L=0,3$  м. Начальная температура  $T_0=1273$  К. Теплофизические характеристики  $AlF_3$ :  $\lambda=60$  Вт/(м·К),  $\rho=3070$  кг/м<sup>3</sup>,  $C=1260$  Дж/(кг·К),  $M=0,084$  кг/моль.  $A=0,1$ ,  $P_0=10^5$ ,  $q=10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $Q_{исп}=3,8 \cdot 10^4$  Дж/кг. Рассчитывалось температурное поле в пластине через 60, 120, 300 секунд.

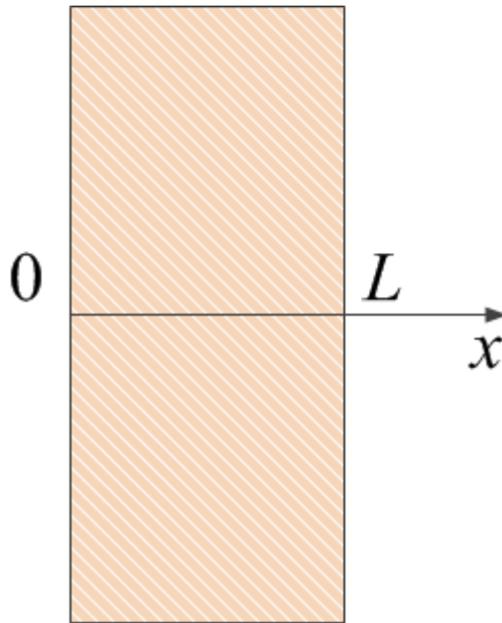


Рисунок 2.5.3. Геометрия задачи

Математическая модель

Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L. \quad (2.5.5)$$

Начальные и граничные условия:

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

$$x=0: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q - w_{исп} \cdot Q_{исп}, \quad t > 0; \quad (2.5.6)$$

$$x=L: \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q - w_{исп} \cdot Q_{исп}, \quad t > 0; \quad (2.5.7)$$

где  $w_{\text{исп}} = \frac{A \cdot (P^H - P^*)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}$  – скорость испарения,  $P^H = P_0 \cdot \exp(-\frac{Q_{\text{исп}}}{RT})$  –

давление насыщенного пара,  $A$  – коэффициент аккомодации,  $P_0$  – предэкспонент фазового перехода,  $Q_{\text{исп}}$  – энергия активации процесса испарения,  $R=8,31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная,  $M$  – молекулярный вес. В качестве  $P^*$  рассматривается атмосферное давление, т.е.  $P^* = P_{\text{атм}}$ .

### Результаты решения

В таблице 2.5.2 приведены результаты [157] и автора диссертации. На рисунке 2.5.4 представлены распределения температуры по направлению  $x$  в различные моменты времени 60, 120 и 300 с (шаги по координате  $h_x=1 \cdot 10^{-4}$  м и по времени  $\Delta t=10^{-3}$  с).

Таблица 2.5.2. Результаты сравнения распределений температуры ( $T$ , °C) при  $t=60$  с

$x$ , м	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Настоящая работа	1127	1027	1026,94	1027	1127	1777
Результаты [157]	1129	1029	1029	1029	1129	1775
Отклонение, %	0,17	0,19	0,2	0,19	0,19	0,11

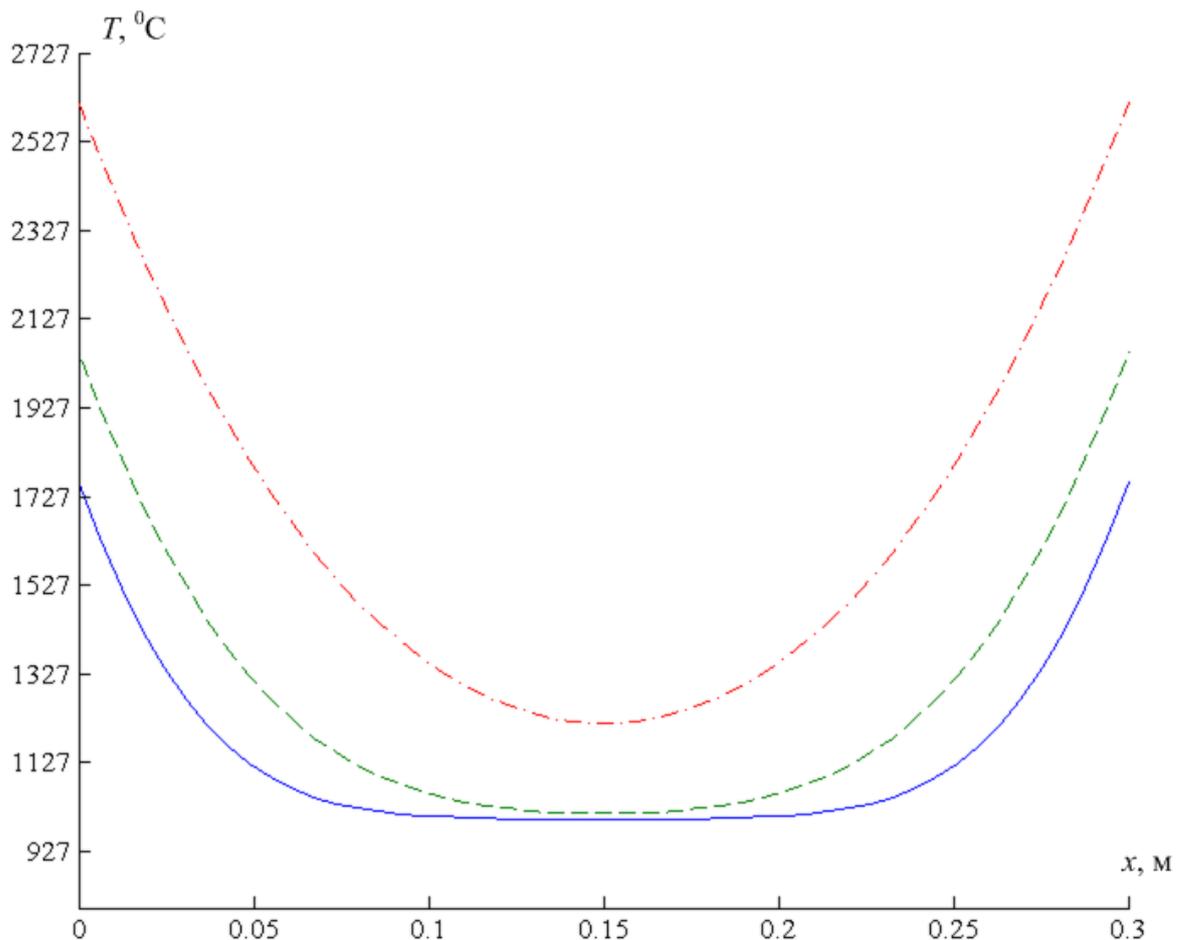


Рисунок 2.5.4. Распределения температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в различные моменты времени ( — при  $t=60$  с, - - - при  $t=120$  с, - · - · при  $t=300$  с)

### 2.5.3. Одномерное уравнение теплопроводности с нелинейными граничными условиями (излучение на границе)

#### Физическая постановка

Рассчитывается процесс теплопроводности в пластине [157], на границах которой осуществляется теплообмен за счет конвекции и излучения (рис. 2.4.5). Материал пластины – бетон ( $\lambda=0,9$  Вт/(м $\cdot^{\circ}\text{C}$ ),  $\rho=2000$  кг/м $^3$ ,  $C=920$  Дж/(кг $\cdot\text{K}$ )). На границах  $x=0$  и  $x=L$  пластина контактирует с внешней средой ( $\kappa_1=1000$  Вт/м $^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ),  $T^e1=30^{\circ}\text{C}$ ,  $\varepsilon_1=0,5$  и  $\kappa_2=500$  Вт/(м $^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ),  $T^e2=70^{\circ}\text{C}$ ,  $\varepsilon_2=0,2$ ). Толщина пластины  $L=0,3$  м. Начальная температура  $T_0=50^{\circ}\text{C}$ .

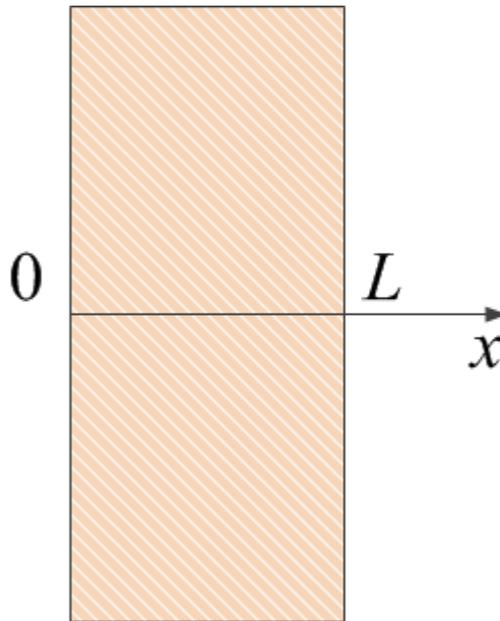


Рисунок 2.5.5. Геометрия задачи

Математическая модель

Уравнение теплопроводности:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L. \quad (2.5.8)$$

Начальные и граничные условия:

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

$$x=0: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k_1(T^{e1} - T) + \varepsilon_1 \sigma ((T^{e1})^4 - T^4), \quad t > 0, \quad k_1 > 0; \quad (2.5.9)$$

$$x=L: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k_2(T^{e2} - T) + \varepsilon_2 \sigma ((T^{e2})^4 - T^4), \quad t > 0, \quad k_2 > 0; \quad (2.5.10)$$

здесь  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – приведенная степень черноты,  $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана.

Результаты решения

Для оценки адекватности полученных значений температур в пластине в таблице 2.5.3 приведены результаты [157] и настоящей работы. На рисунке 2.5.6 представлены распределения температуры по  $x$  в различные моменты времени (600, 1800, 3600 и 7200 с), полученные при сеточных параметрах  $h_x = 1 \cdot 10^{-4}$  м и  $\Delta t = 10^{-3}$  с.

Таблица 2.5.3. Результаты сравнения распределений температуры ( $T, ^\circ\text{C}$ ) при  $t=600$  с

$x, \text{ м}$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Настоящая работа	49,8	50,1	50,1	50,4	49,8	70
Результаты [157]	49,7	50	50	50,5	49,7	70
Отклонение, %	0,2	0,19	0,19	0,19	0,2	0

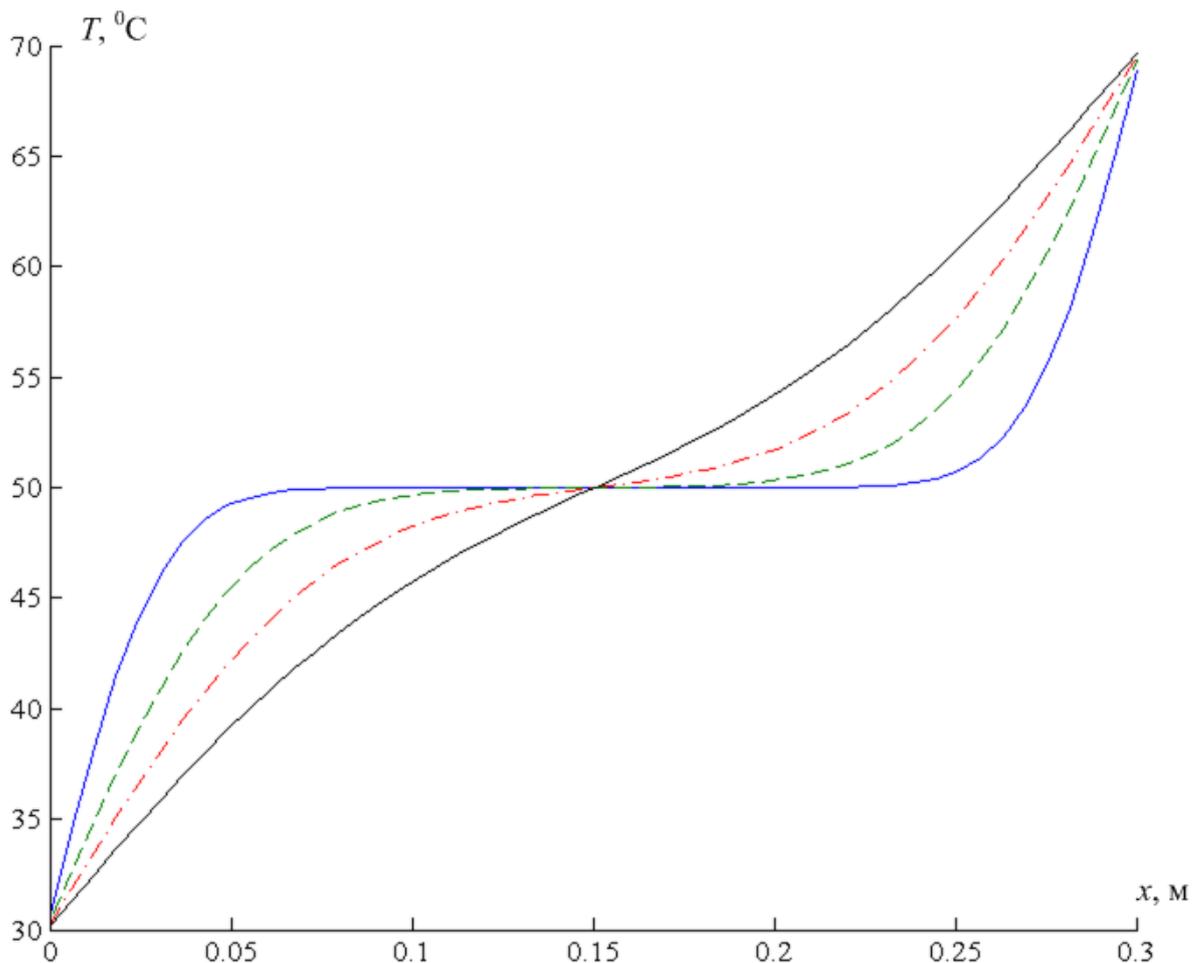


Рисунок 2.5.6. Распределения температуры ( $^\circ\text{C}$ ) по толщине пластины в различные моменты времени ( — при  $t=600$  с, - - - при  $t=1800$  с, - · - · при  $t=3600$  с, — при  $t=7200$  с)

## 2.5.4. Двумерная задача теплопроводности для неоднородного тела

### Физическая постановка

Решена задача теплопроводности в пластине [157] с двумя включениями (рис. 2.5.7). Материал пластины – медь ( $\lambda_1=384$  Вт/(м·°С),  $\rho_1=8800$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_1=381$  Дж/(кг·К)). Размеры пластины  $L=H=0,5$  м. Материал включений сталь ( $\lambda_2=46$  Вт/(м·°С),  $\rho_2=7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_2=460$  Дж/(кг·К)) и железо ( $\lambda_3=71$  Вт/(м·°С),  $\rho_3=7900$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_3=460$  Дж/(кг·К)) На вертикальных границах поддерживаются постоянные температуры  $T_h=100^\circ\text{C}$  при  $x=0$  и  $T_c=0^\circ\text{C}$  при  $x=L$ . Горизонтальные границы являются адиабатическими. Начальная температура области решения  $T_0=50^\circ\text{C}$ .

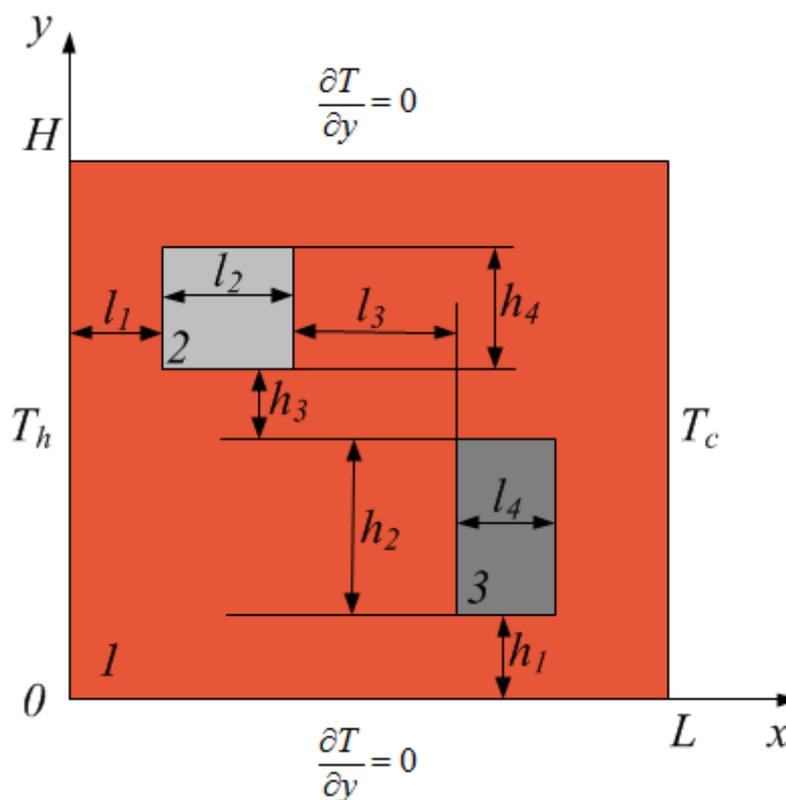


Рисунок 2.5.7. Геометрия задачи

Математическая модель

Уравнение теплопроводности:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right) \left\{ \begin{array}{l} 0 < x < l_1, 0 < y < H; \\ l_1 \leq x \leq l_1 + l_2, 0 < y < h_1 + h_2 + h_3, h_1 + h_2 + h_3 + h_4 < y < H; \\ l_1 + l_2 < x < l_1 + l_2 + l_3, 0 < y < H; \\ l_1 + l_2 + l_3 \leq x \leq l_1 + l_2 + l_3 + l_4, 0 < y < h_1, h_1 + h_2 < y < H; \\ l_1 + l_2 + l_3 + l_4 < x < L, 0 < y < H; \end{array} \right. \\ \rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), l_1 < x < l_1 + l_2, h_1 + h_2 + h_3 < y < h_1 + h_2 + h_3 + h_4; \\ \rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right), l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4, h_1 < y < h_1 + h_2. \end{array} \right. \quad (2.5.11)$$

Начальные и граничные условия:

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H;$$

$$x = 0: T = T_h, t > 0;$$

$$x = L: T = T_c, t > 0;$$

(2.5.12)

$$y = 0: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0;$$

$$y = H: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0;$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} x = l_1, h_1 + h_2 + h_3 \leq y \leq h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \\ x = l_1 + l_2, h_1 + h_2 + h_3 \leq y \leq h_1 + h_2 + h_3 + h_4; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} y = h_1 + h_2 + h_3, l_1 < x < l_1 + l_2, \\ y = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, l_1 < x < l_1 + l_2; \end{array} \right. \quad (2.5.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} x = l_1 + l_2 + l_3, h_1 \leq y \leq h_1 + h_2, \\ x = l_1 + l_2 + l_3 + l_4, h_1 \leq y \leq h_1 + h_2; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} y = h_1, l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4, \\ y = h_1 + h_2, l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4. \end{array} \right.$$

### Результаты решения

Для оценки адекватности полученных значений температур в пластине в таблице 2.5.4 приведены результаты работы [157] и настоящей работы. На

рисунке 2.5.8 представлены распределения температуры по толщине пластины в момент времени 600 с, полученные при использовании сетки 50x50.

Таблица 2.5.4. Результаты сравнения распределений температуры ( $T$ , °C) при  $t=600$  с

$x$ , м	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45
Настоящая работа	92	81,5	60	40	12
Результаты [157]	91,9	81,3	59,8	39,9	12
Отклонение, %	0,1	0,24	0,33	0,25	0

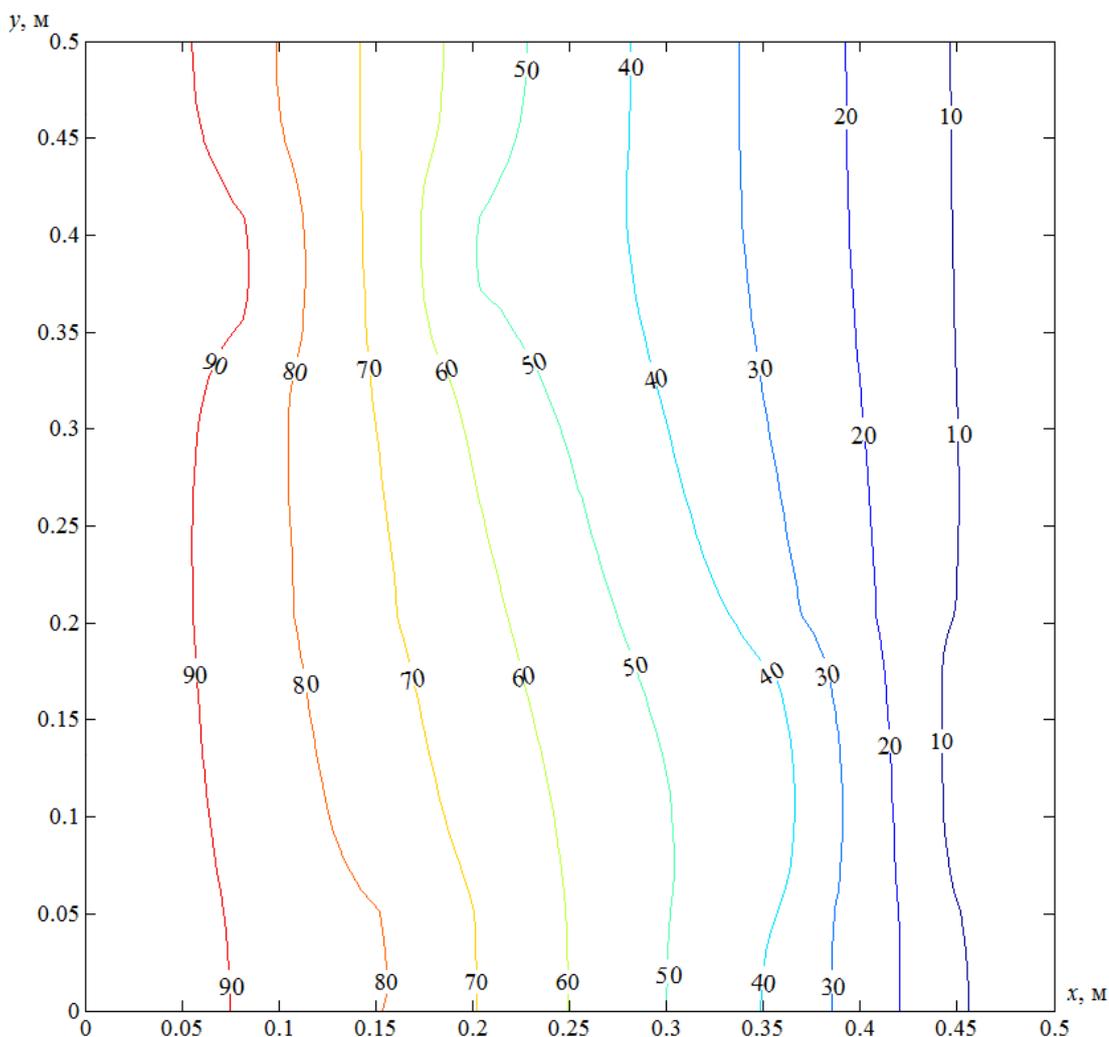


Рисунок 2.5.8. Распределения температуры (°C) по толщине пластины при  $t=600$  с

Анализ результатов, полученных при решении тестовых задач, позволяет сделать вывод об удовлетворительном соответствии результатам работ других авторов. Следовательно, есть основание для заключения о достоверности полученных результатов с использованием выбранных методов и разработанного алгоритма решения (п.2.3).

### **Выводы по второй главе**

1. Разработана методика, собран экспериментальный стенд и проведены эксперименты для исследования физико-химических процессов в условиях интенсивных фазовых превращений, протекающих при прекращении реакции термического разложения ЛГМ под воздействием паров воды (на базе панорамных оптических методов диагностики двухфазных газо- и парожидкостных потоков PIV и IPI).

2. Сформулированы физические и математические модели для анализа макроскопических закономерностей, протекающий при прекращении деструкции ЛГМ, отличающиеся от известных учетом влияния на процесс термического разложения воздействия паров, капель и пленок воды.

3. Разработан алгоритм решения систем нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями для рассмотренных постановок.

4. Разработан алгоритм оценки достоверности полученных результатов численных исследований.

5. Решена группа тестовых задач теплопроводности. Сопоставление результатов решения с данными других авторов показало удовлетворительное согласие.

# **ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДЯНОГО ПАРА, КАПЕЛЬ И ПЛЕНОК ВОДЫ С ТЕРМИЧЕСКИ РАЗЛАГАЮЩИМСЯ ЛЕСНЫМ ГОРЮЧИМ МАТЕРИАЛОМ**

## **3.1 Результаты экспериментальных исследований условий и характеристик протекания процессов термического разложения типичных лесных горючих материалов при воздействии на них паров воды**

Проведены экспериментальные исследования физико-химических процессов, протекающих в условиях прекращения реакции термического разложения ЛГМ (листья березы, хвоя ели) за счет воздействия паров воды, по методике, описание которой приведено в главе 2.

Целью данных исследований являлось экспериментальное определение интегральных характеристик процессов подавления реакции пиролиза ЛГМ в условиях, протекающих при взаимодействии интенсивно разлагающегося ЛГМ с парами воды (пароводяным облаком). Достижение поставленной цели возможно при реализации многофакторного эксперимента с условием воспроизведения основных параметров процесса прекращения реакции деструкции ЛГМ воздействием пароводяного облака. Серии экспериментов проводились за относительно короткие интервалы времени с целью минимизации отклонений условий проведения опытов, а также обеспечения постоянства начальных параметров парокапельной и газовой сред.

В качестве ЛГМ выбраны листья березы и хвоя ели, жидкости – вода со специальными включениями – «трассерами», представляющими примесь (0,5 % по массе) нанопорошка диоксида титана. Последние вводились для повышения контрастности видеogramм, получаемых кросскорреляционной камерой. Частицы  $TiO_2$  выбраны в качестве «трассеров», так как не

растворяются в воде [116]. Начальная температура распыляемой воды принималась постоянной ( $T_w = \text{const}$ ) и составляла около 300 К.

При проведении серии экспериментов температура парогазовой смеси контролировалась хромель-алюмелевой термопарой 7 и составляла от 300 до 450 К. Экспериментально установлено, что для листьев березы реакция термического разложения прекращается (рис. 3.1.1) в течение времени, не превышающем 300 с. Для хвой ели времена прекращения реакции термического разложения составили до 730 с (рис. 3.1.1).

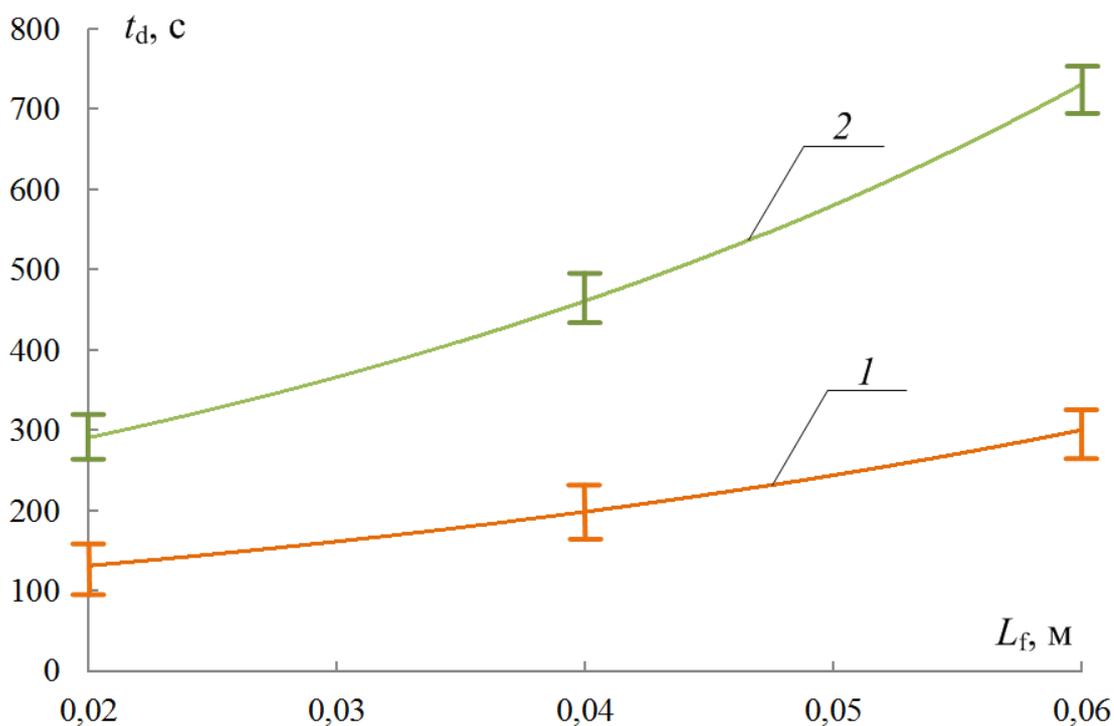


Рисунок 3.1.1. Характерные времена подавления реакции термического разложения ЛГМ: 1 – листья березы, 2 – хвоя ели

Результаты выполненных экспериментальных исследований стали основой для разработки физической модели теплопереноса в условиях термического разложения ЛГМ. В диссертации рассмотрено несколько наиболее типичных для современных технологий пожаротушения механизмов воздействия на поверхность ЛГМ (в условиях термического разложения последнего).

### 3.2 Результаты теоретических исследований процесса подавления реакции пиролиза лесных горючих материалов при воздействии паров воды

Область решения рассматриваемой задачи для системы «ЛГМ – смесь продуктов сгорания и водяных паров» [127–129] представлена на рисунке 2.2.1.

В начальный момент времени в приповерхностном слое ЛГМ задавалось типичное распределение температуры, соответствующее процессу термического разложения в условиях реального пожара [2, 34]. На рисунке 3.2.1 приведено распределение температуры в слое ЛГМ толщиной  $L_f=50$  мм. При контакте ЛГМ с внешней газовой средой (с относительно низкой температурой  $T_m$ ) происходит интенсивный теплоотвод из зоны термического разложения.

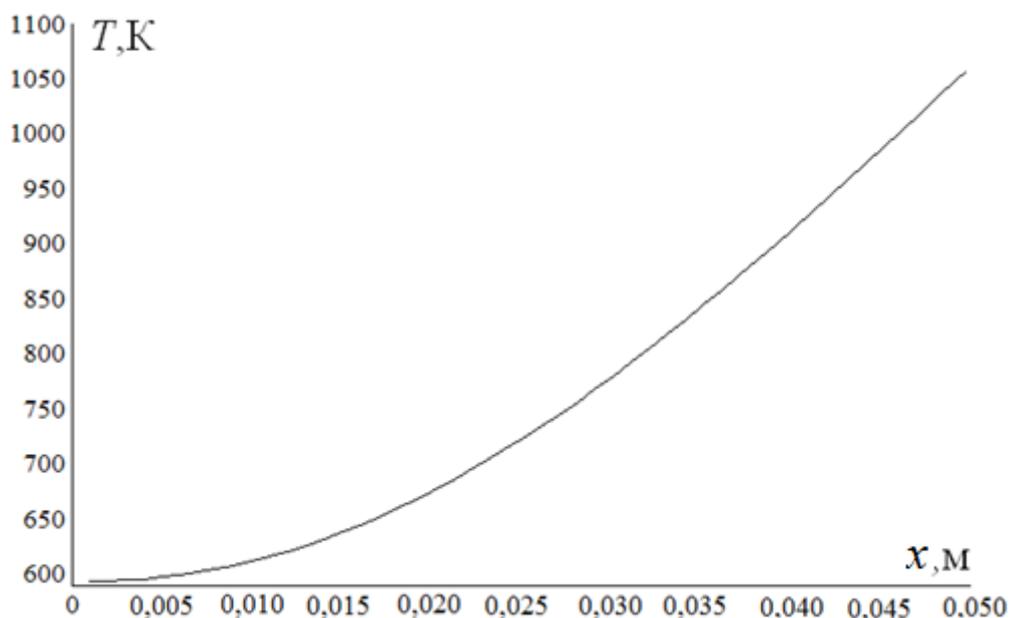


Рисунок 3.2.1. Начальное распределение температуры в приповерхностном слое ЛГМ толщиной  $L_f=50$  мм

На рис. 3.2.2 представлена полученная в результате проведения численных исследований поверхность, характеризующая зависимости времени  $t_d$  от температуры  $T_m$  и толщины приповерхностного слоя типичного ЛГМ ( $L_f$ ). Поверхность  $t_d=f(T_m, L_f)$  позволяет выделить условия прекращения

пиролиза ЛГМ. Так, значения параметров  $T_m$  и  $L_f$ , соответствующие временам  $t_d$ , расположенным на этой поверхности или выше ее, характеризуют условия подавления деструкции ЛГМ (как следствие, ликвидации очага горения). При временах  $t_d$  ниже поверхности (рис. 3.2.2) скорость термического разложения в приповерхностном слое ЛГМ снижается при контакте с парогазовой средой с температурой  $T_m$ , но затем процесс термического разложения снова ускоряется.

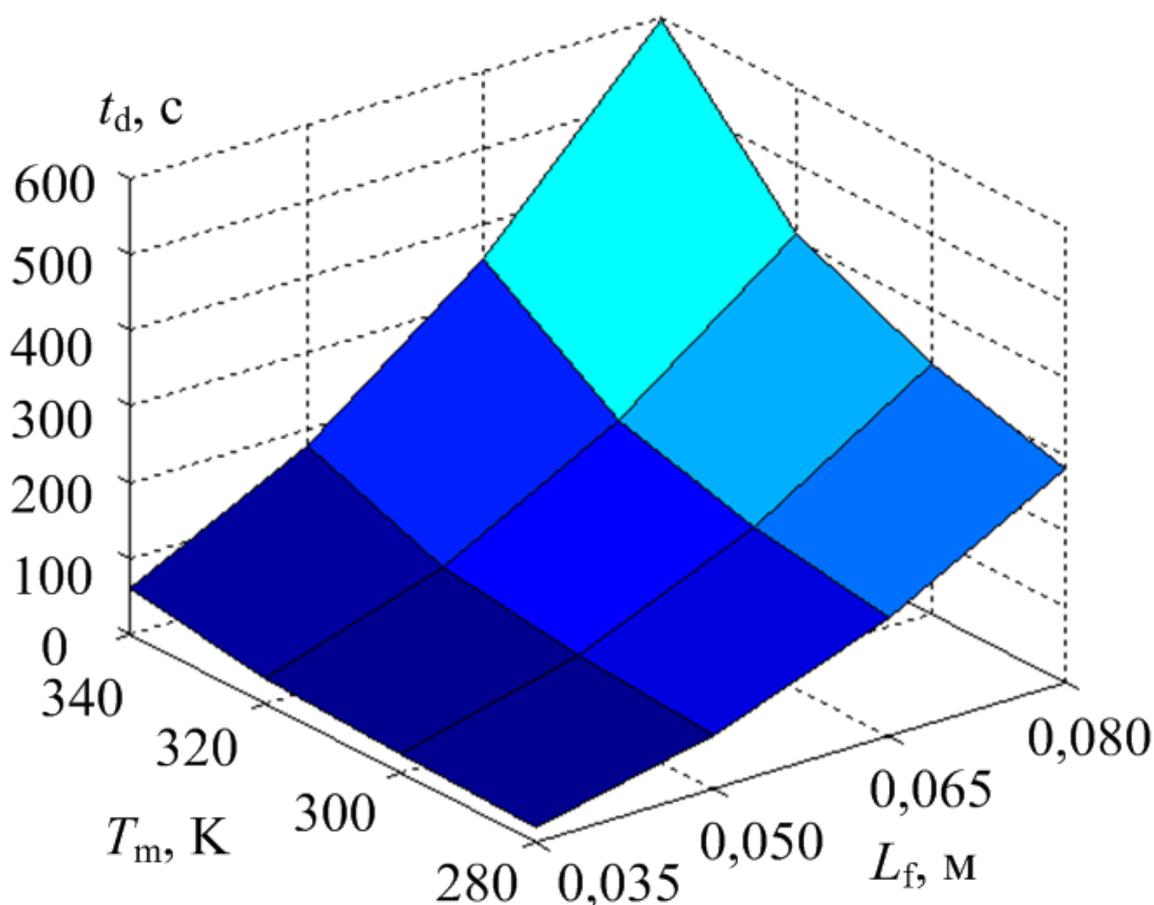


Рисунок 3.2.2. Времена подавления реакции термического разложения ЛГМ в зависимости от толщины его приповерхностного слоя и температуры парогазовой смеси

В результате обработки зависимостей, приведенных на рис. 3.2.2, получена группа аппроксимационных выражений. Ниже представлены наиболее типичные из них:

$$t_d = 0,162 \exp(0,017T_m) \text{ при } L_f = 35 \text{ мм, } 280 < T_m < 340 \text{ К;} \quad (3.2.1)$$

$$t_d = 0,9709 \exp(0,0151T_m) \text{ при } L_f=50 \text{ мм, } 280 < T_m < 340 \text{ К;} \quad (3.2.2)$$

$$t_d = 3,3267 \exp(0,0135T_m) \text{ при } L_f=65 \text{ мм, } 280 < T_m < 340 \text{ К;} \quad (3.2.3)$$

$$t_d = 8,467 \exp(0,0123T_m) \text{ при } L_f=80 \text{ мм, } 280 < T_m < 340 \text{ К;} \quad (3.2.4)$$

$$t_d = 3,3714 \exp(0,0571L_f) \text{ при } T_m=280 \text{ К, } 35 < L_f < 80 \text{ мм;} \quad (3.2.5)$$

$$t_d = 4,1788 \exp(0,0548L_f) \text{ при } T_m=300 \text{ К, } 35 < L_f < 80 \text{ мм;} \quad (3.2.6)$$

$$t_d = 5,8591 \exp(0,0548L_f) \text{ при } T_m=320 \text{ К, } 35 < L_f < 80 \text{ мм;} \quad (3.2.7)$$

$$t_d = 11,855 \exp(0,0506L_f) \text{ при } T_m=340 \text{ К, } 35 < L_f < 80 \text{ мм.} \quad (3.2.8)$$

Следует также отметить, что сформулированные аппроксимационные выражения (3.2.1) – (3.2.8) для  $t_d$  в зависимости от  $T_m$  и  $L_f$  можно использовать при прогностическом определении условий, необходимых и достаточных для прекращения термического разложения ЛГМ с различной толщиной прогретого приповерхностного слоя.

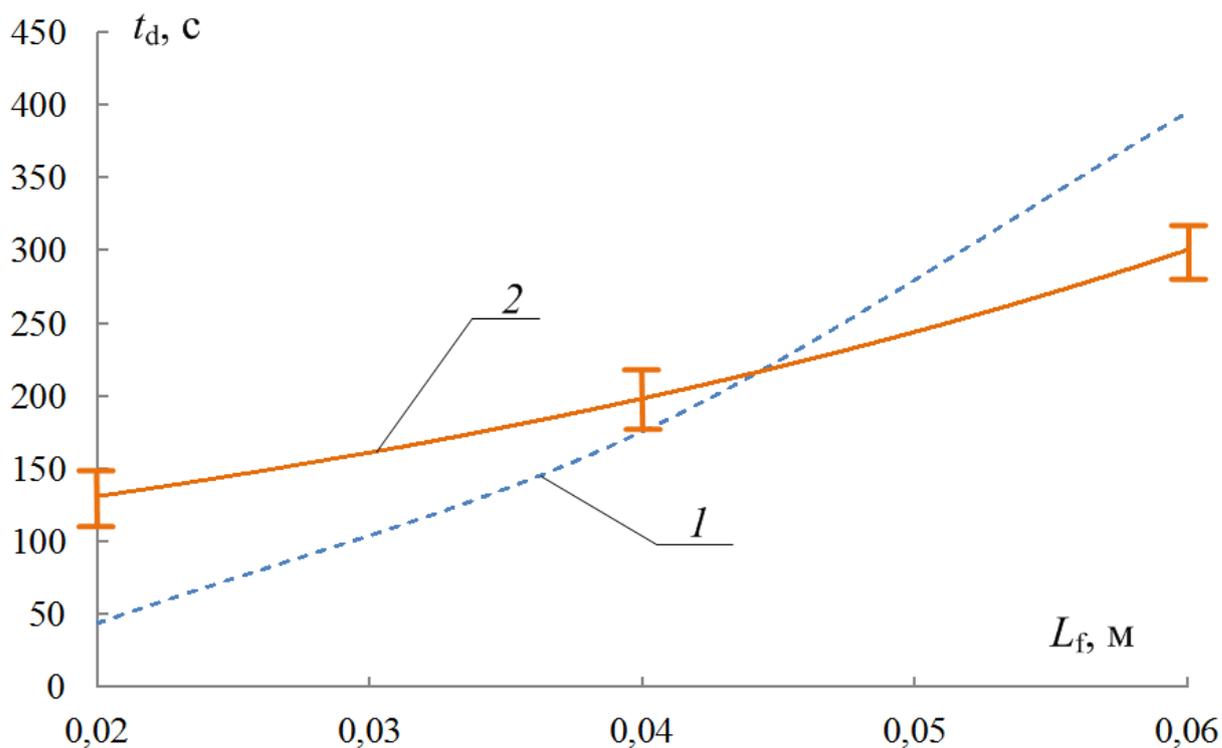
Так как теплофизические характеристики и параметры пиролиза типичных ЛГМ, как правило, отличаются в пределах 10–15 % [133, 134–136], то полученные результаты численных исследований для хвои можно использовать для достаточно широкой группы ЛГМ.

Следует отметить нелинейный характер изменения  $t_d$  в зависимости от  $T_m$  и  $L_f$ . Это, в первую очередь, обусловлено нелинейной зависимостью скорости термического разложения в приповерхностном слое ЛГМ [132]. Во-вторых, существенное влияние на условия охлаждения ЛГМ оказывает распределение (рис. 3.2.1) температуры в приповерхностном слое ЛГМ (соответствующее процессу горения [2, 34]).

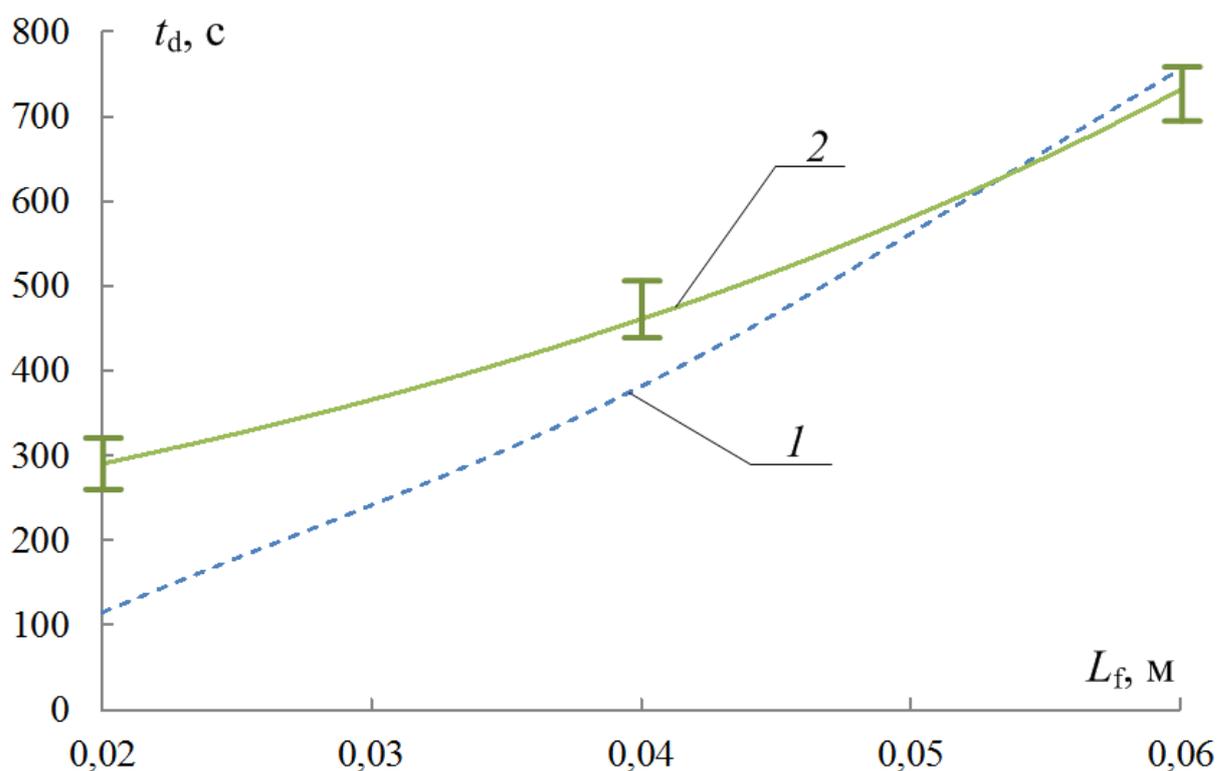
Полученные значения  $t_d$  (рис. 3.2.2) иллюстрируют относительно небольшие времена (до 6–9 минут) сохранения типичных [76, 130] для следов «водяных снарядов» температур  $T_m=280–340$  К над поверхностью ЛГМ. В [76, 77–78, 130] показано, что наименьших температур в следе движения «снаряда» можно достичь при его мелкодисперсном распылении. Уменьшение размеров капель воды в «снаряде» приводит к интенсификации

парообразования (вследствие увеличения площади поверхности фазового перехода). Для поддержания требуемых значений  $T_m$  целесообразно реализовывать равномерную подачу потока распыленной воды, например [78], в течение некоторого времени  $t_d$ . Параметры распыления можно определить при использовании аппарата [76–78, 130].

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными для листьев березы и хвои ели представлены на рис. 3.2.3.



*a*



б

Рисунок 3.2.3. Характерные времена подавления реакции термического разложения ЛГМ (листья березы (а), хвоя ели (б)): 1 □ – экспериментальные данные, 2 – результаты численного моделирования

Установлено (рис. 3.2.3) удовлетворительное соответствие результатов выполненных численных и экспериментальных исследований. Отклонения теоретической кривой от экспериментальной можно объяснить тем, что при моделировании в качестве значений теплофизических параметров использовались константы ( $\lambda$ ,  $C$  и  $\rho$ ). Для приближения теоретических моделей к реальным приложениям целесообразно учитывать зависимость  $\lambda$ ,  $C$  и  $\rho$  от влагосодержания и температуры.

Следует отметить, что на отклонения теоретических исследований существенное влияние оказывают исходные параметры решения задачи теплопереноса – в первую очередь, кинетика термического разложения ( $E_a$ ,  $k^0$ ,  $Q$ ,  $T_d$ ). При численном моделировании использована кинетика термического разложения для лиственных и хвойных пород [112]. Из анализа

[112] можно заключить, что ЛГМ разных регионов отличаются по своим теплофизическим свойствам и кинетическим параметрам.

При проведении экспериментов с большими толщинами прореагировавшего слоя усиливается влияние именно изменения фрагментов образцов от эксперимента к эксперименту. Скорее всего, положение теоретической кривой относительно экспериментальной при толщине образца листьев березы более 0,05 м объясняется именно этим фактором. Такого эффекта не наблюдается с хвоей ели, поскольку структура фрагментов более однородна по сравнению с листьями. Однако обеспечить абсолютную идентичность навесок хвои ели от эксперимента к эксперименту не представляется возможным.

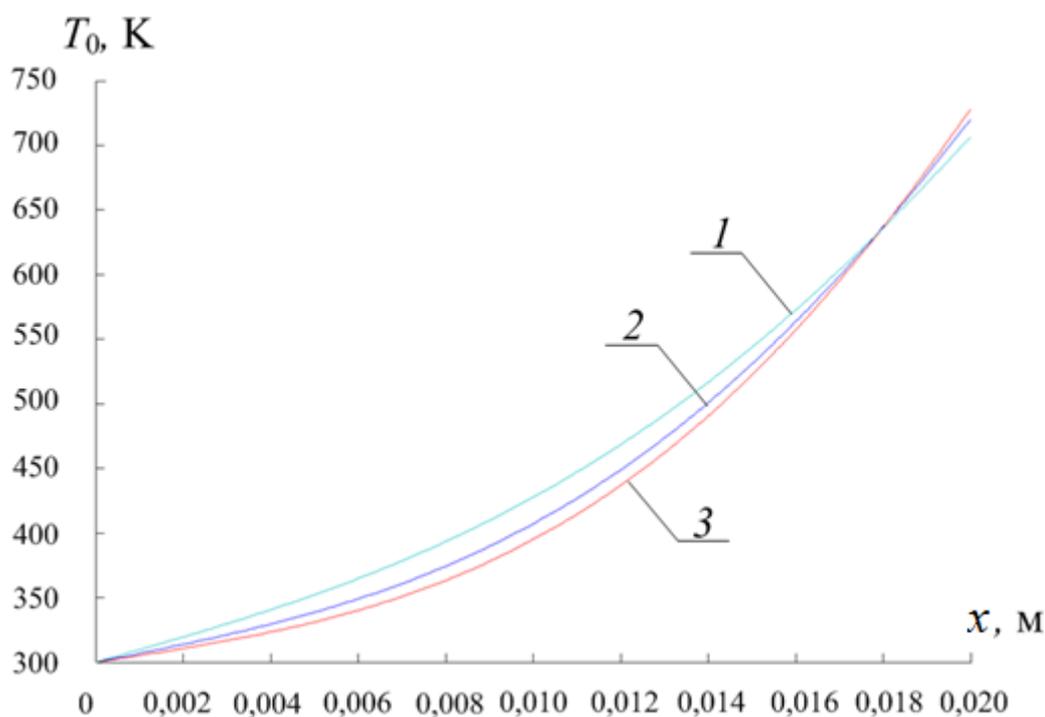
Также определяющую роль в отклонении экспериментальных данных от теоретических играет инерционность термопар. При малой толщине образца данное влияние больше, чем при толщине 0,06 м (при толщине более 0,02 м использовались две синхронно работающие термопары).

Применение авиации при тушении пожаров в настоящее время характеризуется локальным сбросом воды с воздушных судов в зону горения, что приводит к существенному заливанию ограниченных по характерным размерам участков лесных пожаров [30, 32]. Достаточно часто это не является гарантией ликвидации очага горения [2, 34], поскольку фронт горения может обойти залитую водой малую площадь, на которой подавлен процесс термического разложения ЛГМ за счет интенсивного поступления воды. Однако открытыми остаются вопросы о необходимых и достаточных (минимальных) объемах жидкости для подавления реакции термического разложения в приповерхностных слоях типичных ЛГМ. Такие оценки можно провести при численном моделировании взаимосвязанных процессов теплопереноса и эндотермических фазовых превращений при рассмотрении системы «пленка воды – ЛГМ». В п. 3.3 приведены результаты моделирования с учетом этих факторов.

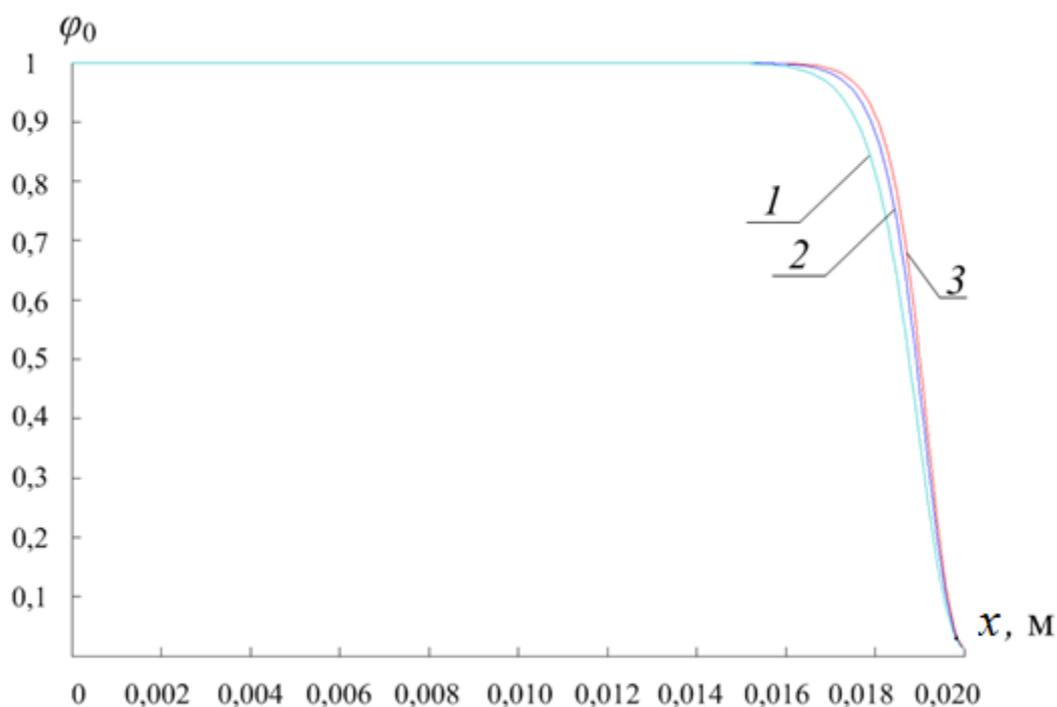
### 3.3 Испарение пленки воды на поверхности лесного горючего материала при его термическом разложении

Область решения рассматриваемой задачи [127, 137, 138] для системы «ЛГМ–пленка воды» представлена на рисунке 2.2.2.

Для установления начального распределения температуры  $T_0(x)$  и доли способного к химическому реагированию (термическому разложению) вещества  $\varphi_0(x)$  в приповерхностном слое ЛГМ (толщиной  $L_f$ ) решалась задача теплопереноса [138]. Аналогично [138] вычислялись профили  $T_0(x)$  и  $\varphi_0(x)$  при постоянной температуре внешней газовой среды (продуктов сгорания) – 1170 К, соответствующей средней температуре пожара – [159]. На рис. 3.3.1 приведены типичные (начальные для сформулированной ниже задачи) распределения  $T_0(x)$  и  $\varphi_0(x)$  в приповерхностном слое ЛГМ (листья березы, хвоя сосны и ели), полученные при решении уравнения энергии для ЛГМ [138].



*a*



б

Рисунок 3.3.1. Типичные распределения температуры (а) и доли способного к химическому реагированию вещества (б) в ЛГМ ( $L_w=0,02$  м) при его термическом разложении в условиях постоянной внешней температуры (1170 К): 1 – листья березы, 2 – хвоя сосны, 3 – хвоя ели

При решении задачи теплопереноса (2.2.13) – (2.2.17) фиксировались распределения температуры в приповерхностном слое ЛГМ в разные моменты времени. На рис. 3.3.2 приведены типичные распределения  $T(x)$  (хвоя сосны толщиной 0,02 м) при начальной толщине пленки жидкости 0,01 м. Видно, что температура снижается нелинейно, что можно объяснить интенсивным химическим реагированием при термическом разложении в твердой фазе, а также теплообменом с внешней средой (пленкой воды) при энергозатратных и инерционных эндотермических фазовых превращениях.

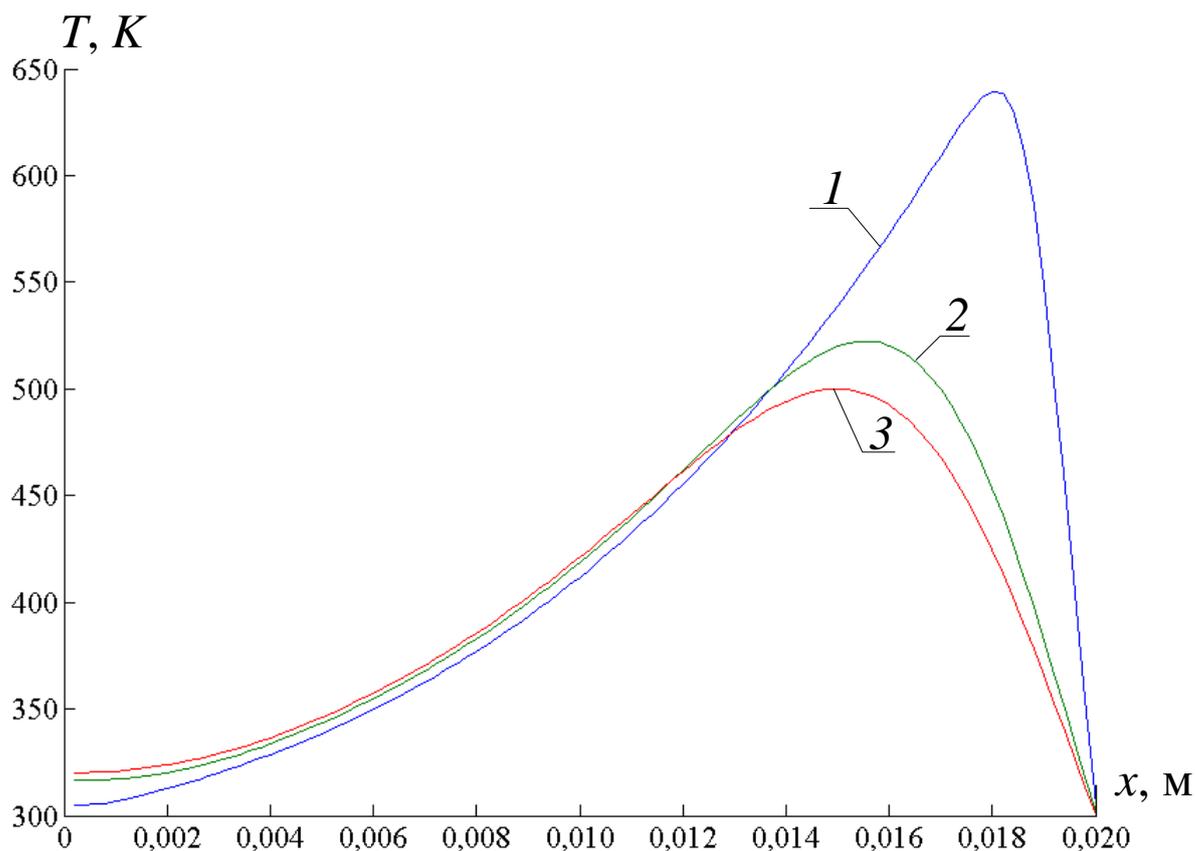


Рисунок 3.3.2. Распределение температуры в приповерхностном слое ЛГМ (хвоя сосны) при  $L_f=0,02$  м и  $L_w=0,01$  м в разные моменты времени:  
 1 – 1 с, 2 – 15 с, 3 – 34 с

На рис. 3.3.3, а представлены полученные в результате проведенных численных исследований зависимости толщины слоя испарившейся при подавлении реакции термического разложения жидкости  $L_e$  от характерного размера прогретого приповерхностного слоя ЛГМ  $L_f$ . Величина  $L_e$  является минимальной толщиной пленки жидкости, при которой температура в ЛГМ становится ниже  $T_d$ .

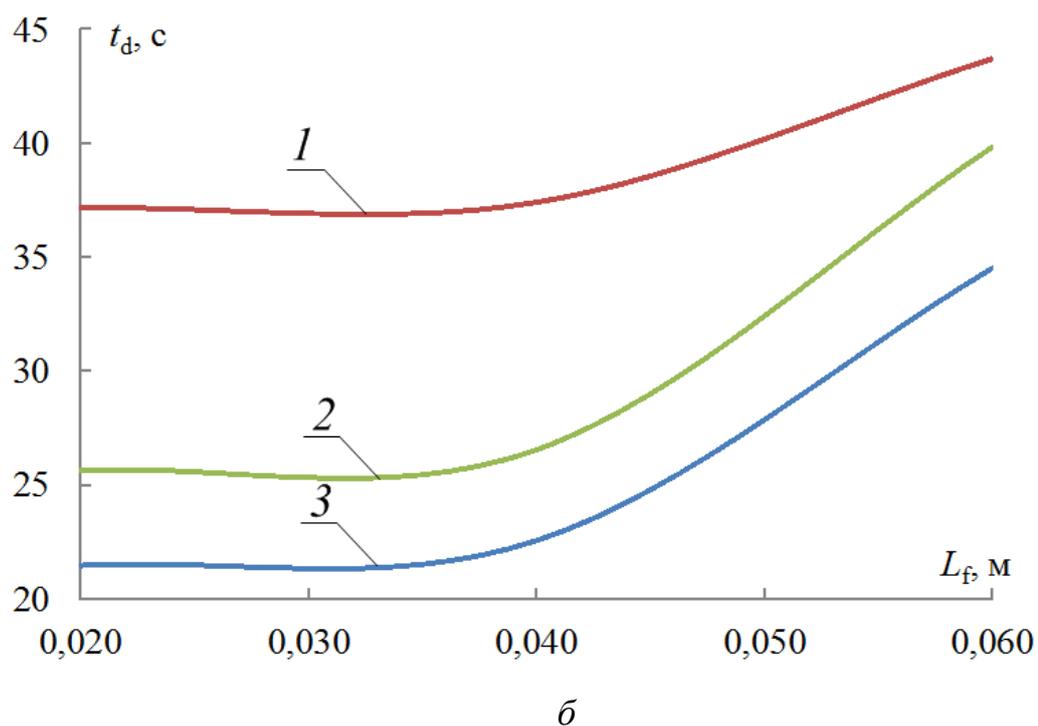
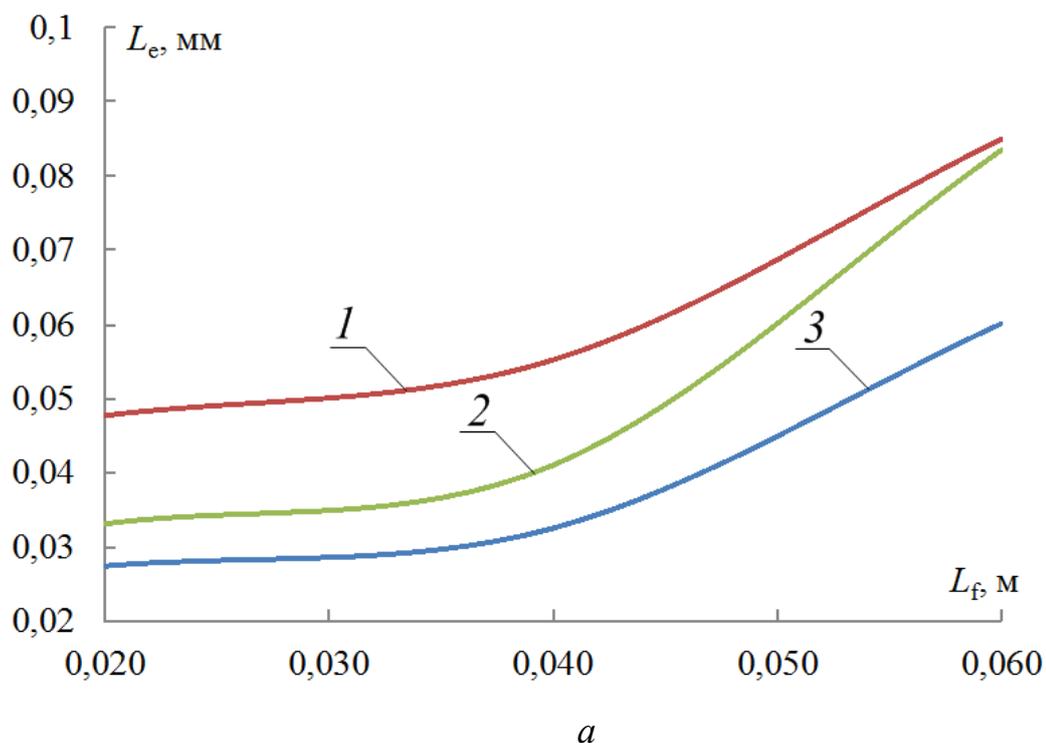


Рисунок 3.3.3. Зависимости толщины испарившегося слоя пленки жидкости (а) и времени подавления реакции термического разложения (б) от характерного размера ЛГМ: 1 – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Можно отметить нелинейный характер изменения  $L_e$  в зависимости от параметра  $L_f$ . Это, в первую очередь, обусловлено нелинейной зависимостью

скорости термического разложения ЛГМ от температуры. Во-вторых, существенное влияние на условия охлаждения ЛГМ оказывают начальные распределения  $T_0(x)$  и  $\varphi_0(x)$  в приповерхностном слое ЛГМ (соответствующие процессу его горения). Известно [2, 34], что распределения температуры в приповерхностном слое ЛГМ при горении могут значительно изменяться с течением времени. Это связано с выгоранием определенной доли приповерхностного слоя и заполнением этой области газообразными продуктами сгорания и коксом (как следствие, существенно меняется доля способного к термическому разложению вещества). Пропорции между заполняющими указанную область компонентами могут существенно отличаться в зависимости от внешних условий. Выбранные в качестве начальных профили  $T_0(x)$  и  $\varphi_0(x)$  иллюстрируют (рис. 3.3.1) условия, при которых перед контактом с пленкой воды выгорание ЛГМ происходит в узком приповерхностном слое. На практике возможна реализация условий, при которых толщина прогретого приповерхностного слоя ЛГМ будет превышать рассматриваемые значения  $L_f$ . Как следствие, возрастут и значения  $L_e$ .

Для зависимостей, приведенных на рис. 3.3.2, а, сформулированы следующие аппроксимационные выражения:

хвоя ели

$$L_e = 27,875 \cdot L_f^2 - 1,2975 \cdot L_f + 0,0625 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м,} \quad (3.3.13)$$

листья березы

$$L_e = 43,25 \cdot L_f^2 - 2,2 \cdot L_f + 0,0598 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м} \quad (3.3.14)$$

хвоя сосны

$$L_e = 28,125 \cdot L_f^2 - 1,4325 \cdot L_f + 0,0448 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м.} \quad (3.3.15)$$

Зависимости  $L_e = f(L_f)$  показывают (рис. 3.3.2, а), что для предотвращения реакции термического разложения в приповерхностных слоях типичных ЛГМ размерами до 0,06 м требуются пленки жидкости со значениями  $L_e$ , не превышающими 0,1 мм. Выявленная особенность иллюстрирует избыточность подачи воды типичным для авиации способом –

локальным сбрасыванием [30, 32], при котором на поверхности ЛГМ могут формировать пленки жидкости толщиной, существенно превышающей установленные достаточные (минимальные) значения  $L_e$ .

Также при численном моделировании определены характерные времена подавления реакции термического разложения рассматриваемых ЛГМ  $t_d$  при воздействии на них пленкой воды (рис. 3.3.2, б).

Показано, что для  $L_f$  менее 0,06 м значения  $t_d$  не превышают 1 минуты. Установленные результаты позволяют сделать вывод о том, что даже при минимальных толщинах пленки жидкости  $L_w$  для подавления реакции термического разложения ЛГМ достаточно испарение слоя воды  $L_e$  в течение очень малого интервала времени.

Для зависимостей, приведенных на рис. 3.3.2, б, сформулированы аппроксимационные выражения:

хвоя ели

$$t_d = 7575 \cdot L_f^2 - 442,5 \cdot L_f + 43 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м} \quad (3.3.16)$$

листья березы

$$t_d = 15487 \cdot L_f^2 - 884,25 \cdot L_f + 37,14 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м}, \quad (3.3.17)$$

хвоя сосны

$$t_d = 13600 \cdot L_f^2 - 761,5 \cdot L_f + 31,26 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м}. \quad (3.3.18)$$

Следует отметить, что на значения  $t_d$  и  $L_e$  существенное влияние оказывают исходные параметры решения задачи теплопереноса – в первую очередь, кинетика термического разложения ( $E_3$ ,  $k_3^0$ ,  $Q_3$ ,  $T_d$ ). Выше представлены результаты вычислений при средних значениях известных диапазонов изменения  $E_3$ ,  $k_3^0$ ,  $Q_3$ ,  $T_d$ . Разработанную модель теплопереноса (2.2.13) – (2.2.17) можно использовать для вычисления необходимых и достаточных толщин пленок воды и времен их испарения при различных значениях  $E_3$ ,  $k_3^0$ ,  $Q_3$  и  $T_d$ .

Следует отметить, что вместе с жидкостью поверхности термически разлагающегося ЛГМ могут достигнуть непосредственно кора, листья, ветки и других компоненты лесного массива [2, 34]. В таком случае на поверхности

термически разлагающегося ЛГМ формируется неоднородная (гетерогенная) система, включающая непосредственно воду, листья, хвоинки и кору. Эта система представляет собой «буферный слой» между поверхностью термически разлагающегося материала и окружающей средой. Над таким слоем, как правило, формируется типичный для «водяных снарядов» (большой совокупности капель) [65, 85] след (парогазовая смесь с некоторой температурой  $T_m$ ). Формирование слоя воды с фрагментами коры, листьев и веток деревьев в значительной степени изменяет условия теплообмена в окрестности, прогретого до высоких температур ЛГМ и влияет на процесс термического разложения последнего [30, 32]. Выполнить экспериментальные исследования влияния таких «буферных слоев» на процесс тушения реального пожара затруднительно. Поэтому представляет интерес численное исследование теплопереноса в условиях фазовых превращений при воздействии воды на приповерхностный слой нагретого до высоких температур ( $T \gg T_d$ ) ЛГМ. В п. 3.4 приведены результаты численного анализа с учетом этих факторов.

### **3.4 Прекращение реакции деструкции лесного горючего материала при испарении пленки воды с твердыми включениями на его поверхности**

Область решения рассматриваемой задачи [142] для системы «ЛГМ – вода с твердыми включениями» представлена на рисунке 2.2.3.

При постановке задачи предполагалось, что теплофизические характеристики ЛГМ и воды не зависят от температуры.

При решении задачи теплопереноса (2.2.22)–(2.2.24) рассчитывались распределения температуры в приповерхностном слое ЛГМ в разные моменты времени ( $0 \leq t \leq t_d$ ). На рис. 3.4.1 приведены типичные распределения температуры для слоя хвои сосны толщиной 0,04 м при характерном размере «буферного слоя» – 0,01 м.

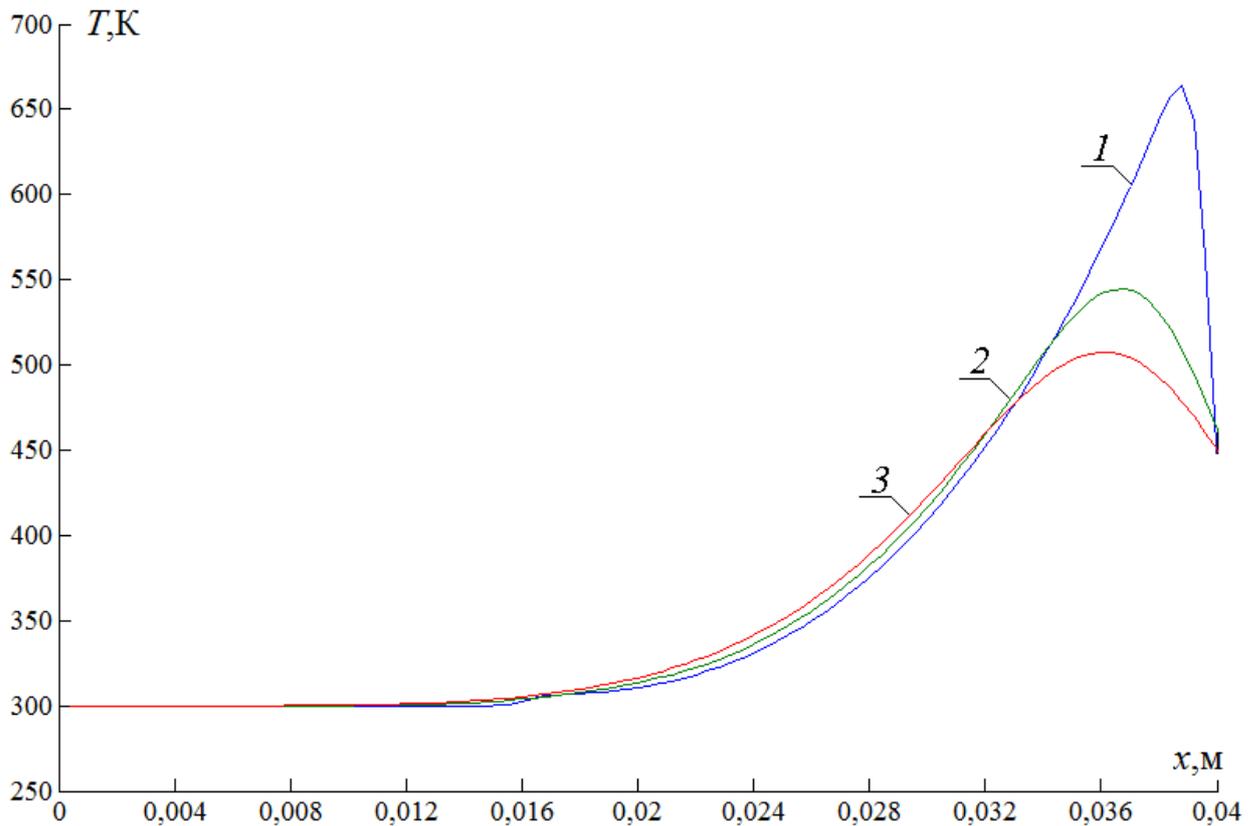


Рисунок 3.4.1. Распределения температуры в ЛГМ в различные моменты времени при  $L_f=0,04$  м,  $L_{w-f}=0,01$  м,  $\gamma=0,5$ ,  $\alpha=20$  Вт/(м<sup>2</sup>К):  
 1 – 1 с, 2 – 25 с, 3 – 50 с

Видно, что температура в прогревом до  $T > T_d$  ЛГМ при  $0 \leq t \leq t_d$  снижается нелинейно (рис. 3.4.1). Можно отметить достаточно ограниченную по размерам область высоких температур и, соответственно, впоследствии интенсивного остывания материала. Эта область имеет характерный размер (толщину) 0,02–0,025 м (соответствует зоне прогрева типичных ЛГМ согласно решению задачи [138]).

Видно (рис. 3.4.1), что в результате испарения воды температура в приповерхностном слое ЛГМ существенно (более чем на 100 К) снижается. Это особенно характерно для границы «ЛГМ – вода с твердыми включениями». В глубине ЛГМ температура изменяется незначительно (отклонения  $T$  составляют менее 5 К).

На рис. 3.4.2 представлены полученные в результате проведенных численных исследований зависимости времени прекращения реакции термического разложения от толщины прогретого до температур  $T > T_d$  слоя ЛГМ при характерном размере «буферного слоя»  $L_{w-f} = 0,01$  м.

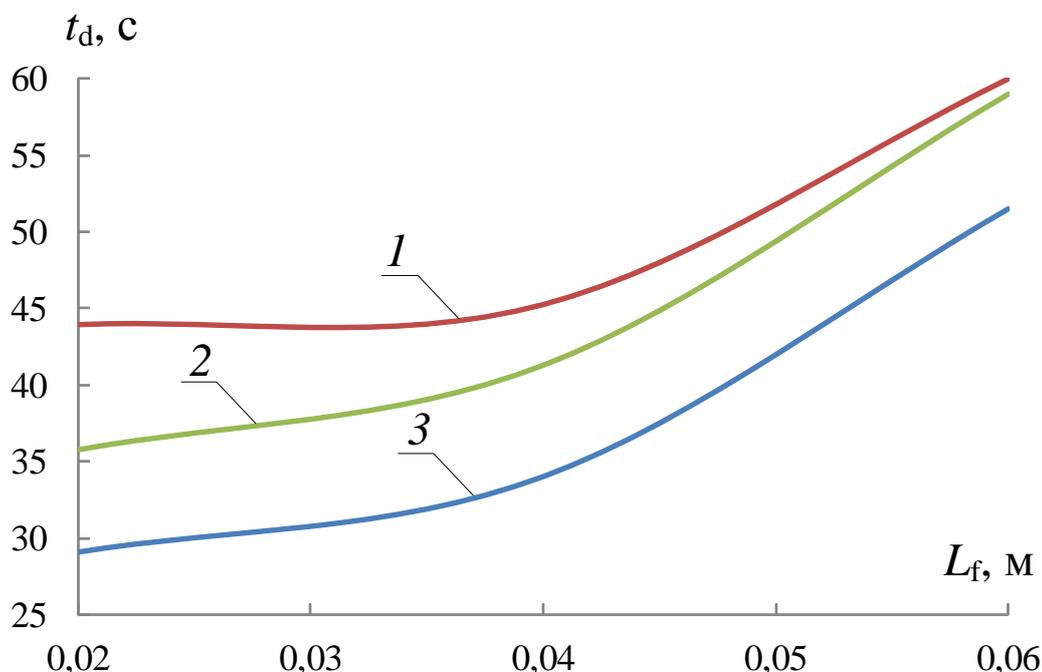


Рисунок 3.4.2. Зависимости времени подавления реакции термического разложения от толщины ЛГМ при  $L_{w-f} = 0,01$  м,  $\gamma = 0,5$ ,  $\alpha = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>К):

1 – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Можно отметить, что время прекращения реакции термического разложения меняется достаточно существенно при варьировании  $L_f$  в типичном для практики тушения пожаров диапазоне 0,02–0,06 м [2, 34]. Величина  $t_d$  возрастает при увеличении  $L_f$  нелинейно. Так, например, в диапазоне  $0,02$  м  $< L_f < 0,04$  м времена  $t_d$  отличаются на 5–10 с. При увеличении  $L_f$  до 0,06 м зафиксирован рост  $t_d$  на 15 с относительно значений  $t_d$  при  $L_f = 0,02$  мм. Установленную особенность можно объяснить различными запасами энергии, аккумулированной в прогретом до высоких температур приповерхностном слое ЛГМ, и, как следствие, отличными распределениями  $T_0(x)$  и  $\phi_0(x)$  при горении последнего [138].

Для зависимостей, приведенных на рис. 3.4.2, сформулированы следующие аппроксимационные выражения:

хвоя ели

$$t_d = 16788 \cdot L_f^2 - 941,75 \cdot L_f + 56,07 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м,} \quad (3.4.1)$$

листья березы

$$t_d = 15225 \cdot L_f^2 - 637,5 \cdot L_f + 42,44 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м,} \quad (3.4.2)$$

хвоя сосны

$$t_d = 15687 \cdot L_f^2 - 694,75 \cdot L_f + 36,72 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м.} \quad (3.4.3)$$

Зависимости  $t_d=f(L_f)$  показывают (рис. 3.4.2), что для ЛГМ с характерным размером  $L_f$  менее 0,06 м значения  $t_d$  не превышают 1 минуты. Так как толщина прогретого слоя типичного ЛГМ в условиях реального пожара, как правило, составляет не более 0,05 м [2, 34], то рассчитанные времена  $t_d$  можно считать верхними оценками.

Зависимости времени подавления реакции термического разложения рассматриваемых ЛГМ от толщины «буферного слоя» ( $L_{w-f}$ ) при  $L_f=0,04$  м представлены на рис. 3.4.3.

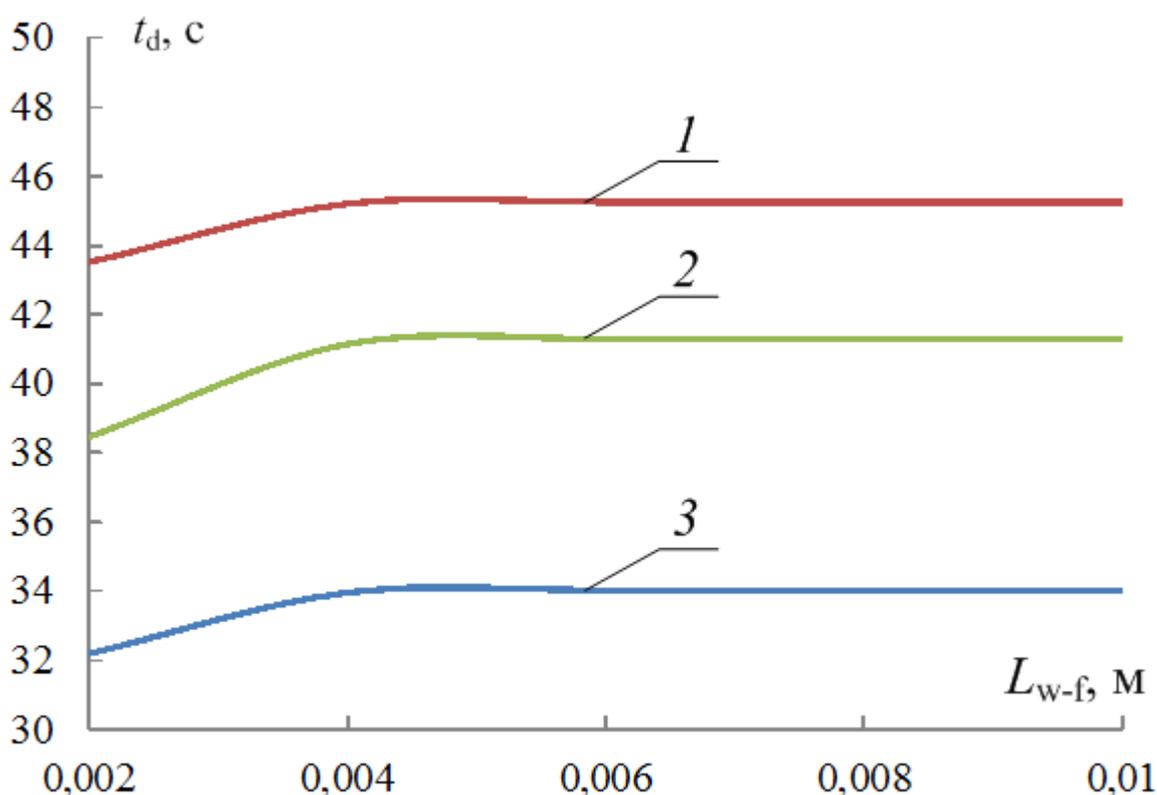


Рисунок 3.4.3. Зависимости времени подавления реакции термического разложения от толщины «буферного слоя» при  $L_f=0,04$  м,  $\gamma=0,5$ ,  $\alpha=20$  Вт/(м<sup>2</sup>К): 1 – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Инерционность процесса подавления реакции термического разложения существенно возрастает при изменении  $L_{w-f}$  в диапазоне от 0,002 м до 0,004 м. При дальнейшем росте  $L_{w-f}$  времена  $t_d$  практически не меняются (отклонения менее 1 %). Этот результат можно объяснить малой массой испаряющейся при подавлении реакции разложения воды. Установлено, что рассматриваемый «буферный слой» прогревается на глубину менее 0,005 м и толщина слоя испарившейся воды составляет около 0,001 м. Поэтому возможное увеличение  $L_{w-f}$  относительно 0,005 м практически не влияет на условия охлаждения ЛГМ и, как следствие, подавления реакции его разложения.

Для зависимостей, приведенных на рис. 3.4.3, сформулированы аппроксимационные выражения:

хвоя ели

$$t_d = -61250 \cdot L_{w-f}^2 + 911,5L_{w-f} + 42,128 \text{ при } 0,002 < L_{w-f} < 0,01 \text{ м,} \quad (3.4.4)$$

листья березы

$$t_d = -98750L_{w-f}^2 + 1476,5L_{w-f} + 36,188 \text{ при } 0,002 < L_{w-f} < 0,01 \text{ м,} \quad (3.4.5)$$

хвоя сосны

$$t_d = -64464L_{w-f}^2 + 961,07L_{w-f} + 30,718 \text{ при } 0,002 < L_{w-f} < 0,01 \text{ м.} \quad (3.4.6)$$

Зависимости времени подавления реакции термического разложения от коэффициента  $\gamma$ , иллюстрирующего относительную долю воды в «буферном слое», при  $L_f=0,04$  м,  $L_{w-f}=0,01$  м и  $\alpha=20$  Вт/(м<sup>2</sup>К) представлены на рис. 3.4.4.

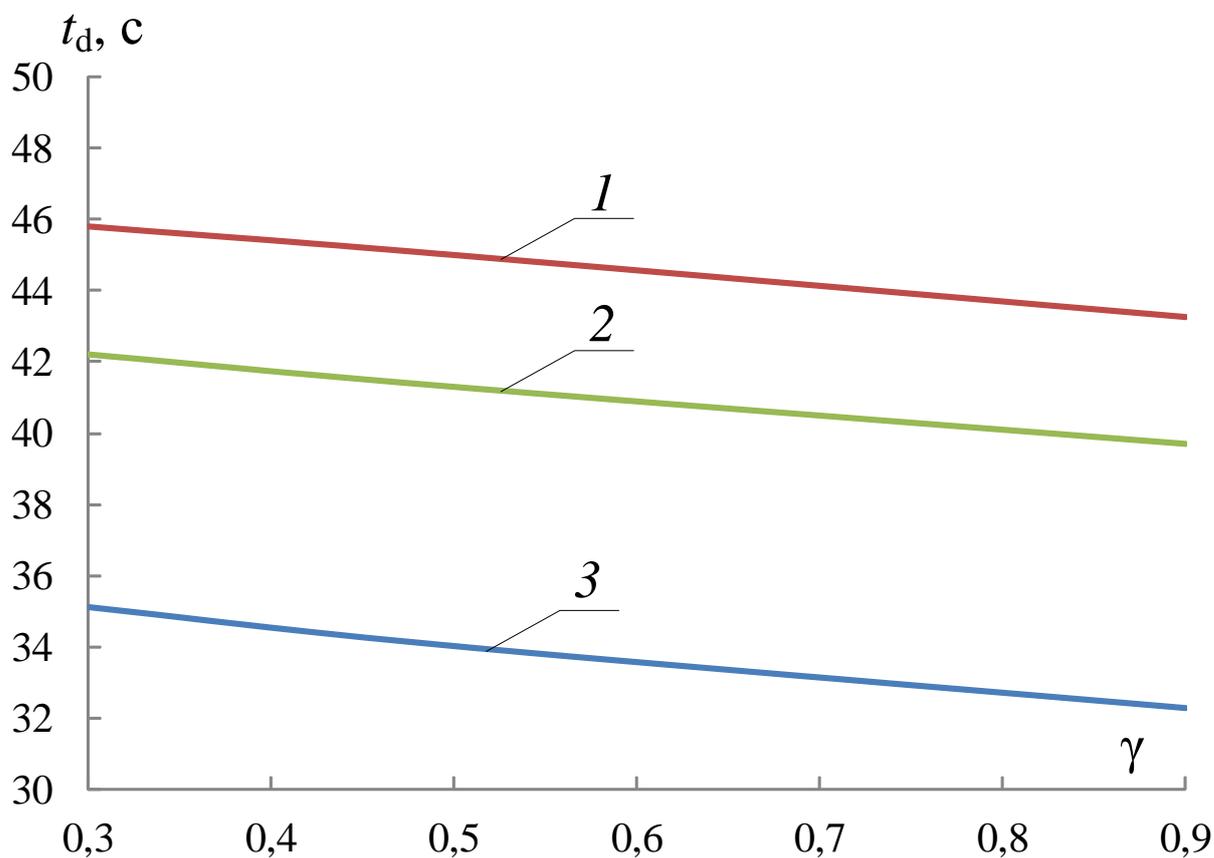


Рисунок 3.4.4. Зависимости времени подавления реакции термического разложения от коэффициента  $\gamma$  при  $L_f=0,04$  м и  $L_{w-f}=0,01$  м,  $\alpha=20$  Вт/(м<sup>2</sup>К):

1 – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Установлено, что варьирование параметра  $\gamma$  умеренно (менее 1 %) влияет на условия охлаждения термически разлагающегося ЛГМ. Это можно объяснить тем, что при фазовых превращениях вследствие большой энергии парообразования ( $2 \cdot 10^6$  Дж/кг) испаряется малая доля воды (толщина слоя испарившейся воды составляет менее 0,001 м при  $\gamma=0,5$ ).

Сформулированные аппроксимационные выражения (3.4.1) – (3.4.6) и графические (рис. 3.4.2–3.4.4) зависимости  $t_d=f(L_f)$ ,  $t_d=f(L_{w-f})$  и  $t_d=f(\gamma)$  иллюстрируют возможность подавления реакции термического разложения типичных ЛГМ относительно небольшими по толщине (менее 0,01 м) пленками воды. Даже при наличии рассматриваемых в настоящей работе «буферных слоев» (пленок воды с твердыми включениями) возможно прекращение термического разложения ЛГМ за довольно малые (менее 1 минуты) времена  $t_d$ .

Показано [84, 85, 115], что для существенного (несколько сотен градусов) снижения температуры пламени с минимальными затратами воды целесообразно мелкодисперсное распыление жидкости. Для снижения температуры реагирующего слоя ЛГМ до значений не более 500 К (соответствуют условиям начала пиролиза ЛГМ) достаточно пленок воды толщиной несколько миллиметров [84, 85]. При этом времена полного прекращения реакции в прогретом слое ЛГМ составляют менее 5 минут. Следует отметить, что при движении через пламена малой совокупности капель жидкости (в частности, воды) поверхности ЛГМ достигает только их некоторая часть [95]. В таком случае при мелкодисперсном распылении маловероятно образование монолитных пленок жидкости на поверхности реагирующего материала – капли осаждаются на определенном расстоянии между собой. Представляет интерес анализ возможности подавления реакции пиролиза ЛГМ группой капель, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. В п. 3.5 приведена схема, учитывающая эти факторы.

### 3.5 Влияние группы капель воды на поверхности лесного горючего материала на интенсивность его термического разложения

Область решения рассматриваемой задачи [122, 146] для системы «ЛГМ – капли воды – парогазовая смесь» представлена на рисунке 2.2.5.

Считалось, что жидкость прогревается за счет теплообмена с термически разлагающимся нагретым до высоких температур ЛГМ. На всех границах капель воды при достижении соответствующих условий происходит парообразование (испарение). За счет теплоты эндотермического фазового перехода и кондуктивного теплообмена температура ЛГМ снижается.

По результатам численного моделирования определялось время ( $t_d$ ) снижения температуры ЛГМ до температуры начала термического разложения  $T_d$ .

На рис. 3.5.1 приведены зависимости времени подавления реакции термического разложения наиболее типичного ЛГМ – хвои сосны от расстояния между двумя каплями жидкости ( $H_w$ ) при различных температурах в следе «водяного снаряда». Можно отметить, что при уменьшении  $H_w$  времена прекращения реакции термического разложения  $t_d$  нелинейно снижаются. Также целесообразно выделить изменение характера снижения  $t_d$  при варьировании температуры парогазовой смеси  $T_m$ . Так, при значениях  $T_m$ , соответствующих диапазону типичного «водяного снаряда» (300–450 К), зависимости  $t_d=f(H_w)$  отличаются незначительно (кривые 1–3 практически «сливаются»). Однако при  $T_m > 450$  К и повышении расстояния  $H_w$  до 0,06 м кривые 4–6 существенно (времена  $t_d$  отличаются более чем на 45 %) расходятся (рис. 3.5.2). Установлено, что при  $T_m > 800$  К и  $H_w > 0,06$  м реакция термического разложения не подавляется ( $t_d \rightarrow \infty$ ). Поэтому значения  $T_m = 800$  К и  $H_w = 0,06$  м можно считать предельными для исследуемой системы (рис. 3.5.1).

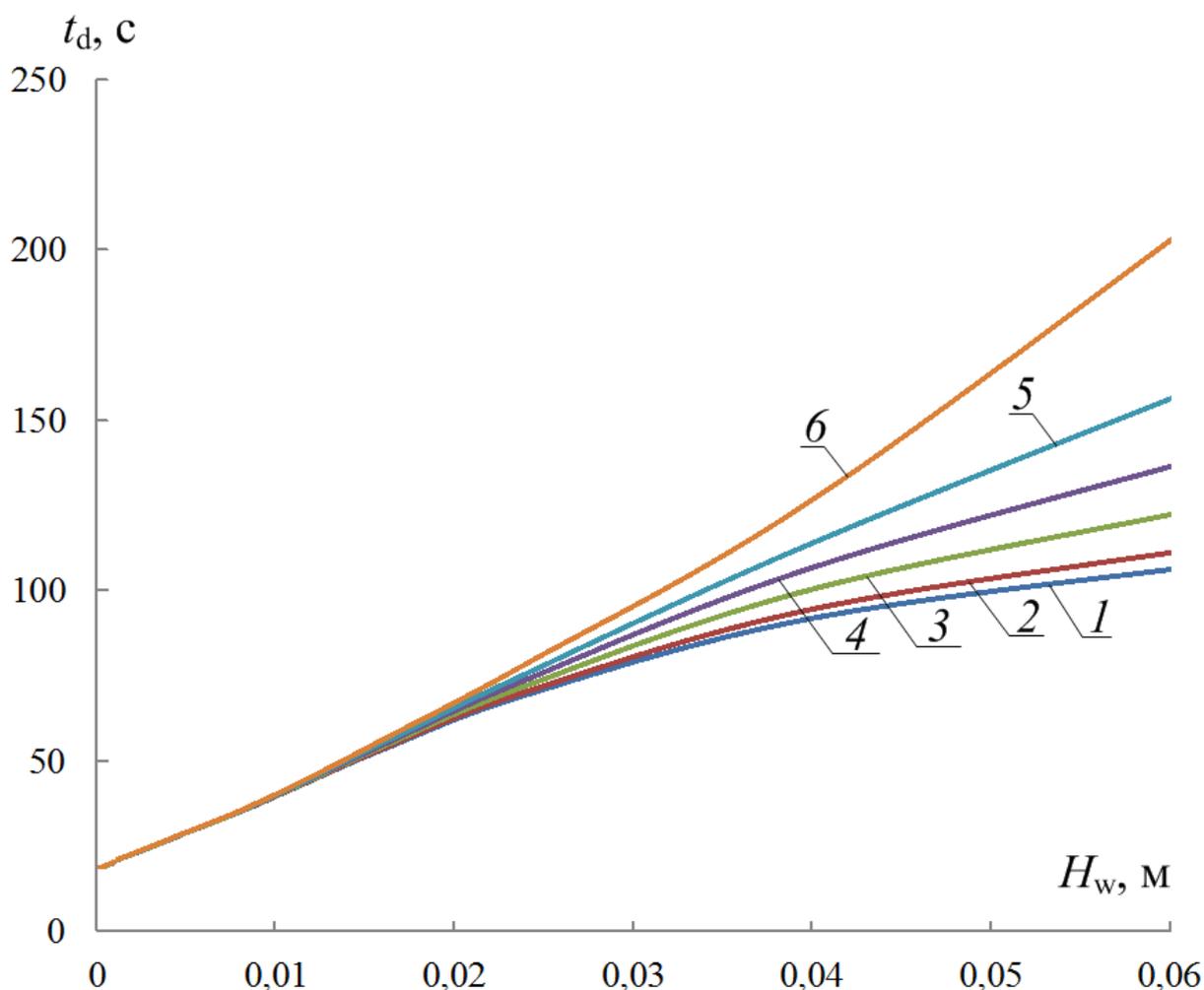


Рисунок 3.5.1. Зависимости времени подавления реакции термического разложения ЛГМ (хвоя сосны) от параметра  $H_w$  при различных температурах в следе «водяного снаряда» и  $L_f=0,04$  м: 1 –  $T_m=300$  К, 2 –  $T_m=350$  К, 3 –  $T_m=450$  К, 4 –  $T_m=550$  К, 5 –  $T_m=650$  К, 6 –  $T_m=800$  К

На рис. 3.5.1 показано, что при  $H_w < 0,02$  м кривые 1–6 «сливаются». Данный результат показывает, что условия подавления реакции разложения материала обеспечиваются даже при достаточно высоких температурах внешней парогазовой среды. Теплоты фазового превращения при испарении двух «соседних» каплей воды достаточно для поглощения энергии, аккумулированной в прогретом слое ЛГМ, и прекращения реакции его термического разложения во всем диапазоне возможного изменения  $T_m$  за практически равные времена  $t_d$  при значении безразмерного расстояния  $H_w=0,02$  м.

В результате обработки зависимостей, приведенных на рис. 3.5.1, получена группа аппроксимационных выражений. Ниже представлены наиболее типичные из них:

$$t_d = -28611 \cdot H_w^3 - 15788 \cdot H_w^2 + 2576,7 \cdot H_w + 16,351$$

при  $0 < H_w < 0,06$  м и  $T_m = 300$  К; (3.5.1)

$$t_d = -58641 \cdot H_w^3 - 11906 \cdot H_w^2 + 2533,5 \cdot H_w + 16,464$$

при  $0 < H_w < 0,06$  м и  $T_m = 350$  К; (3.5.2)

$$t_d = -122649 \cdot H_w^3 - 3213,2 \cdot H_w^2 + 2425,4 \cdot H_w + 16,79$$

при  $0 < H_w < 0,06$  м и  $T_m = 450$  К; (3.5.3)

$$t_d = -162089 \cdot H_w^3 + 4691,3 \cdot H_w^2 + 2320,1 \cdot H_w + 17,171$$

при  $0 < H_w < 0,06$  м и  $T_m = 550$  К; (3.5.4)

$$t_d = -145738 \cdot H_w^3 + 10244 \cdot H_w^2 + 2244,3 \cdot H_w + 17,445$$

при  $0 < H_w < 0,06$  м и  $T_m = 650$  К; (3.5.5)

$$t_d = 71668 \cdot H_w^3 + 8985,4 \cdot H_w^2 + 2267 \cdot H_w + 17,386$$

при  $0 < H_w < 0,06$  м и  $T_m = 800$  К; (3.5.6)

На рис. 3.5.2 приведены зависимости времени подавления реакции термического разложения от температуры в следе «водяного снаряда» ( $T_m$ ) при  $L_f = 0,04$  м и  $H_w = 0,015$  м. Рассмотрены три варианта типичных ЛГМ: листья березы, хвоя сосны и ели. Можно отметить нелинейный характер зависимостей  $t_d = f(T_m)$ . Это обусловлено как химическим реагированием в прогретом слое ЛГМ, так и интенсивным парообразованием в малой окрестности поверхности последнего.

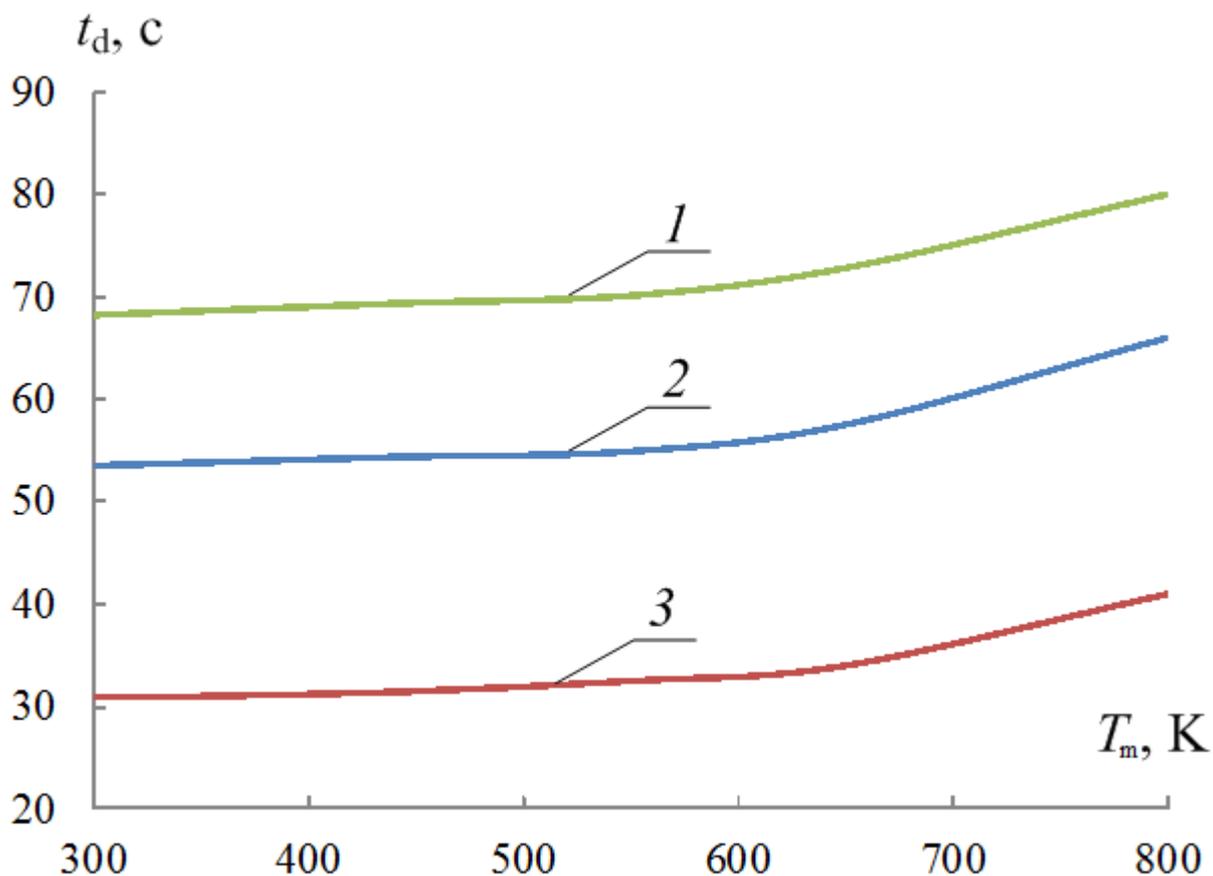


Рисунок 3.5.2. Зависимости времени подавления реакции от температуры в следе «водяного снаряда»  $T_m$  при  $L_f=0,04$  м,  $H_w=0,015$  м:

1 – листья березы, 2 – хвоя сосны, 3 – хвоя ели

Для зависимостей, приведенных на рис. 3.5.2, также получены аппроксимационные выражения:

листья березы

$$t_d = 6 \cdot 10^{-5} T_m^2 - 0,0449 T_m + 76,575 \text{ при } 300 < T_m < 800 \text{ К;} \quad (3.5.7)$$

хвоя сосны

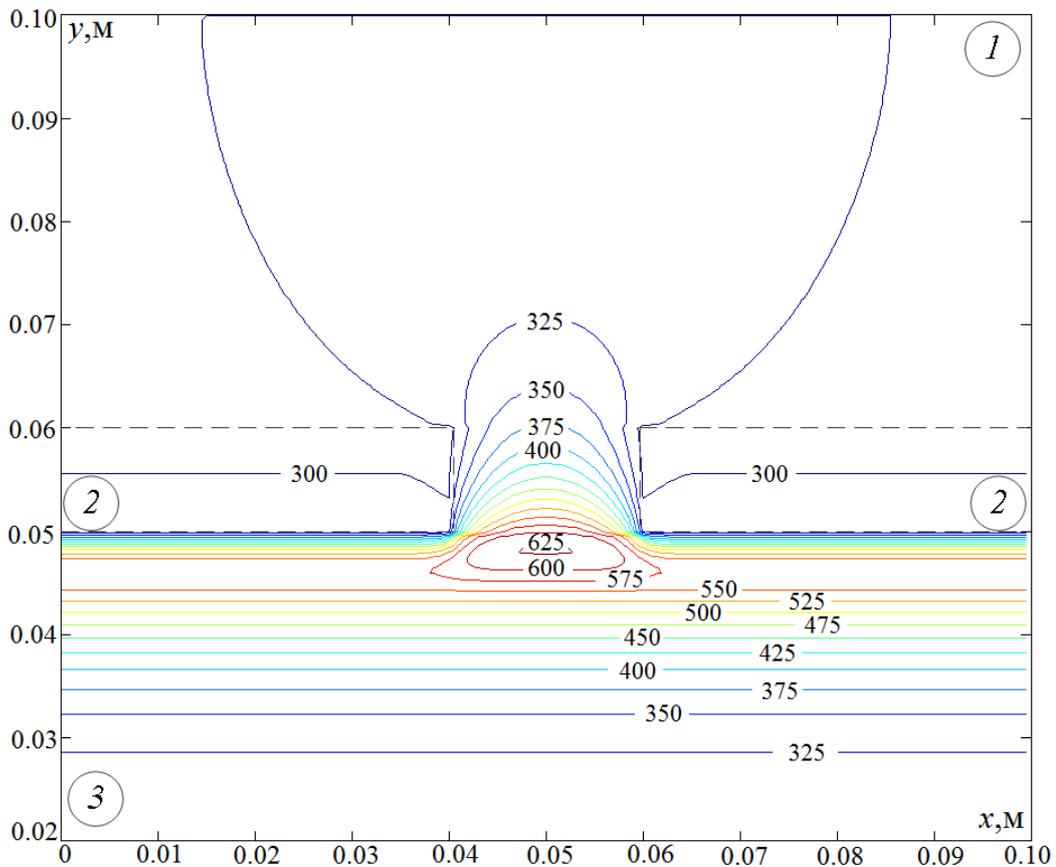
$$t_d = 8 \cdot 10^{-5} T_m^2 - 0,06 T_m + 65,233 \text{ при } 300 < T_m < 800 \text{ К;} \quad (3.5.8)$$

хвоя ели

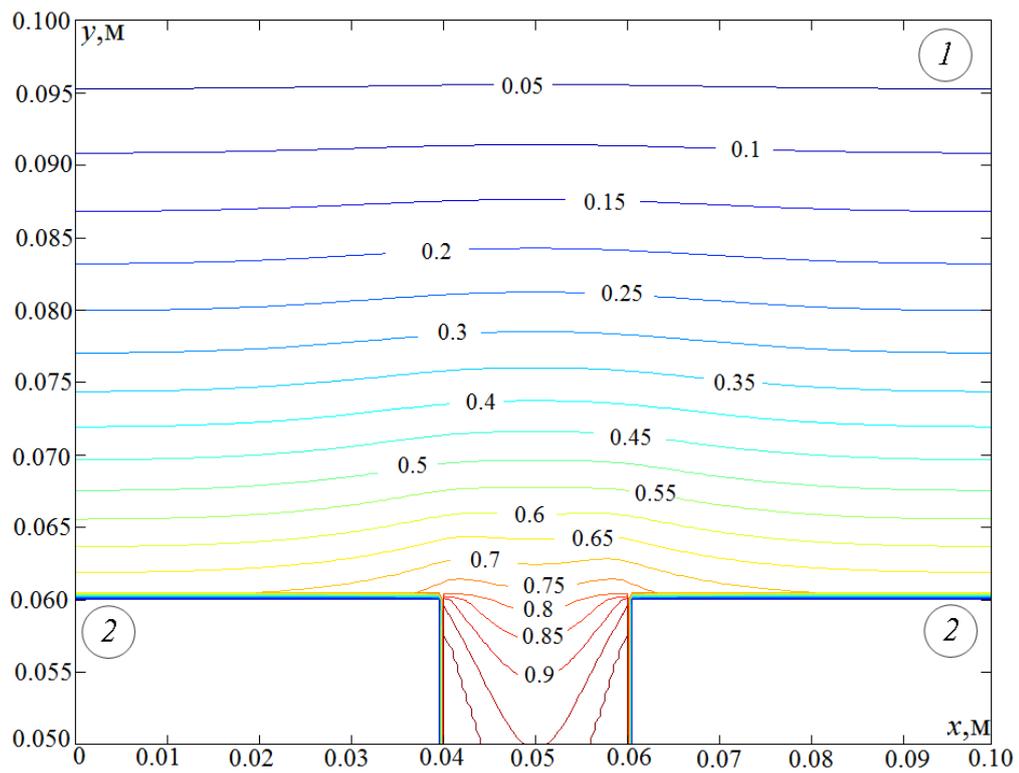
$$t_d = 6 \cdot 10^{-5} T_m^2 - 0,0455 T_m + 39,616 \text{ при } 300 < T_m < 800 \text{ К.} \quad (3.5.9)$$

Установленные (рис. 3.5.1, 3.5.2) зависимости  $t_d=f(H_w)$  и  $t_d=f(T_m)$  можно объяснить тем, что при термическом разложении ЛГМ вследствие интенсивного тепловыделения значительно возрастает температура

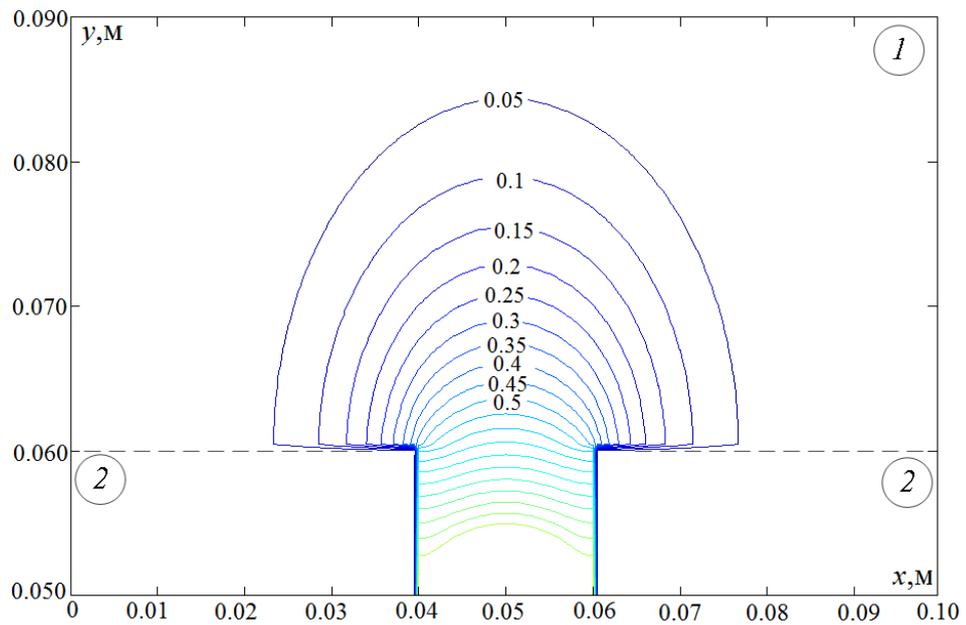
парогазовой смеси в области между каплями (рис. 3.5.3, *a*). При расстояниях между каплями менее 0,02 м большая доля этого тепла расходуется на реализацию фазовых превращений на боковых границ ( $X=X_1, X=X_2, Y_1 < Y < Y_2$ ) каплей (вследствие большого теплового эффекта испарения жидкости –  $Q_2=2,26$  МДж/кг). В этом случае область прогрева парогазовой смеси ограничивается толщиной каплей жидкости  $L_{др}$  (рис. 3.5.3, *a*). При увеличении значений  $H_w$  установлено существенное возрастание размеров области прогрева парогазовой смеси относительно  $L_{др}$  (рис. 3.5.1).



*a*



*б*



*в*

Рисунок 3.5.3. Изотермы (*а*), изолинии концентраций паров воды (*б*) и продуктов пиролиза (*в*) в системе «хвоя сосны – капли воды – парогазовая смесь» при  $T_m=300$  К,  $H_w=0,02$  м,  $L_f=0,05$  м,  $t=10$  с: 1 – парогазовая смесь, 2 – капли воды, 3 – ЛГМ

В результате численного моделирования процессов тепломассопереноса в рассматриваемой системе (рис. 2.2.4) выявлено, что при интенсивном парообразовании значительно возрастают линейные скорости вдува водяных паров во внешнюю парогазовую среду. На рис. 3.5.3 приведены изолинии концентраций паров воды и газообразных продуктов пиролиза ЛГМ при  $t=10$  с. Следует отметить, что массовая скорость термического разложения  $W_3$  существенно превышает скорость парообразования  $W_2$  при временах  $1 < t < 3$  с. Процесс вдува продуктов пиролиза в парогазовую область над ЛГМ не вызывает ускорение реакции их окисления, так как в реальном следе «водяного снаряда» окислителя практически нет (относительная концентрация менее 5 %). Как следствие, не формируется область интенсивного тепловыделения в результате химического реагирования, что приводит к инерционному остыванию как парогазовой области, так и приповерхностного слоя ЛГМ (рис. 3.2.2).

При остывании ЛГМ значения  $W_3$  существенно снижаются (при  $t > 5$  с выполняется неравенство  $W_3 < W_2$ ). Установлено, что при  $0 < t < t_d$  скорости парообразования сохраняют практически максимальные значения, так как температура на границе «вода – ЛГМ» не уменьшается ниже температуры кипения –  $T_m=370$  К. Как следствие, концентрация паров воды  $C_v$  растет в несколько раз быстрее, чем газообразных продуктов пиролиза  $C_f$  (рис. 3.5.3). Вследствие остывания ЛГМ при дальнейшем увеличении времен реализации рассматриваемых процессов массовые скорости вдува продуктов пиролиза снижаются. Концентрации паров воды  $C_v$  к моменту полного прекращения реакции термического разложения материала в несколько раз превышают соответствующие значения  $C_f$ . Можно сделать вывод о том, что даже при наличии незакрытой каплями жидкости поверхности ЛГМ практически всю парогазовую область над ним заполняют водяные пары.

Используя полученные результаты численных исследований можно сделать вывод о возможности существенного повышения коэффициента эффективного использования воды при тушении лесных пожаров [100–102]

за счет мелкодисперсного распыления и поддержания некоторой требуемой температуры  $T_m$  в течение ограниченного времени  $t_d$ . Полученные результаты еще раз подчеркивают целесообразность применения «тонкораспыленной воды», «паровых завес» и различных газопарокапельных смесей как для локализации пламен, так и полного прекращения лесных пожаров [35–38, 59]

Результаты исследований [82–85] показывают, что теплосодержание области непосредственного газофазного горения типичных ЛГМ (листья березы, хвоя сосны и ели) в десятки раз превышает теплосодержание приповерхностного слоя прогретых до высоких (более 600 К) температур ЛГМ. На снижение температуры пиролизуемого ЛГМ до  $T_d=400–500$  К (значения соответствуют началу термического разложения) необходимо не более 3 % воды, затрачиваемой на подавление непосредственно пламени в зоне газофазного горения [83–85]. Характерные размеры последней могут достигать 10–15 м [85], в то время как толщина прогретого слоя ЛГМ в условиях лесных пожаров составляет не более 0,1 м (как правило, эта величина изменяется от 0,02 м до 0,06 м [2, 160]). Механизм подавления реакции может существенно измениться при прохождении воды в поры ЛГМ (эти заключения являются следствием анализа результатов многочисленных исследований, например [86, 87], процессов теплопереноса для влажной древесины и ЛГМ). Представляет интерес проведение численного анализа процессов теплопереноса, фазовых превращений и химического реагирования при подавлении реакции термического разложения ЛГМ и различных условиях теплообмена на границе «вода – ЛГМ» (особенно, при прохождении воды в поры ЛГМ с температурой  $T>T_d$ ). В п. 3.6 приведены результаты анализа с учетом этих факторов.

### 3.6 Особенности испарения воды в порах лесного горючего материала в процессе его деструкции

Область решения рассматриваемой задачи [143, 144] для системы «исходный прогретый до высоких температур ЛГМ – слой с порами, заполненными водой» представлена на рисунке 2.2.4.

При постановке задачи предполагалось, что теплофизические характеристики ЛГМ и воды не зависят от температуры. В рассматриваемых условиях значения коэффициентов теплопроводности ( $\lambda$ ), теплоемкости ( $C$ ) и плотности ( $\rho$ ) для исследуемых веществ изменяются в пределах 10–15 % [138, 145, 156, 159]. Поэтому численные оценки основного интегрального параметра процесса –  $t_d$  в первом приближении можно провести при условии  $\lambda=\text{const}$ ,  $C=\text{const}$ ,  $\rho=\text{const}$ .

При решении задачи теплопереноса рассчитывались распределения температуры в приповерхностном слое термически разлагающегося ЛГМ в разные моменты времени ( $0 \leq t \leq t_d$ ).

На рис. 3.6.1 приведены типичные распределения температуры в приповерхностном слое хвои сосны толщиной  $L_f=0,04$  м при характерном размере слоя ЛГМ с порами, заполненными водой ( $L_{w-h}=0,002$  м).

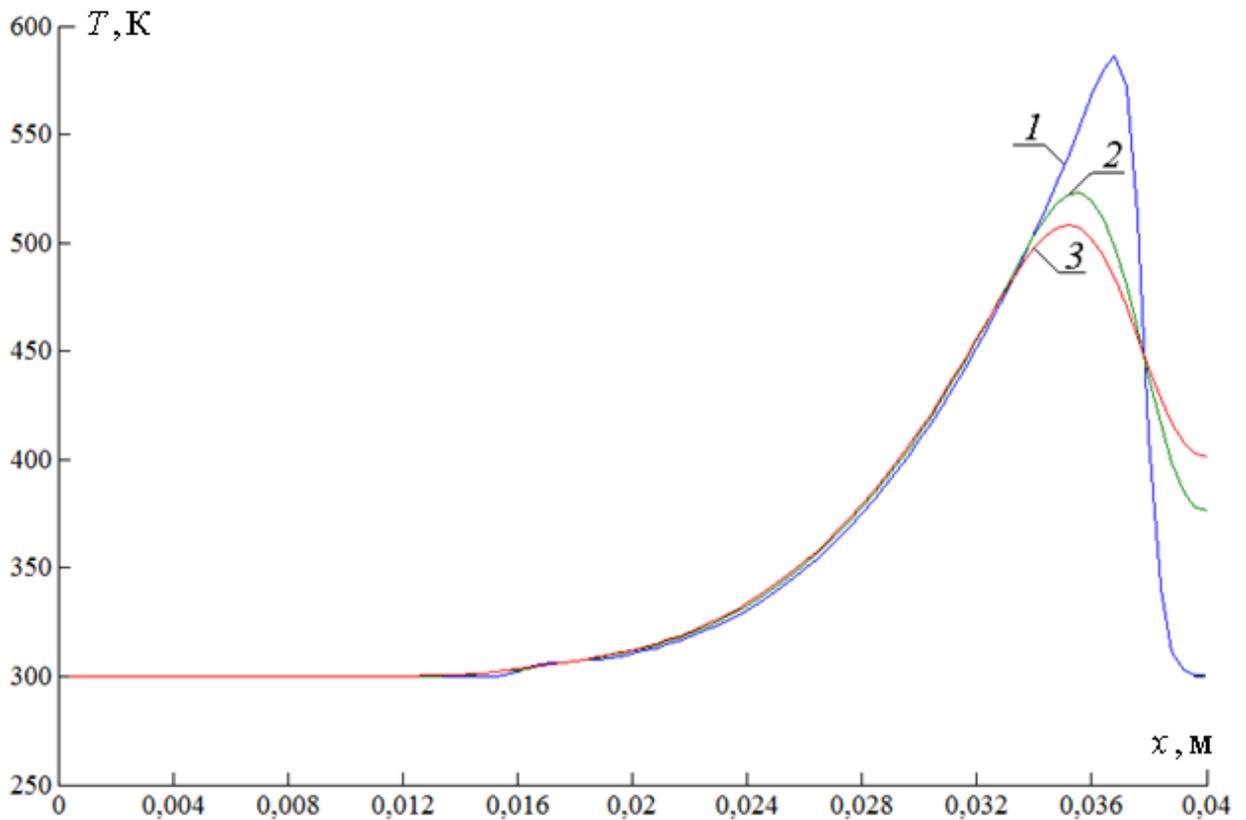


Рисунок 3.6.1. Распределения температуры в приповерхностном слое хвои сосны при  $L_f=0,04$  м и  $L_{w-h}=0,002$  м в разные моменты времени:  
 $1 - t = 1$  с,  $2 - t = 25$  с,  $3 - t = 50$  с

Видно, что температура в приповерхностном слое типичного ЛГМ (хвоя сосны) снижается нелинейно (рис. 3.6.1.). Можно отметить достаточно ограниченную по размерам область интенсивного прогрева и, соответственно, впоследствии остывания ЛГМ. Эта область имеет характерный размер около 0,02–0,025 м от поверхности ЛГМ – соответствует зоне прогрева типичных ЛГМ в условиях реального пожара согласно результатам решения задачи [145] и основным теоретическим положениям [2, 34].

Профили  $T(x)$  показывают (рис. 3.6.1.), что в результате испарения воды температура приповерхностного слоя ЛГМ существенно (более 100 К) снижается уже через несколько десятков секунд. Это, в первую очередь,

можно объяснить значительным теплопоглощением на границе «вода – ЛГМ» при реализации эндотермических фазовых превращений.

На рис. 3.6.2 представлены полученные в результате проведенных численных исследований зависимости времени подавления реакции термического разложения от толщины ЛГМ при  $L_{w-h}=0,002$  м.

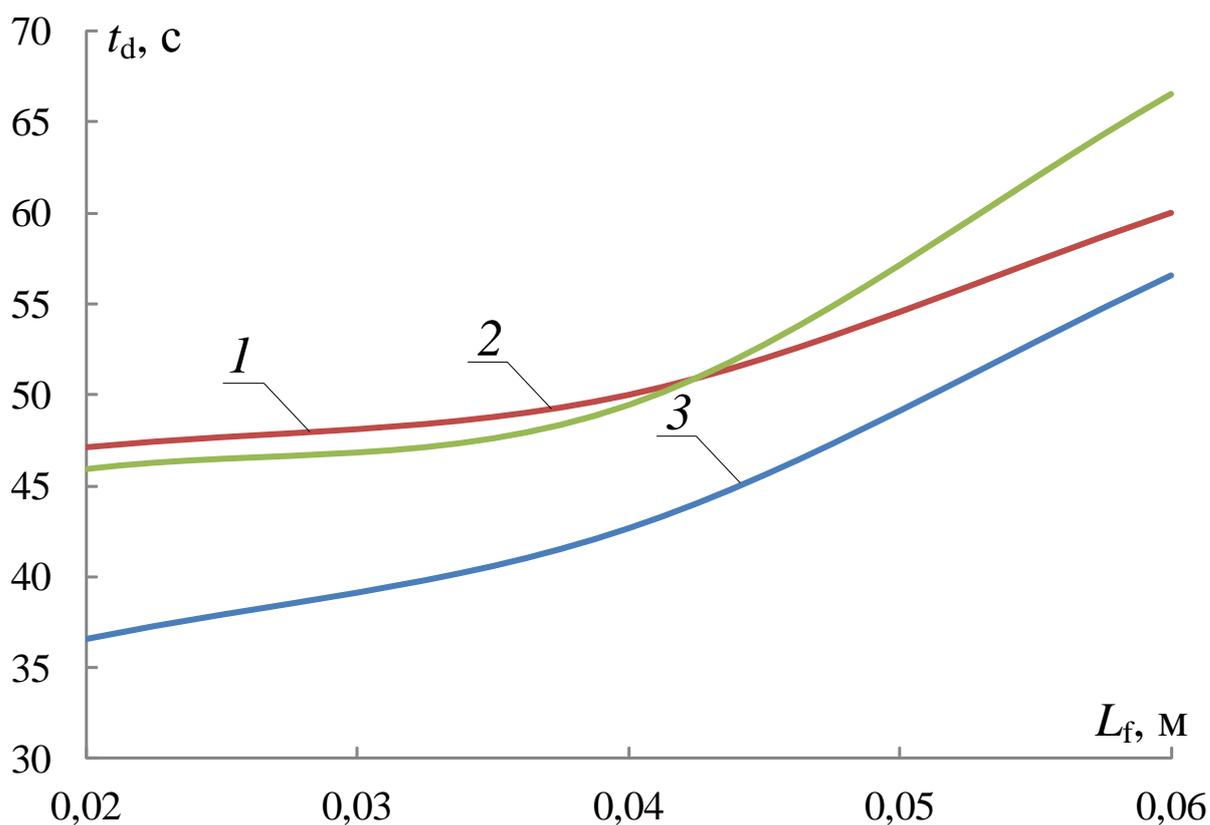


Рисунок 3.6.2. Зависимости времени подавления реакции термического разложения от толщины ЛГМ при  $L_{w-h}=0,002$  м: 1 – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Можно отметить, что время прекращения реакции термического разложения меняется достаточно существенно при варьировании  $L_f$  в типичном для практики тушения пожаров диапазоне 0,02–0,06 м [2, 34]. Время  $t_d$  возрастает с увеличением  $L_f$  нелинейно. Так, например, при  $L_f=0,02$  – 0,04 м времена  $t_d$  отличаются не более чем на 10 с. При увеличении  $L_f$  до 0,06 м зафиксирован рост  $t_d$  на 20 с относительно полученных значений  $t_d$  при  $L_f=0,02$  мм. Установленную особенность можно объяснить различными

запасами энергии, аккумулированной в ЛГМ и, как следствие, отличными распределениями  $T_0(x)$  и  $\varphi_0(x)$  при его горении [138]. Кроме того, следует отметить, что существенный вклад в тепловой баланс вносят эндотермические фазовые превращения и термическое разложение.

В результате обработки зависимостей, приведенных на рис. 3.6.2, получена группа аппроксимационных выражений. Ниже представлены наиболее типичные из них:

хвоя ели

$$t_d = 8900 \cdot (L_f)^2 - 390 \cdot (L_f) + 51,36 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м} \quad (3.6.1)$$

листья березы

$$t_d = 16963 \cdot (L_f)^2 - 841,75 \cdot (L_f) + 55,97 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м} \quad (3.6.2)$$

хвоя сосны

$$t_d = 9775 \cdot (L_f)^2 - 282,5 \cdot (L_f) + 38,32 \text{ при } 0,02 < L_f < 0,06 \text{ м} \quad (3.6.3)$$

Зависимости времени подавления реакции термического разложения рассматриваемых ЛГМ (листья березы, хвоя сосны и ели) от толщины слоя последних с водой в порах ( $L_{w-h}$ ) при  $L_f = 0,04$  м представлены на рис. 3.6.3.

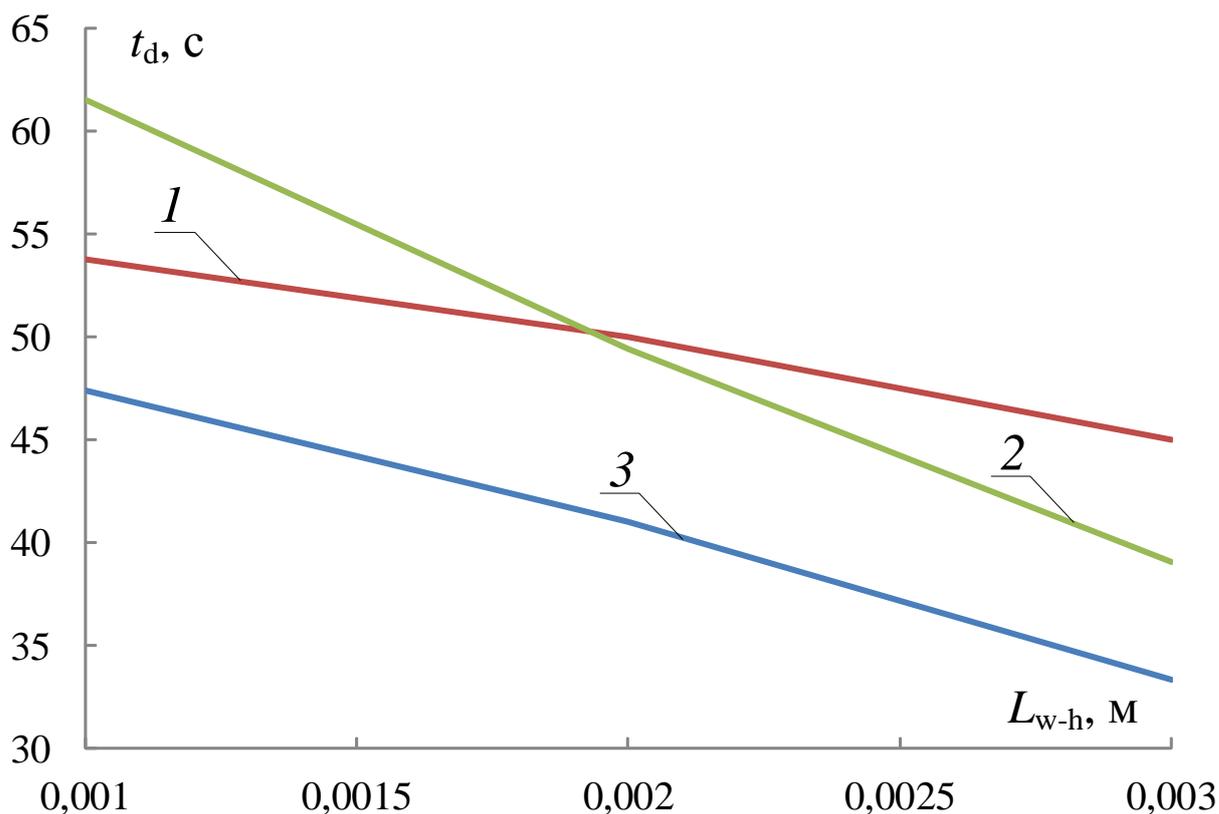


Рисунок 3.6.3. Зависимости времени подавления реакции термического разложения от толщины слоя «ЛГМ – вода» при  $L_f=0,04$  м: 1 – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Показано, что инерционность процесса подавления реакции термического разложения существенно снижается при изменении  $L_{w-h}$  в диапазоне от 0,002 м до 0,004 м. Установленный эффект можно объяснить тем, что при увеличении  $L_{w-h}$  вода заполняет поры слоя ЛГМ, в котором скорости химического реагирования и тепловыделение максимальны. Как следствие, жидкостью блокируется область максимального энерговыделения в ЛГМ. Это приводит к значительному уменьшению характерных времен  $t_d$ . При относительно малых значениях  $L_{w-h}$  (менее 0,001 м) достаточно большой (более 0,003) по толщине слой реагирующего ЛГМ интенсивно пиролизуется. Скорости химического реагирования в этой области снижаются вследствие охлаждения прилегающих, заполненных водой, слоев ЛГМ. Однако этот процесс занимает существенно большие времена  $t_d$ , чем при  $L_{w-h} \rightarrow 0,003$  м.

В результате обработки зависимостей, приведенных на рис. 3.6.3, получена группа аппроксимационных выражений. Ниже представлены наиболее типичные из них:

хвоя ели

$$t_d = -605 \cdot 10^3 \cdot (L_{w-h})^2 - 1935 \cdot (L_{w-h}) + 56,29 \text{ при } 0,001 < L_{w-h} < 0,003 \text{ м} \quad (3.6.4)$$

листья березы

$$t_d = 85 \cdot 10^4 \cdot (L_{w-h})^2 - 14610 \cdot (L_{w-h}) + 75,26 \text{ при } 0,001 < L_{w-h} < 0,003 \text{ м} \quad (3.6.5)$$

хвоя сосны

$$t_d = -61 \cdot 10^4 \cdot (L_{w-h})^2 - 4580 \cdot (L_{w-h}) + 52,6 \text{ при } 0,001 < L_{w-h} < 0,003 \text{ м} \quad (3.6.6)$$

Зависимости времени подавления реакции термического разложения от коэффициента  $\gamma$ , иллюстрирующего относительную долю жидкости в порах ЛГМ, при  $L_f=0,06$  м и  $L_{w-h}=0,002$  м представлены на рис. 3.6.4.

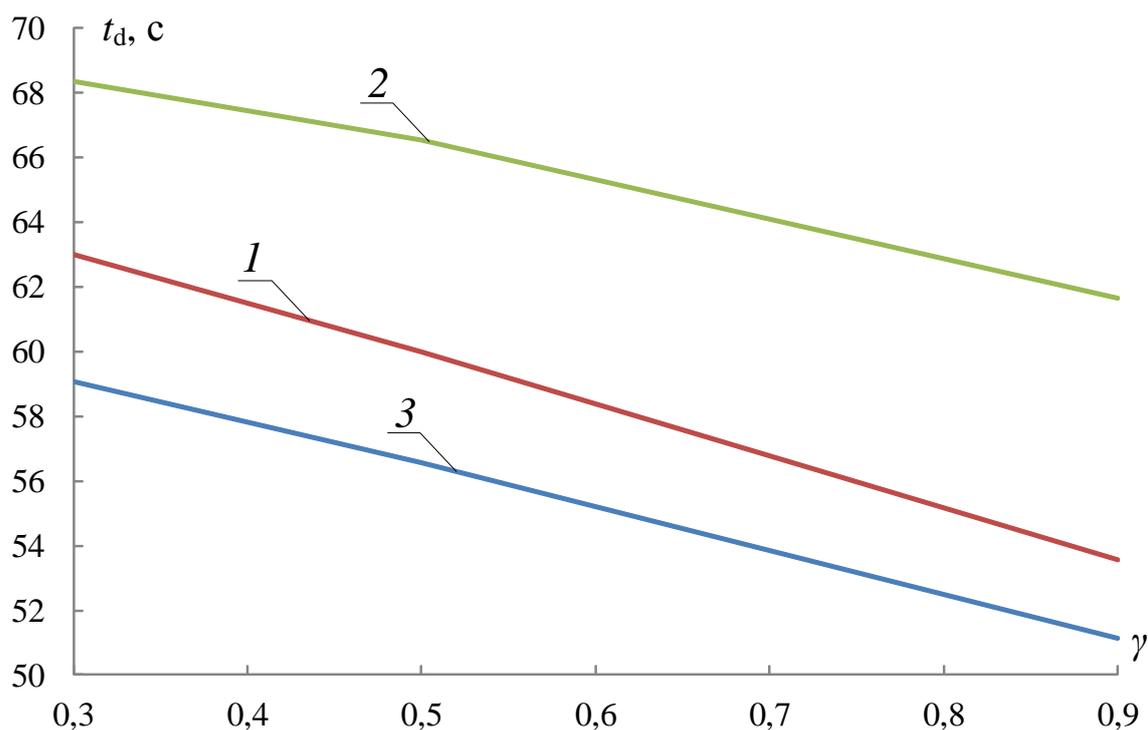


Рисунок 3.6.4. Зависимости времени подавления реакции термического разложения от температуры внешней парогазовой среды при  $L_f=0,06$  м и  $L_{w-h}=0,002$  м: 1 – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Установлено, что варьирование параметра  $\gamma$  в рассматриваемой системе (рис. 2.2.5) умеренно (менее 1 %) влияет на условия охлаждения ЛГМ. Это

можно объяснить тем, что при фазовых превращениях вследствие большой энергии парообразования ( $2 \cdot 10^6$  Дж/кг) испаряется малая масса воды (вычисления показали, что толщина слоя испарившейся воды составляет менее 0,001 м при  $\gamma=0,5$ ). Как следствие, для подавления реакции термического разложения достаточно относительно небольших значений  $\gamma$  в приповерхностном слое рассматриваемых ЛГМ.

В заключении можно отметить, что в диссертации выполнен анализ нескольких наиболее типичных механизмов воздействия воды на термически разлагающийся ЛГМ. Так, рассмотрены условия, при которых: вода проходит в поры ЛГМ; на поверхности термически разлагающегося ЛГМ формируется пленка воды конечной толщины; между слоем воды и реагирующим ЛГМ формируется «буферная область» – слой жидкости с твердыми включениями (ветки, листья, кора деревьев). Установлено, что времена  $t_d$  принимают минимальные значения в случае прохождения воды в поры ЛГМ. В условиях  $\gamma \rightarrow 0$  жидкость, достигающая поверхности ЛГМ при сбросе в зону горения, растекается по поверхности ЛГМ (формируется пленка воды с некоторой конечной толщиной). Установлено, что в этом случае времена  $t_d$  возрастают на 15–20 %. При возникновении же вблизи поверхности термически разлагающегося ЛГМ «буферной области» (возможно при однонаправленном движении с водой листьев, коры и веток деревьев) времена  $t_d$  увеличиваются на 25–35 % относительно постановки задачи, в которой вода проникает в поры реагирующего ЛГМ.

Используя результаты выполненных численных исследований, можно сделать вывод о перспективах существенного повышения эффективности как локализации пламен, так и подавления непосредственно реакции термического разложения в глубине ЛГМ с использованием мелкодисперсной воды [38, 40, 59]. Применение тонкораспыленной воды [38, 40, 59] интенсифицирует парообразование в пламенной зоне горения и, как следствие, позволяет существенно увеличить область в газовой фазе с

пониженной температурой  $T_m$ , а также снизить вероятность формирования пленок воды у поверхности ЛГМ с избыточной толщиной (более 0,005 м).

### **3.7 Рекомендации по использованию полученных результатов и дальнейшему развитию сформулированного в диссертации подхода**

Анализ и обобщение результатов выполненных диссертационных исследований (п. 3.1–3.6) позволили сформулировать следующие рекомендации для повышения эффективности использования существующих и развития новых технологий пожаротушения:

1. Для уменьшения температуры интенсивно пиролизуемого ЛГМ ниже величины температуры начала его термического разложения достаточно сформировать парогазовую смесь с температурой 300–450 К на период времени ( $t_d=6-13$  минут) над его поверхностью (за счет мелкодисперсного распыления воды в пламенной зоне горения).

2. Для уменьшения возможности термического разложения ЛГМ нецелесообразно «чрезмерное» (избыточное) заливание водой его поверхности. Можно рекомендовать специальное распыление жидкости ( $30 < R_d < 100$  мкм) с формированием у поверхности ЛГМ малых по толщине пленок воды ( $L_{w-f}=1-3$  мм). К тому же, при специализированном распылении существенно снижается вероятность формирования относительно больших по толщине «буферных слоев» как вследствие малого расхода воды, так и небольшой доли уносимых жидкостью листьев, веток и коры стволов деревьев.

3. Установлены минимальные толщины пленок воды на поверхности интенсивно пиролизуемых ЛГМ ( $L_e=0,04-0,14$  мм), обеспечивающие подавление реакции термического разложения ЛГМ. Можно рекомендовать поддержание условий, при которых значения  $L_e$  соответствуют выделенному диапазону.

4. Проанализированы условия прекращения реакции пиролиза ЛГМ при проникновении воды в поры приповерхностного слоя термически разлагающегося ЛГМ. Полученные результаты позволяют заключить, что наличие хвоинок и других элементов в пленках воды не может существенно повлиять на условия подавления реакции термического разложения. Главную роль играет парообразование жидкости.

5. Выполненные численные исследования показали, что расстояние между каплями воды  $H_w$  существенно влияет на прекращение реакции термического разложения ЛГМ (листья березы, хвоя сосны и ели). При этом показано, что в зависимости от температуры парогазовой смеси у поверхности ЛГМ и, как следствие, между каплями жидкости времена  $t_d$  могут отличаться на 10–40 % при идентичных значениях  $H_w$ .

6. Сформулированные в настоящей работе аппроксимационные выражения можно использовать при прогностическом определении условий, необходимых и достаточных для уменьшения температуры пиролизующегося ЛГМ ниже температуры его термического разложения с различной толщиной нагретого до высоких температур слоя ЛГМ. Можно рекомендовать применение полученных аппроксимационных выражений для определения достаточных (с точки зрения времен подавления реакции разложения и минимизации расхода воды) объемов жидкости.

Подводя итог выполненным при работе над диссертацией исследованиям, автор считает возможным сформулировать несколько рекомендаций для повышения эффективности существующих и разрабатываемых технологий пожаротушения.

Одним из наиболее значимых, по мнению автора диссертации, является обоснование нецелесообразности чрезмерного заливания водой ограниченных по размерам характерных участков лесных пожаров. В диссертации достаточно наглядно продемонстрированы возможности существенного повышения эффективности прекращения реакции термического разложения ЛГМ воздействием воды (особенно, паров, капель

и тонких пленок) на нагретый до высоких температур приповерхностный слой ЛГМ. Результаты решения сопряженных задач, как показали проведенные исследования, могут обеспечить существенное снижение времен прекращения реакции пиролиза ЛГМ, как следствие локализацию и ликвидацию возгораний лесного массива. Поэтому, несомненно, перспективным является дальнейшее развитие сформулированного в диссертации подхода к анализу физико-химических процессов в условиях интенсивных фазовых превращений при подавлении реакции пиролиза ЛГМ воздействием паров, капель и тонких пленок.

Выполненные экспериментальные и теоретические исследования позволили разработать группу прогностических программных кодов, на которые получены соответствующие свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [161–164].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика экспериментальных исследований условий и характеристик протекания процессов термического разложения типичных ЛГМ в условиях воздействия на последние пароводяного облака.

2. Впервые разработана группа физических и математических моделей процессов, протекающих при прекращении деструкции ЛГМ, отличающихся от известных учетом влияния на процесс термического разложения капель, пленок и паров воды.

3. Установлены температуры в «следе водяного снаряда», достаточные для прекращения реакции термического разложения ЛГМ. Выделены условия, при которых реакция деструкции в слое типичного ЛГМ прекращается, например, при температурах в «следе снаряда» ниже 340 К и периодов времени сохранения этого следа  $t_d=6-13$  минут.

4. Установлены толщины пленок воды на поверхности ЛГМ ( $L_e=0,03-0,09$  мм), обеспечивающие подавление реакции термического разложения ЛГМ.

5. Проанализированы условия прекращения реакции пиролиза ЛГМ при проникновении воды в поры приповерхностного слоя термически разлагающегося ЛГМ. Рекомендовано специальное распыление жидкости ( $30 < R_d < 100$  мкм) с формированием у поверхности ЛГМ малых по толщине пленок воды ( $L_{w-f}=1-3$  мм).

6. Установлена возможность существенного повышения коэффициента эффективного использования воды при тушении пожаров за счет мелкодисперсного распыления и поддержания некоторой требуемой температуры над пиролизующимся ЛГМ в течение ограниченного времени.

7. Сформулированы аппроксимационные выражения  $t_d=f(T_m)$ ,  $t_d=f(L_f)$ ,  $L_e=f(L_f)$ ,  $t_d=f(L_{w-f})$ ,  $t_d=f(H_w)$  для прогностического моделирования рассматриваемых процессов при различных условиях теплообмена на поверхности термически разлагающегося ЛГМ.

8. Разработаны рекомендации по использованию результатов исследований и сформулированного подхода на практике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ежегодный доклад о состоянии и использовании лесов Российской Федерации за 2011 г. [Электронный ресурс]. – М.: Министерство Природных Ресурсов и Экологии Российской Федерации, 2013. – 114 с. – Режим доступа:  
<https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/780/lesarf2011.pdf>
2. Кузнецов, Г.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий / Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2009. – 301 с.
3. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин – Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.
4. Шеверда, С.В. Современное состояние лесных культур сосны обыкновенной в Иркутской области / С.В. Шеверда, Е.М. Рунова // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2012. – Т. 3. – С. 190–200.
5. Шапарев, Н.Я. Лесные ресурсы России и Беларуси в показателях устойчивого развития / Н.Я. Шапарев // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2013. – № 1. – С. 81–86.
6. Лоскутов, Р.И. Рост и развитие древесных растений дендрофлоры европейской части России в дендрарии института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН / Р.И. Лоскутов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2008. – № 5. – С. 150–154.
7. Олейник, Е.Б. О необходимости комплексного преобразования системы охраны лесов от пожаров / Е.Б. Олейник // Актуальные вопросы современной науки. – 2011. – № 18. – С. 324–332.
8. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий РФ от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного

- характера в 2014 году». – М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. – 350 с.
9. Концепция автоматизированной системы мониторинга деятельности курсантов сибирского института пожарной безопасности / А.А. Мельник, В.С. Коморовский, С.П. Якимов, Л.Д. Якимова // Информация и связь. – 2012. – №5. – С. 50–52.
  10. Коморовский, В.С. Контроль и прогнозирование параметров крупных лесных пожаров как динамических процессов на поверхности земли: диссертация кандидата технических наук / Коморовский Витольд Станиславович. – Красноярск, 2010. – 138 с.
  11. Andrews, P.L. Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System / P.L. Andrews // International Journal of Wildland Fire. – 2014. – Vol. 23. – Issue 1. – P. 21–33.
  12. Атлас риска пожаров на территории Российской Федерации – Москва: ООО «Издательско-продюсерский центр» «Дизайн. Информация. Картография», 2010. – 639 с.
  13. Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2013 году. – 344 с.
  14. Барановский, Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий / Н.В. Барановский, Г.В. Кузнецов. – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2009. – 301 с.
  15. Барановский, Н.В. Проект Российской системы прогноза лесной пожарной опасности / Н.В. Барановский // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2012. – №2. – С. 51–54.
  16. Катаева, Л.Ю. Решение задачи краткосрочного прогнозирования лесных пожаров на территории Нижегородской области / Л.Ю. Катаева // Наука и техника транспорта. – 2007. – №4. – С. 47–54.

17. Доррер, Г.А. Прогнозирование динамики распространения лесных пожаров в России / Г.А. Доррер, С.П. Якимов С.П., С.А. Васильев // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2010. – Т.16, №4. – С. 65–67.
18. Фильков, А.И. Детерминированно-вероятностная система прогноза лесной пожарной опасности: диссертация кандидата физико-математических наук / Фильков Александр Иванович. – Томск, 2005. – 162 с.
19. Кухта, В.Б. Метод моделирования распространения низового пожара в лесных насаждениях с использованием агентного подхода / В.Б. Кухта // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2014. – №5. – С. 92–97.
20. Лоцилов С.А. Влияние термокинетических параметров пиролиза и двухъярусности лесных горючих материалов на процессы распространения лесных пожаров: диссертация кандидата физико-математических наук / Лоцилов Сергей Андреевич. – Нижний Новгород, 2013. – 116 с.
21. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в природных условиях / Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л., Рейно В.В. и др. // Вестник томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – №2. – С. 91–102.
22. Софронов, М.А. Анализ моделей распространения лесных пожаров / М.А. Софронов, А.В. Волокитина, Т.М. Софронова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2010. – №191. – С. 78–85.
23. Полосинов, С.А. Моделирование распространения лесного пожара и его локализации с применением авиационных средств / С.А. Полосинов // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – №4 (50). – С. 26.

- 24.Перминов, В.А. Математическое моделирование распространения плоского фронта лесного пожара / В.А. Перминов // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, №3. – С. 109– 116.
- 25.Влияние водного барьера на эффективность тушения лесного пожара / Н.А. Романова, Д.А. Маслеников, И.Е. Белоцерковская, Л.Ю. Катаева // Инновации в науке. – 2013. – №27. – С. 26–34.
26. Влияние водного барьера на динамику ландшафтных лесных пожаров / И.Е. Белоцерковская, Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников, С.А. Лоцилов // Естественные и технические науки. – 2013. – №3. – С. 15–19.
- 27.Сравнение аналитического и численного решения математической модели низового пожара с учетом влияния угла наклона подстилающей поверхности / Л.Ю. Катаева, И.Е. Белоцерковская, Д.А. Масленников, А.А. Куркин // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, №11. – С. 24–30.
- 28.Катаева, Л.Ю. Численное моделирование динамики пожара с учетом рельефа местности и внешнего поля скоростей / Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников, И.Е. Белоцерковская // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, №12. – С.49–58.
- 29.Пиджаков, А.Ю. Применение авиации МЧС России при тушении лесных пожаров / А.Ю. Пиджаков, Ф.Н. Рещецкий, О.В. Гаврилова // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2011. – №1. – С. 68–71.
- 30.Горшков, В.С. Оценка параметров тушения лесных пожаров авиационными средствами / В.С. Горшков, Е.А. Москвиллин, И.Р. Хасанов // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников: сборник тезисов научно-практической конференции. – Москва: ИИЦ ВНИИ ГОЧС, 2001. – С. 34–35.
- 31.Хасанов, И.Р. Параметры процесса тушения лесных пожаров при подаче воды авиационной техникой / И.Р. Хасанов, В.С. Горшков, Е.А.

- Москвилин // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия: Материалы междунар. конф. – Иркутск: ВСИ МВД России, 2001. – С. 157–158.
32. Хасанов, И.Р. Авиационные методы тушения крупных лесных пожаров / И.Р. Хасанов, Е.А. Москвилин // Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков: материалы XV научно-практической конференции. – Москва: ВНИИПО, 1999. – Ч. 1. – С. 300–301.
33. Григорьевская, А.О. Анализ использования авиации для тушения лесных пожаров / А.О. Григорьевская, Н.В. Иванов, А.В. Вишнёв // Решетневские чтения. – 2014. – Т. 1, №18. – С. 351–352.
34. Щетинский, Е.А. Тушение лесных пожаров / Е.А. Щетинский. – Москва: ВНИИЛМ, 2002. – 104 с.
35. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles / A.I. Karpov, V.B. Novozhilov, A.A. Galat, V.K. Bulgakov // Fire safety science: proceeding of eight international symposium. – 2005. – Vol. 27. – P. 753–764.
36. Автоматическое водяное пожаротушение с применением тонкораспыленной воды на электростанциях / В.В. Соколов, А.Н. Тугов, В.В. Гришин, В.Н. Камышев // Энергетик. – 2008. – № 6. – С. 37–38.
37. Корольченко, Д.А. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях / Корольченко, Д.А., Громовой, В.Ю., Ворогушин, О.О. // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – № 11. – С. 54–57.
38. Андриюшкин, А.Ю. Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой / А.Ю. Андриюшкин, М.Т. Пелех // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2012. – Т. 21, № 1. – С. 64–69.

39. Wighus, R. Water mist fire suppression technology – status and gaps in knowledge / R. Wighus // Proceedings of the international water mist conference. – Vienna, 2001. – P. 1–26.
40. Изучение закономерностей тушения тонкораспыленной водой модельных очагов пожара / Н.П. Копылов, А.Л. Чибисов, А.Л. Душкин, Е.А. Кудрявцев // Пожарная безопасность. – 2008. – № 4. – С. 45–58.
41. Experimental study of the downward displacement of fire-induced smoke by water sprays / Z. Tang, Z. Fang, J.P. Yuan, B. Merci // Fire Safety Journal. – 2013. – Vol. 55. – P. 35–49.
42. Барановский, Н.В. Спутниковые технологии в прогнозе лесной пожарной опасности / Н.В. Барановский // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 4. – С. 12–18.
43. Жарикова, М.В. Концептуальный проект веб-ориентированной географической информационной системы прогноза лесной пожарной опасности / М.В. Жарикова, Н.В. Барановский, Е.Н. Ляшенко // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. № 3. – С. 62–68.
44. Барановский, Н.В. Спутниковые технологии в прогнозе лесной пожарной опасности / Н.В. Барановский // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2013. № 9. – С. 30–38.
45. Воронин, В.И. Анализ многовековой хронологии лесных пожаров и прогноз их возникновения в Байкальском регионе / В.И. Воронин, Р.Г. Шубкин // Пожарная безопасность. – 2007. – № 3. – С. 64–70.
46. Барановский, Н.В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности / Н.В. Барановский // Экология и промышленность России. – 2008. – № 9. – С. 59–61.
47. Барановский, Н.В. Ландшафтное распараллеливание и прогноз лесной пожарной опасности / Н.В. Барановский // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2007. – Т. 10, № 2. – С. 147–158.

- 48.Доррер, Г.А. Динамика лесных пожаров / Г.А. Доррер. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 404 с.
- 49.Barovik, D.V. Mathematical Modelling of Running Crown Forest Fires / D.V. Barovik, V.B. Taranchuk // Mathematical Modelling and Analysis. – 2010. – Vol. 15, № 2. – P. 161–174.
- 50.Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour / E. Pastor, L. Zárate, E. Planas, J. Arnaldos // Progress in Energy and Combustion Science. – 2003. – Vol. 29. – P. 139–153.
- 51.Субботин, А.Н. Математическая модель распространения низового лесного пожара по подстилке или слою опада хвои / А.Н. Субботин // Пожарная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 109–116.
- 52.Физическое моделирование степных пожаров в природных условиях / Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л. и др. // Пожарная безопасность. – 2010. – №2. – С. 100–105.
- 53.Иванилова, Т.Н. Вероятностно-множественные методы моделирования распространения лесных пожаров: диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Иванилова Татьяна Николаевна. – Красноярск, 1991. – 182 с.
- 54.Некрасов, О.Н. Прогнозирование пожароопасной обстановки и скорости распространения лесного пожара с учётом топографических особенностей местности, погодных условий и мер по пожаротушению / О.Н. Некрасов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2014. – № 3. – С. 62–67.
- 55.Вдовенко, М.С. Параллельные алгоритмы моделирования процессов распространения лесных пожаров на основе математических моделей различных типов / М.С. Вдовенко, Г.А. Доррер, П.С. Шаталов // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 3–14.
- 56.Доррер, Г.А. Параллельные алгоритмы моделирования процессов распространения лесных пожаров / Г.А. Доррер, Шаталов П.С. // Хвойные бореальной зоны. – 2012. – Т. 30, № 5–6. – С. 107–110.

- 57.Баровик, Д.В. Адаптация модели Ротермела для реализации в программном комплексе прогноза распространения лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Технологии техносферной безопасности. – 2011. – № 6 (40). – С. 6.
- 58.Гришин, А.М. Математическое моделирование распространения вершинных лесных пожаров в однородных лесных массивах и вдоль просек / А.М. Гришин, О.В. Шипулина // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38. № 6. – С. 17–29.
- 59.Ковалев, А.Н. Перспективные направления тушения низовых лесных и степных пожаров / А.Н. Ковалев, Л.А. Журавлева // Научная жизнь. – 2012. – № 4. – С. 153–157.
- 60.Баратов, А.Н. Способ тушения пожара распыленной водой с добавками / А.Н. Баратов, В.И. Забегаев, С.Г. Цариченко // Патент на изобретение № 2403927 от 2010.
- 61.Жданова, А.О. Роль дисперсности воды, сбрасываемой авиацией в зону горения лесных массивов / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – №1. – С. 43–49.
- 62.Жданова, А.О. Численный анализ эффективности использования жидкости при воздействии на пламя типичным «водяным снарядом» / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2014. – №1. – С. 5–11.
- 63.Абдурагимов, И.М. Несостоятельность идеи применения тонкораспыленной и «термоактивированной» (перегретой) воды для целей пожаротушения / И.М. Абдурагимов // Пожарное дело. – 2011. – №6.
- 64.Маслак, В.Г. Способ тушения пожаров водой / В.Г. Маслак, Ю.С. Королев // Патент на изобретение № 1247019 от 1986.

65. Волков, Р.С. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 5. – С. 74–78.
66. Глушков, Д.О. Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандема» капель воды в высокотемпературной газовой среде / Д.О. Глушков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Тепловые процессы в технике. – 2012. – Т. 4, № 12. – С. 531–538.
67. Высокоморная, О.В. Тепломассоперенос при движении капель воды в высокотемпературной газовой среде / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 1. – С. 59–65.
68. Карпышев, А.В. Разработка высокоэффективного универсального огнетушителя на основе генерации струй тонкораспыленных огнетушащих веществ / А.В. Карпышев, А.Л. Душкин, Н.Н. Рязанцев // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16, № 2. – С. 69–73.
69. Система противопожарной защиты салона вагона метрополитена на базе высоких технологий / Д.В. Гаев, А.В. Ершов, В.П. Прохоров и др. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2009. – № 3. – С. 67–72.
70. Душкин, А.Л. Взаимодействие пламени горючей жидкости с тонкораспыленной водой / А.Л. Душкин, С.Е. Ловчинский // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 11. – С. 53–55.
71. Душкин, А.Л. Особенности распространения жидкостной струи в атмосфере / А.Л. Душкин, А.В. Карпышев, С.Е. Ловчинский // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 12. – С. 45–48.
72. Стрижак, П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 8. – С. 26–31.

73. Волков, Р.С. Численное исследование условий взаимодействия диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, П.А. Стрижак // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – №10. – С. 74–79.
74. Тепломассоперенос при взаимодействии диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания / Г.Г. Андреев, Д.О. Глушков, В.Ф. Панин, П.А. Стрижак // Бутлеровские сообщения. – 2012. – Т.31, №8. – С. 86–94.
75. Стрижак, П.А. Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокоскоростные продукты сгорания / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, №9. – С.17–23.
76. Стрижак, П.А. Влияние распределения капель в «водяном снаряде» на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе / П.А. Стрижак // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 4. – С. 839–848.
77. Стрижак, П.А. Численный анализ диффузионно-конвективных процессов тепломассопереноса при движении капель воды через высокотемпературные продукты сгорания / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 7. – С. 11–21.
78. Экспериментальное исследование закономерностей испарения тонкораспыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Бутлеровские сообщения. – 2013. – Т. 35, № 9. – С. 38–46.
79. Численное исследование воздействия тонкораспылённой воды на турбулентное диффузионное пламя / А.А. Шумихин, А.И. Карпов, М.А. Корепанов, В.Б. Новожилов // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14, № 3. – С. 391–400.

80. Численное исследование влияния условий распыления воды на температуру в следе «водяного снаряда» / О.В. Высокоморная, А.О. Марков, М.Н. Назаров и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 24–31.
81. Высокоморная, О.В. Тепломассоперенос при движении капель воды в высокотемпературной газовой среде / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 1. – С. 59–65.
82. Исаченко, В.П. Теплообмен при конденсации / В.П. Исаченко – Москва: Энергия, 1977. – 239 с.
83. Vysokomornaya, O.V. Heat and Mass Transfer in the Process of Movement of Water Drops in a High-temperature Gas Medium / O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – Vol. 86, № 1. – P. 62–68.
84. Кузнецов, Г.В. Влияние формы капли воды на результаты математического моделирования ее испарения при движении через высокотемпературные продукты сгорания / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 6. – С. 254–261.
85. Кузнецов, Г.В. Оценка эффективности использования теплоты испарения воды при тушении лесных пожаров. / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 2, № 9. – С. 57–63.
86. Гнездилов, Н.Н. Математическое моделирование горения торфяного слоя. Влияние конденсации паров воды / Н.Н. Гнездилов, И.М. Козлов, К.В. Доброго // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 58, № 5. – С. 982–990.
87. Комбинированный метод сушки древесины / М.А. Горешнев, А.Н. Казарин, В.В. Лопатин и др. // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 2. – С. 318–321.

88. Зажигание лесных горючих материалов потоком лучистой энергии / А.М. Гришин, В.П. Зима, В.Т. Кузнецов, А.И. Скорик // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т.38, № 1. – С. 30–35.
89. Курбатский, Н.П. Исследование свойств и количества лесных горючих материалов / Н.П. Курбатский // Сборник статей «Вопросы лесной пирологии». – Красноярск: ИЛид СО АН СССР, 1970. – С. 5–58.
90. Гришин, А.М. Физика лесных пожаров / А.М. Гришин – Томск: Изд-во ТГУ, 1999. – 207 с.
91. Rossi , J.L. An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires / J.L. Rossi, A. Simeoni, B. Moretti, V. Leroy-Cancellieri // Fire Safety Journal. – 2011. – Vol. 46. – Issue 8. – P. 520–527.
92. McAllister, S. Critical mass flux for flaming ignition of wet wood / S. McAllister // Fire Safety Journal. – 2013. – Vol. 61. – P. 200–206.
93. Некоторые итоги экспериментальных исследований горения ЛГМ / А.М. Гришин, В.В. Рейно, В.М. Сазанович, Р.Ш. Цвык // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – Т. 52, №12. – С. 28–37.
94. Долгов, А.А. Лабораторные исследования состава и определения коэффициентов эмиссии продуктов горения лесных материалов / А.А. Долгов // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Том 77, №6. – С. 168–172.
95. Qie, J. Experimental Study of the Influences of Orientation and Altitude on Pyrolysis and Ignition of Wood / J. Qie, L. Yang, Y. Wang, J. Dai, X. Zhou // Journal of Fire Sciences. – 2011. – Vol. 29. – Issue 3. – P. 243–258.
96. Бахман, Н.Н. Влияние направления и скорости потока воздуха на характеристики волн тления в пористых слоях горючего / Н.Н. Бахман, Г.П. Кузнецов, В.М. Пучков // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т.38, №5. – С. 33–40.
97. Грачев, А.Н. Результаты математического моделирования термического разложения древесины в абляционном режиме / А.Н.

- Грачев, А.А. Макаров, Р.Г. Сафин // Вестник казанского технологического университета. – 2011. – №14. – С. 90–93.
98. Математическое моделирование процесса термической переработки древесины в абляционном режиме / М.К. Герасимов, А.Н. Грачев, В.И. Петров, А.А. Макаров // Вестник казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, №4. – С. 50–51.
99. Серков, Б.Б. Физико-химические основы горения и пожарная опасность древесины (часть 2) / Б.Б. Серков, Р.М. Асеева, Р.М. Сивенков // Технологии техносферной безопасности. – 2012, №1(41). – С.1.
100. Асеева, Р.М. Горение и пожарная опасность древесины / Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, №1. – С. 19–32.
101. Seefeld, H. Burning behavior of wood-plastic composite decking boards in end-use conditions: the effects of geometry, material composition, and moisture / H. Seefeld, U. Braun // Journal of Fire Science. – 2012. – Vol.30. – Issue 1. – P.41–54.
102. Experimental study of the effect of spark power on piloted ignition of wood at different altitudes / W. Wu, L. Yang, J. Gong et al. // Journal of Fire Sciences. – 2011. – Vol. 29. – Issue 5. – P. 465–475.
103. Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis / F. Yao, Q. Wu, Y. Lei et al. // Polymer Degradation and Stability. – 2008. – Vol. 93. – Issue 1. – P. 90–98.
104. Blasi, Colomba Di Flame retarding of wood by impregnation with boric acid – Pyrolysis products and char oxidation rates / Colomba Di Blasi, Carmen Branca, Antonio Galgano // Polymer Degradation and Stability. – 2007. – Vol. 92. – Issue 5. – P. 752–764.
105. Di Blasi, C. Thermal and catalytic decomposition of wood impregnated with sulfur- and phosphorus-containing ammonium salts / C. Di

- Blasi, C. Branca, A. Galgano // *Polymer Degradation and Stability*. – 2008. – Vol. 93. – Issue 2. – P. 335–346.
106. Evidence of char formation during wood heat treatment by mild pyrolysis / G.N. Inari, S. Mounquengui, S. Dumarçay et al. // *Polymer Degradation and Stability*. – 2007. – Vol. 92. – Issue 6. – P. 997–1002.
107. Lim, S.M. Wood pyrolysis in high temperature and its kinetics / S.M. Lim, M.Y.L. Chew // *Journal of Applied Fire Science*. – 2004. – Vol. 13. – Issue 4. – P. 339–357.
108. Lim, S.M. Compensation effects in the non-isothermal pyrolysis of wood / S.M. Lim, M.Y.L. Chew // *Fire Safety Science*. 2005. – P. 1109–112.
109. Effects of altitude and sample width on the characteristics of horizontal flame spread over wood sheets / Y. Zhang, J. Ji, J. Li, J. Sun et al. // *Fire Safety Journal*. – 2012. – Vol. 51. – P. 120–125.
110. An integral Model for the Transient Pyrolysis of Solid Materials / B. Moghtaderi, V. Novozhilov, D. Fletcher et al. // *Fire and Materials*. 1997. – Vol. 21. – P. 7–16.
111. Гришин, А.М. Новые концепции, способы и устройства для борьбы с лесными пожарами / А.М. Гришин, В.П. Зима // *Экологические системы и приборы*. – 2007. – №10. – С. 57–61.
112. Гришин, А.М. Математические модели лесных пожаров / А.М. Гришин. – Томск: Изд-во ТГУ. – 1981. – 278 с.
113. Палецкий, А.А. Исследование пиролиза лесных горючих материалов методом зондовой молекулярно-пучковой масс-спектрометрии / А.А. Палецкий, М.Б. Гончикжапов, О.П. Коробейничев // *Сиббезопасность-спасиб*. – 2011, №1. – С.97–98.
114. Гончикжапов, М.Б. Кинетика пиролиза лесных горючих материалов в инертной / окислительной среде при быстром и медленном темпах нагрева / М.Б. Гончикжапов, А.А. Палецкий, О.П. Коробейничев // *Сиббезопасность-спасиб*. – 2012, №1. – С. 38–44.

115. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование полноты испарения распыленной воды при ее движении через пламя / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 10. – С. 15–24.
116. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование особенностей движения капель распыленной тушащей жидкости на входе в зону пламени / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – №12. – С. 16–22.
117. Volkov, R.S., Kuznetsov, G.V., Strizhak, P.A. The influence of initial sizes and velocities of water droplets on transfer characteristics at high-temperature gas flow / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // International journal of heat and mass transfer. – 2014. – V. 79. – P. 838–845.
118. Raffel, M. Particle image velocimetry / M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans. – Berlin: Springer Verlag, 1998. – 253 p.
119. Keane, R.D. Theory of cross-correlation analysis of PIV images / R.D. Keane, R.J. Adrian // Applied Scientific Research. – 1992. – Vol. 49. – P. 191–215.
120. Westerweel, J. Fundamentals of digital particle image velocimetry / J. Westerweel // Measurement Science and Technology. – 1997. – Vol. 8. – P. 1379–1392.
121. Foucaut, J.M. Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields / J.M. Foucaut, M. Stanislas // Measurement Science and Technology. – 2002. – Vol. 13. – P. 1058–1071.
122. Жданова, А.О. Численное исследование процессов тепломассопереноса при подавлении реакции термического разложения лесного горючего материала группой капель воды / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, №7. – С. 6–14.

123. Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов / А.П. Ильин, О.Б. Назаренко, А.В. Коршунов, Л.О. Роот. – Томск, 2012. – 196 с.
124. Полежаев, Ю.В. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юрьевич. – Москва: Энергия, 1976. – 391 с.
125. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – Москва: Мир, 1972. – 381 с.
126. Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель. – Академия Наук СССР. Ленинград: – Наука, 1968. – 96 с.
127. Zhdanova, A.O. Numerical analysis of effective conditions of chemical reaction suppression during typical forest fuel material combustion / A.O. Zhdanova, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 692. – pp. 267–271.
128. Жданова, А.О. Определение характерных времен прекращения реакции термического разложения типичных лесных горючих материалов при воздействии «водяного снаряда / А.О. Жданова // Материалы I Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы». – Томск, 2013. – Т.1. – С. 295–298.
129. Жданова, А.О. Влияние температуры в следе «водяного снаряда» на условия термического разложения типичного лесного горючего материала / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2014. – №1. – С. 48–55.
130. Жданова, А.О. Влияние распределения капель воды в «водяном снаряде» на температуру в его следе / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 2. – С. 9–17.
131. Пасконов, В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов. – Москва: Наука, 1984. – 277 с.

132. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – Москва: Наука, 1987. – 490 с.
133. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко. – Москва: Пожнаука, 2004. – Ч. 1. – 713 с.
134. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – Москва: ООО «Старс», 2006. – 720 с.
135. Kuznetsov, G.V., Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53, Issues 5–6. – P. 923–930.
136. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – Москва: Энергия, 1975. – Т. 1. – 743 с.
137. Жданова, А.О. Повышение эффективности процесса подавления реакции термического разложения при испарении пленки воды на поверхности типичных лесных горючих материалов / А.О. Жданова, П.А. Стрижак // Сборник трудов III Межотраслевой научно-практической конференции молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения и защиты окружающей природной среды. – Харьков, 2014. – С. 14–21.
138. Жданова, А.О. Численное исследование испарения пленки воды на поверхности лесного горючего материала / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // «Пожаровзрывобезопасность», 2014. – Том 23, №6. – С. 18–25.
139. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – Москва: Энергия, 1975. – Т. 2. – 896 с.

140. Grishin, A.M. Comparative analysis of thermokinetic constant of drying and pyrolysis of forest fuels / A.M. Grishin, S.P. Sinitsyn, I.V. Akimova // *Combustion and Explosion Physics Journal*. – 1991. – Vol. 27. – P. 17–24.
141. Lautenberger, C.H. A model for the oxidative pyrolysis of wood / C.H. Lautenberger, C. Fernando-Pello // *Combustion and Flame*. – 2009. – Vol. 156. – P. 1503–1513.
142. Муратова, Т.М. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации / Т.М. Муратова, Д.А. Лабунцов // *Теплофизика высоких температур*. – 1969. – Т. 7, №5. – С. 959–967.
143. Жданова, А.О. Численное исследование особенностей реакции термического разложения лесного горючего материала при полном погружении воды в его поры / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Сборник докладов Всероссийской конференции «XXXI Сибирский теплофизический семинар», посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе*. – Новосибирск, 2014. – С. 200–202.
144. Жданова, А.О. Численное исследование физико-химических процессов при испарении воды в порах приповерхностного слоя лесного горючего материала / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87, №4. – С. 751–758.
145. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – Москва: Наука, 1983. – 616 с.
146. Кузнецов, Г.В., Стрижак, П.А. Тепломассоперенос при подавлении реакции термического разложения лесного горючего материала группой капель воды / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87, №3. – С. 590–598.
147. Kryukov, A.P. About evaporation-condensation coefficients on the vapor-liquid interface of high thermal conductivity matters / A.P. Kryukov,

- V.Yu. Levashov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2011. Vol. 54, Issues 13–14. – P. 3042–3048.
148. Baehr, H.D. Heat and mass transfer / H.D. Baehr, K. Stephan – Berlin: Springer 3rd. revised ed., 2011. – 737 p.
149. Glushkov, D.O. Research of macroscopic regularities of heat and mass transfer at the ignition condition of a liquid high-energy material by an immersed source with a limited energy capacity / D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Advances in Mechanical Engineering. – 2014. – ID 764537.
150. Glushkov, D.O. Transient heat and mass transfer of liquid droplet ignition at the spreading over the heated substrate / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak // Advances in Mechanical Engineering. – 2014. – ID 269321.
151. Experimental study of suppressing Poly (methyl methacrylate) fires using water mists. / B. Yao, B.H. Cong, J. Qin, W.K. Chow // Fire Safety Journal. – 2012. – Vol.47. – P. 32–39.
152. Самарский, А.А. Численные методы решения задач конвекции – диффузии / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – Москва: Эдиториал УРСС, 1999. – 248 с.
153. Березин, И.С. Методы вычислений / И.С. Березин, Н.П. Жидков. – Москва: Физматгиз, 1962. – Т.2. – 620 с.
154. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – Москва: Наука, 1978. – 512 с.
155. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – Москва: Высшая школа, 2002. – 840 с.
156. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – Москва: Наука, 1975. – 227 с.
157. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет – Томск: ТПУ, 2007. – 172 с.

158. О модификации методов решения нелинейных задач тепломассопереноса в условиях высоких градиентов температур / А.И. Гаращенко, И.К. Жарова, Г.В. Кузнецов, В.П. и др. // Материалы Всероссийской научно–технической конференции «Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2002». – Пермь: Изд–во ПГТУ, 2002. – 77 с.
159. Горшков, В.И. Тушение пламени горючих жидкостей / В.И. Горшков. – Москва: Пожнаука, 2007. – 268 с.
160. Гусев, В.Г. Новые технологии борьбы с лесными пожарами / В.Г. Гусев, Ю.В. Подрезов // Технологии гражданской безопасности. – 2006. – Т. 3, №4. – С. 22–26.
161. Жданова, А.О. Расчет времени прекращения термического разложения лесного горючего материала при охлаждении следом водяного снаряда / А.О. Жданова, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615103. – Бюлл. прогр. №6 (104), 2015.
162. Жданова, А.О. Расчет времени прекращения термического разложения лесного горючего материала при испарении воды в порах приповерхностного слоя / А.О. Жданова, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615104. – Бюлл. прогр. №6 (104), 2015.
163. Жданова, А.О. Расчет времени прекращения термического разложения лесного горючего материала при воздействии водяного снаряда в виде пленки / А.О. Жданова, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615295. – Бюлл. прогр. №6 (104), 2015.
164. Жданова, А.О. Расчет времени подавления реакции термического разложения лесного горючего материала группой капель воды / А.О. Жданова, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ №2015615296. – Бюлл. прогр. №6 (104), 2015.