На правах рукописи

Augh

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

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре автоматизации теплоэнергетических процессов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, доцент Стрижак Павел Александрович
Официальные оппоненты:	Салганский Евгений Александрович, доктор физико-математических наук, Институт проблем химической физики Российской академии наук, заведующий отделом горе- ния и взрыва
	Жарова Ирина Константиновна, доктор физико-математических наук, Наци- ональный исследовательский Томский госу- дарственный университет, ведущий науч- ный сотрудник отдела газовой динамики и физики взрыва

ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Ведущая организация: 143903. Россия, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12

Защита состоится «25» декабря 2015 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в аудитории 217 учебного корпуса № 8 по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждении образования исследовательский высшего «Национальный Томский политехнический сайте университет» И на http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist.

Автореферат разослан: «26» октября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.269.13 кандидат технических наук

А.С. Матвеев

Общая характеристика работы

Актуальность. Разработка эффективных методов тушения лесных пожаров является актуальной задачей всего мирового сообщества на протяжении многих лет. Полученный многолетний опыт позволяет сделать вывод, что решение задачи эффективного тушения крупных лесных пожаров невозможно без применения авиации. Перспективные направления тушения низовых и степных пожаров, как правило, основаны на применении водяного пара или смеси пара и распыленной воды. Полная ликвидация очага горения в условиях типичного лесного пожара возможна только при прекращении реакции термического разложения в приповерхностных слоях лесных горючих материалов (ЛГМ). Изучение процесса прекращения реакции пиролиза ЛГМ, как метода борьбы с лесными пожарами, способствует активному развитию аэрозольных технологий со специфическими названиями «водяной туман», «тонкораспыленная вода» и «паровая завеса». В настоящее время основным способом тушения пожаров, занимающих большие площади, является локальный сброс массивов воды из специальных емкостей самолетов или вертолетов. При этом, 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 не разработан подход, обеспечивающий оценку массы жидкости, достаточной для локализации пламени и последующей ликвидации горения по всей площади распространения пожара.

Локальный сброс воды с воздушных судов в зону горения, как правило, приводит к существенному заливанию ограниченных по характерным размерам участков лесных пожаров. Достаточно часто это не является гарантией ликвидации очага горения, 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 призваны покрыть большую площадь пожара по сравнению с «монолитными» массами воды (экономится достаточно много тушащей жидкости). Эффективность применения таких подходов для локализации пламен обоснована известными результатами теоретических и экспериментальных исследований. Однако открытыми остаются вопросы о необходимых и достаточных (минимальных) объемах жидкости для прекращения реакции пиролиза в слоях типичных ЛГМ.

При тушении крупных лесных пожаров особое внимание традиционно уделяется процессам химического реагирования в прогретых слоях термически разлагающихся ЛГМ. К настоящему времени не изучены условия прекращения реакции термического разложения типичных ЛГМ при воздействии на их приповерхностные слои водой (в том числе ограниченной группы капель или пленки конечных размеров). Механизм прекращения реакции термического разложения может существенно измениться при прохождении воды в поры ЛГМ или растекании жидкости по его поверхности. Поэтому целесообразным является численное исследование физико-химических процессов при испарении воды,

заполняющей поры термически разлагающегося ЛГМ, и при формировании водяной пленки на поверхности последнего.

Цель диссертационной работы – 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 работы. 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 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-Президента РФ (проекты № МК-620.2012.8, МД-2806.2015.8), 00003), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-08-33002, 14-08-00057) И исследовательского Национального 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.

Основные Апробация работы. положения И результаты диссертационных исследований обсуждались докладывались И на Международной конференции «VIII Окуневские чтения» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.), «Девятой международной научно-технической конференции «Энергия-2014»» (г. Иваново, 2014 г.), XXXI Сибирском теплофизическом семинаре, посвященному 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе (г. Новосибирск, 2014 г.), Шестой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6) (г. Москва, 2014 г.), 13 Международном саммите по лесным пожарам и 4 конференции «Человеческий фактор в лесных пожарах» (13th International Wildland Fire Safety Summit and 4th Human Dimensions of Wildland Fire) (CIIIA, 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 объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Диссертация изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков и 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.

Первая глава содержит результаты анализа современного состояния теоретических и экспериментальных исследований физико-химических процессов, протекающих в условиях термического разложения ЛГМ. Показано, что отсутствуют результаты исследований условий и характеристик физико-химических процессов при взаимодействии интенсивно пиролизующегося ЛГМ с пароводяным облаком, каплями и пленками воды.

Во второй главе представлена методика экспериментальных исследований. Приведены разработанные постановки задач нестационарного сопряженного теплопереноса, позволяющие выполнять численные исследования физикохимических процессов, протекающих при воздействии пароводяного облака, капель и пленок воды. Представлено описание использованных методов численного моделирования и разработанного алгоритма решения задач диссертации.

На рис. 1 приведена схема созданного экспериментального стенда. Основными элементами регистрирующей аппаратуры стенда являются: кросскорреляционная видеокамера 2 (формат изображения – 2048х2048 пикселей, кадровая частота – 1,5 Гц, минимальная задержка между двумя последовательными кадрами – 5 мкс), высокоскоростная видеокамера 1 (формат изображений 1024х1024 пикселей, частота кадров до 100000 в секунду), двойной импульсный твердотельный лазер 14 (с активной сферой «алюмо-иттриевый 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).

При проведении экспериментальных исследований создавалась парокапельная смесь (пароводяное облако) с заданной температурой (T_m =300–450 K) над разлагающимся ЛГМ. Фиксировалось время, за которое температура пиролизующегося ЛГМ снижалась до температуры начала его термического разложения T_d . Эта величина соответствовала условиям прекращения реакции пиролиза ЛГМ. Навеска ЛГМ представляла слой толщиной от 0,02 м до 0,06 м в подложке 11.





Рисунок. 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

К выходу канала 5, соединенного с емкостью 3, подключался распылитель 8. Распылитель 8 устанавливался на штативе 6 на 0,5 м выше верхней грани цилиндра 10. 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 Проводилась градусов. калибровка кросскоррелякамеры ционной 2 (c 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. Хромель-алюмелевыми термопарами 7 контролировалась температура ЛГМ и пароводяного облака над ним. Одна термопара размещалась в верхней части слоя ЛГМ, вторая в нижней, третья термопара на оси симметрии цилиндра 10 для контроля температуры парогазовой смеси. Расстояние между первыми двумя термопарами выбиралось в зависимости от толщины ЛГМ. При достижении на нижней границе слоя ЛГМ температуры T_d запускался процесс распыления воды в пламенную зону горения. Размеры капель воды изменялись в диапазоне $30 < R_d < 100$ мкм. Этот интервал размеров капель обеспечивал практически полное испарение жидкости в газовой фазе до достижения поверхности ЛГМ. Предварительные эксперименты показали, что до 95 % капель испарялись. Расход жидкости составил около 1,7 мл/с при объеме емкости 5 л и давлении в ней 2 атм.

Начальная температура воды T_w и температура поверхности навески ЛГМ *Т* измерялась хромель-алюмелевыми термопарами. Систематические погрешности измерения температур T_w и *T* не превышали 2,5 %, размеров капель – 1,5 %, скоростей «трассеров» – 2 %. Максимальные случайные погрешности измерения температур составляли не более 19 %. В результате проведенных экспериментальных исследований установлены времена подавления воздействием пароводяного облака реакции термического разложения типичных (листья березы, хвоя ели) ЛГМ при толщине прореагировавшего слоя (L_w) 0,02–0,06 м. Для листьев березы времена подавления пиролиза не превысили 300 с, хвои ели – 730 с при L_w =0,06 м.

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).

Схемы области решения задач показаны на рис. 2.



Рисунок 2. Схемы области решения задач термического разложения ЛГМ при $0 < t < t_d$ для парогазовой смеси (*a*) над ЛГМ (1 – смесь продуктов сгорания и водяных паров, 2 – нагретый до высоких температур приповерхностный слой ЛГМ); при испарении однородной пленки воды (*б*) на поверхности ЛГМ (1 – парогазовая смесь, 2 – пленка воды, 3 – ЛГМ); при испарении пленки воды (*в*) с твердыми включениями (1 – ЛГМ, 2 – вода с твердыми включениями («буферный слой»)); при проникновении воды (*г*) в поры ЛГМ (1 – слой ЛГМ с $T > T_d$, 2 – слой ЛГМ с порами, заполненными водой); для группы (*д*) капель (на примере двух) на поверхности ЛГМ (1 – парогазовая смесь, 2 – капли воды, 3 – ЛГМ)

Процессы теплопереноса в условиях интенсивных физико-химических превращений, например, для схемы, представленной на рис. 2, ∂ , описывались системой нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных ($0 < t < t_d$) следующего вида:

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right) + Q_3 W_3, \ 0 < x < H, \ 0 < y < y_1;$$
(1)

$$\frac{d\varphi_3}{dt} = (1 - \varphi_3)k_3^0 \exp(-\frac{E_3}{RT_3}), \ 0 < x < H, \ 0 < y < y_1;$$
(2)

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), 0 < x < x_1, x_2 < x < H, y_1 < y < y_2;$$
(3)

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), x_1 < x < x_2, y_1 < y < y_2, 0 < x < H, y_2 < y < L;$$
(4)

$$\frac{\partial C_{\rm f}}{\partial t} = D_{11} \left(\frac{\partial^2 C_{\rm f}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{\rm f}}{\partial y^2} \right), x_1 < x < x_2, y_1 < y < y_2, 0 < x < H, y_2 < y < L;$$
(5)

$$\frac{\partial C_{\mathbf{v}}}{\partial t} = D_{12} \left(\frac{\partial^2 C_{\mathbf{v}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{\mathbf{v}}}{\partial y^2} \right), x_1 < x < x_2, y_1 < y < y_2, 0 < x < H, y_2 < y < L.$$
(6)

Здесь $C_{\rm f}$ – безразмерная концентрация (доля) газообразных продуктов термического разложения ЛГМ; D – коэффициент диффузии, м²/с; $C_{\rm v}$ – 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, *d*): $T=T_0(x, y)$ и $\varphi_3=\varphi_0(x, y)$ при 0 < x < H, $0 < y < y_1$; $T=T_w$ при $0 < x < x_1$, $x_2 < x < H$, $y_1 < y < y_2$; $T=T_m$, $C_v=0$, $C_f=C_0$ 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, ∂):

$$x=0, x=H, 0 < y < y_1 \qquad \qquad \frac{\partial T_3}{\partial x} = 0; \tag{7}$$

$$x=0, x=H, y_1 < y < y_2 \qquad \qquad \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0;$$
(8)

$$x=0, x=H, y_2 < y < L \qquad \qquad \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \ \frac{\partial C_v}{\partial x} = 0, \ \frac{\partial C_f}{\partial x} = 0; \tag{9}$$

$$y=0, \ 0 < x < H \qquad \qquad \frac{\partial T_3}{\partial y} = 0; \tag{10}$$

$$y = y_1, \ 0 < x < x_1, \ x_2 < x < H \qquad -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} - Q_3 W_3 - Q_2 W_2 = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}; \tag{11}$$

$$y = y_1, x_1 < x < x_2 \qquad -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} - Q_3 W_3 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad \frac{\partial C_f}{\partial y} = \frac{W_3}{\rho_{11} D_{11}}, \quad \frac{\partial C_v}{\partial y} = 0; \quad (12)$$

$$x = x_1, x = x_2, y_1 < y < y_2 \qquad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - Q_2 W_2 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}, \ \frac{\partial C_v}{\partial x} = \frac{W_2}{\rho_{12} D_{12}}, \ \frac{\partial C_f}{\partial x} = 0;$$
(13)

$$y = y_2, \ 0 < x < x_1, \ x_2 < x < H \qquad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} - Q_2 W_2 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \ \frac{\partial C_v}{\partial y} = \frac{W_2}{\rho_{12} D_{12}}, \ \frac{\partial C_f}{\partial y} = 0;$$
(14)

$$y=L, 0 < x < H \qquad \qquad \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} = 0, \ \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} = 0, \ \frac{\partial^2 C_f}{\partial y^2} = 0, \tag{15}$$

где Q_2 – тепловой эффект испарения, Дж/кг; W_2 – массовая скорость испарения, кг/(м²с).

Массовая скорость испарения жидкости вычислялась по формуле:

$$W_{2} = \frac{\beta}{1 - k_{\beta}\beta} \frac{(P^{n} - P)}{\sqrt{2\pi R T_{2s} / M}},$$
(16)

где β – безразмерные коэффициенты (эмпирические константы) испарения; P^n – давление насыщенных паров воды, H/M^2 ; P – давление паров воды вблизи границы испарения, H/M^2 ; T_{2s} – температура на границе испарения жидкости, К; M – молярная масса, кг/кмоль.

Для вычисления массовой скорости термического разложения ЛГМ использовалось выражение:

$$W_3 = \varphi_3 \rho_3 k_3^0 \exp(-\frac{E_3}{RT_3}).$$
(17)

Система нестационарных дифференциальных уравнений (1)–(6) с соответствующими начальными и граничными условиями (7) – (15) решалась методом конечных разностей. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решались локально–одномерным методом. Для решения одномерных разностных уравнений применялся метод прогонки с использованием неявной четырехточечной схемы. Нелинейные уравнения решались методом итераций.

Для оценки адекватности результатов численного моделирования на каждом итерационном шаге по времени выполнялась проверка консервативности используемых разностных схем (контролировалось выполнение закона сохранения энергии в расчётной области). Кроме того, выполнено тестирование примененных численных методов и разработанного алгоритма решения задач диссертации на примере менее сложных (тестовых) задач теплопроводности с учетом соответствующих физико-химических превращений. Результаты приведены во второй главе рукописи диссертации. Также выполнено сравнение теоретических и экспериментальных значений интегральных характеристик исследованных процессов (времен подавления реакции термического разложения ЛГМ).

<u>В третьей главе</u> приведены основные результаты выполненных экспериментальных и численных исследований.

Экспериментально установлены времена подавления реакции термического разложения (t_d) для листьев березы и хвои ели (рис. 3) при толщине прореагировавшего слоя ЛГМ (L_f) 0,02–0,06 м (для случая взаимодействия с парами воды).

Для листьев березы реакция термического разложения прекращается (рис. 3) в течение времен, не превышающих 300 с. Для хвои ели времена прекращения реакции пиролиза достигали 730 с (рис. 3).



Рисунок 3. Характерные времена подавления реакции термического разложения ЛГМ: 1 – листья березы, 2 – хвоя ели

Для установления начального распределения температуры $T_0(x)$ и доли способного к химическому реагированию (термическому разложению) вещества $\phi_0(x)$ в приповерхностном слое ЛГМ (толщиной L_f) решалась задача прогрева и термического разложения ЛГМ. Вычислялись профили $T_0(x)$ и $\phi_0(x)$ при постоянной температуре внешней газовой среды (продуктов сгорания) – 1170 К, соответствующей средней

температуре пожара. На рис. 4 приведены типичные (начальные для основных задач диссертации) 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.



Рисунок 4. Типичные распределения температуры (*a*) 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

В результате проведенных численных исследований получена поверхность (рис. 5), характеризующая зависимости времени t_d от температуры парогазовой смеси (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. 5) 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 5. Времена подавления реакции термического разложения ЛГМ в зависимости от толщины его приповерхностного слоя и температуры парогазовой смеси

На рис. 6, а представлены полученные в результате проведенных численных исследований (рис. 2, б) зависимости толщины слоя испарившейся при подавлении реакции термического разложения жидкости (L_e) от характерного размера прогретого приповерхностного слоя ЛГМ ($L_{\rm f}$). Величина L_е является минимальной толщиной пленки жидкости, при которой температура в ЛГМ становится ниже $T_{\rm d}$.



Рисунок 6. Зависимости толщины (L_e) испарившегося слоя пленки жидкости (a) и времени подавления реакции термического разложения (δ) от характерного размера (толщины L_f) ЛГМ: I – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Зависимости $L_e=f(L_f)$ показывают (рис. 6, *a*), что для прекращения реакции термического разложения в приповерхностных слоях типичных ЛГМ размерами до 0,06 м необходимы пленки жидкости толщиной L_e до 0,1 мм. Выявленная особенность иллюстрирует избыточность подачи воды типичным для авиации способом – локальным сбрасыванием больших масс жидкости, при котором на поверхности ЛГМ могут формировать пленки 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 пленок воды (рис. 6, δ). Показано, что при L_f менее 0,06 м значения t_d не превышают 1 минуты.

На рис. 7 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» (смесь воды, листьев, хвои) $L_{w-f} = 0,01$ м (рис. 2, *в*). Зависимости $t_d = f(L_f)$ показывают (рис. 7), что для ЛГМ с характерным размером L_f менее 0,06 м значения t_d также не превышают 1 минуты. Так как толщина прогретого слоя ЛГМ (в котором интенсивно протекает пиролиз) в условиях реального пожара, как правило, составляет не более 0,05 м, то рассчитанные времена t_d можно считать верхними оценками.

Зависимости времени подавления реакции термического разложения рассматриваемых ЛГМ (листья березы, хвоя сосны и ели) от толщины «буферного слоя» (L_{w-f}) при $L_f = 0.04$ м представлены на рис. 8.

На рис. 9 приведены полученные в результате проведенных численных исследований зависимости времени подавления реакции термического разложения при толщине слоя воды в порах $L_{w-h}=0,002$ м (рис 2, *г*).





Рисунок 7. Зависимости времени подавления реакции термического разложения от толщины ЛГМ при $L_{w-f}=0,01$ м, $\gamma=0,5$, $\alpha=20$ Вт/(м²K): 1 – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Рисунок 8. Зависимости времени подавления реакции термического разложения от толщины «буферного слоя» при $L_f=0,04$ м, $\gamma=0,5$, $\alpha=20$ Вт/(м²K): 1 – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Зависимости времени прекращения реакции термического разложения рассматриваемых ЛГМ от толщины слоя воды в порах (L_{w-h}) при $L_f=0,04$ м представлены на рис. 10.



Рисунок 9. 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



Рисунок 10. Зависимости времени подавления реакции термического разложения от толщины слоя «ЛГМ – вода» при L_t =0,04 м: l – хвоя ели, 2 – листья березы, 3 – хвоя сосны

Инерционность процесса подавления реакции термического разложения существенно возрастает при изменении L_{w-h} в диапазоне от 0,002 м до 0,004 м. При дальнейшем росте L_{w-h} времена t_d практически не меняются (отклонения менее 1 %). Этот результат можно объяснить малой массой испаряющейся при подавлении реакции разложения воды.

На рис. 11 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» (рис. 2, ∂). Можно отметить, что при уменьшении H_w времена прекращения реакции термического разложения t_d нелинейно снижаются.



Рисунок 11. Зависимости времени подавления реакции термического разложения ЛГМ (хвоя сосны) от параметра H_w при различных температурах в следе «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

считать предельными для исследуемой системы (рис. 11).



Рисунок 12. Зависимости времени подавления реакции пиролиза ЛГМ от температуры в следе «водяного снаряда» $T_{\rm m}$ при $L_{\rm f}$ =0,04 м, $H_{\rm w}$ =0,015 м: 1 – листья березы, 2 – хвоя сосны, 3 – хвоя ели

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 $H_{\rm w}$ до 0,06 м зависимости 4-6 существенно (времена t_d отличаются более чем на 45 %) расходятся (рис. 11). 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

На рис. 12 приведены зависимости времени подавления реакции термического разложения от температуры в следе «водяного снаряда» ($T_{\rm m}$) при $L_{\rm f}$ =0,04 м и $H_{\rm w}$ =0,015 м. Можно отметить нелинейный характер зависимостей $t_{\rm d}$ = $f(T_{\rm m})$. Это обусловлено как химическим реагированием в прогретом слое ЛГМ, так и интенсивным парообразованием в малой окрестности поверхности последнего.

Установленные (рис. 11, 12) 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. 13, *a*). При расстояниях между каплями менее 0,02 м большая доля этого тепла расходуется на реализацию фазовых превращений на боковых границ ($X=X_1$, $X=X_2$, $Y_1<Y<Y_2$) капель (вследствие большого теплового эффекта испарения воды – $Q_2=2,26$ МДж/кг). В этом случае область прогрева парогазовой смеси ограничивается толщиной капель жидкости L_{dr} (рис. 13, *a*). При увеличении значений H_w установлено существенное возрастание размеров области прогрева парогазовой смеси относительно L_{dr} (рис. 11).



Рисунок 13. Изотермы (К) (*a*), изолинии концентраций (относительной доли) паров воды (б) и продуктов пиролиза (*в*) в системе «хвоя сосны – капли воды – парогазовая смесь» при $T_{\rm m}$ =300 К, $H_{\rm w}$ =0,02 м, $L_{\rm f}$ =0,05 м, t =10 с: 1 – парогазовая смесь, 2 – капли воды, 3 – ЛГМ

В результате выполненного численного моделирования процессов тепломассопереноса в рассматриваемой системе (рис. 2, ∂) выявлено, что при интенсивном парообразовании значительно возрастают линейные скорости вдува водяных паров во внешнюю парогазовую среду. На рис. 13 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 %) – содержатся продукты сгорания и водяной пар. 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. 12).

Результаты проведенных численных исследований, позволяют сделать вывод о возможности существенного повышения эффективности как локализации пламен, так и подавления непосредственно реакции термического разложения в глубине ЛГМ с использованием мелкодисперсной воды. Применение тонкораспыленной воды 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 5 мм).

<u>В заключении</u> подведены основные итоги экспериментальных и теоретических исследований, а также сформулированы соответствующие выводы.

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 разработаны физические и математические модели процессов, протекающих при прекращении деструкции ЛГМ, отличающиеся 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 счет эффективного использования воды при тушении пожаров за мелкодисперсного поддержания некоторой требуемой распыления И температуры над пиролизующимся ЛГМ в течение ограниченного времени.

7. Сформулированы аппроксимационные выражения $t_d = f(T_m)$, $t_d = f(L_f)$, $L_e = f(L_f)$, $t_d = f(L_w)$, $t_d = f(H_w)$ для прогностического моделирования

17

рассматриваемых процессов при различных условиях теплообмена на поверхности термически разлагающегося ЛГМ.

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

Основные публикации по теме диссертации

1. Жданова А.О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Подавление реакции термического разложения лесного горючего материала следом «водяного снаряда» // Химическая физика и мезоскопия. 2014. Т.16, № 2. С. 215–225.

2. Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Подавление реакции термического разложения лесных горючих материалов парокапельным водяным потоком // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т.17, № 2. С. 172–182.

3. Жданова А.О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численное исследование испарения пленки воды на поверхности лесного горючего материала // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т.23, № 6. С. 18–25.

4. **Zhdanova A.O.**, Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical investigation of physicochemical processes occurring during water evaporation in the surface layer pores of a forest combustible material // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2014. Vol. 87, Issue 4. P. 773–781.

5. Жданова А.О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численное исследование процессов тепломассопереноса при подавлении реакции термического разложения лесного горючего материала группой капель воды // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т.23, № 7. С. 6–14.

6. Жданова А.О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Анализ условий подавления реакции термического разложения при воздействии пленки воды на лесной горючий материал // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 99–105.

7. Жданова А.О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Эффективность использования теплоты парообразования при воздействии «водяным снарядом» на пламя // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2013. № 6. С. 82–91.

8. Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение воды при движении ее больших массивов через высокотемпературную газовую среду // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88, № 5. С. 1–8.

9. 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.

10. 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.

11. 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.