

На правах рукописи



Барановский Николай Викторович

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ**

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

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Томск – 2012

Диссертация выполнена на кафедрах атомных и тепловых электрических станций и теоретической и промышленной теплотехники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Национальный исследовательский Томский политехнический университет”

Научный консультант: доктор физико-математических наук,  
профессор Кузнецов Гений Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, академик  
РАН, советник РАН в Институте теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск)  
Накоряков Владимир Елиферьевич

доктор физико-математических наук, профессор, про-  
фессор кафедры лазерной и световой  
техники Национального исследовательского Томского  
политехнического университета (Томск)  
Ципилев Владимир Папилович

доктор физико-математических наук, профессор кафед-  
ры прикладной математики Нижегородского государст-  
венного технического университета (Нижний Новгород)  
Катаева Лилия Юрьевна

Ведущая организация: Академия государственной противопожарной  
службы МЧС России (г. Москва)

Защита состоится 28 декабря 2012 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.269.13 при Национальном исследователь-  
ском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск,  
ул. Усова, 7, корп. 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиоте-  
ке Национального исследовательского Томского политехнического универ-  
ситета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,



А.С. Матвеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и текущее состояние проблемы.** События последних лет в Австралии, России, Греции, Испании, Португалии и других государствах показывают, что лесные пожары из природного фактора превратились в катастрофическое явление, которое наносит огромный экологический, экономический и социальный ущерб. Практика борьбы с лесными пожарами позволяет сделать вывод, что остановить распространение крупномасштабного фронта горения в лесу крайне сложно. Во многих случаях только дожди ликвидируют лесные пожары, продолжающиеся много дней и даже недель (например, лесные пожары в северных районах Томской области в 2012 году). Анализ процессов возникновения, распространения, тушения, локализации и ликвидации лесных пожаров на многочисленных примерах России и других государств мирового сообщества показывает, что предотвращение возникновения очагов лесных пожаров является существенно более эффективным, чем последующая борьба с огнем на площадях в сотни и тысячи гектаров лесных массивов, зачастую на больших удалениях от транспортных магистралей.

Но при всей очевидности этого вывода нет пока никаких оснований утверждать о снижении в последние годы числа возгораний в лесных массивах или их оперативной (в течение нескольких часов) ликвидации. Во многом негативная статистика лесопожарных происшествий обусловлена отсутствием в настоящее время теоретических положений, которые могли бы стать основой высокоэффективных методик прогноза лесной пожарной опасности. Применяемые на практике в настоящее время методики разработаны с использованием больших массивов статистических данных (Нестеров В.Г., Ноженкова Л.Ф., Viegas D.X., Van Wagner С.Е., Stocks В.Ј., Alexander M.Е., Garsia Diez E.L., Deeming I.Е. и др.) и представляют собой формулы, алгоритмы, критерии, полученные в результате усреднения характеристик условий возгораний на больших выборках как по площадям, так и по времени. При создании таких методик по существу не анализировались и не моделировались физические и химические процессы (в первую очередь наиболее значимые процессы тепло- и массопереноса в слое лесного горючего материала (ЛГМ) и прилегающем к его поверхности слое воздуха), протекающие в ЛГМ при воздействии локальных источников энергии в условиях возникновения возгораний.

Теории распространения лесных пожаров (авторы моделей и алгоритмов решения задач Субботин А.Н., Гришин А.М., Перминов В.А., Катаева Л.Ю., Доррер Г.А., Зверев В.Г., Шипулина О.В. и др.) не ориентированы на прогноз лесной пожарной опасности. Следствиями решения задач таких теорий являются характеристики пожара (температурные поля, скорости движения продуктов сгорания, давления и плотности газов, скорости движения фронта горения и т.п.).

Следует также отметить, что известные методики прогноза лесной пожарной опасности не учитывают причинно-следственные связи процессов, предшествующих возгоранию ЛГМ – не рассматриваются реальные источники нагрева (грозовой разряд, антропогенная нагрузка, концентрированное солнечное излучение).

Представляется перспективной разработкой нового подхода к прогнозированию лесной пожарной опасности, отличающегося от известных к настоящему времени (опирающихся на статистическую информацию) моделированием реальных физико-химических процессов, происходящих в слое ЛГМ перед возгоранием – в первую очередь процессов тепло- и массопереноса.

**Целью настоящей работы** является создание основных элементов теории прогностического моделирования лесной пожарной опасности (условий возникновения пожара), учитывающей реальные физико-химические процессы, протекающие при возникновении лесных пожаров, в условиях действия антропогенной нагрузки, грозовой активности, концентрированного солнечного излучения.

**Цель исследования достигается в диссертации путем решения следующих взаимосвязанных задач:**

1. Экспериментальное исследование основных закономерностей и условий зажигания типичных ЛГМ нагретой до высоких температур частицей.
2. Экспериментальное исследование основных закономерностей и условий зажигания типичных лесных горючих материалов сфокусированным солнечным излучением.
3. Разработка математических моделей тепло- и массопереноса при зажигании слоя ЛГМ одиночной нагретой до высоких температур частицей и численное исследование процесса.
4. Разработка математических моделей тепло- и массопереноса при зажигании лиственных и хвойных деревьев наземным грозовым разрядом и выявление основных закономерностей этих процессов посредством численного исследования.
5. Разработка математических моделей тепло- и массопереноса при зажигании слоя ЛГМ сфокусированным солнечным излучением и численное исследование процесса.
6. Разработка нового вероятностного критерия лесной пожарной опасности с учетом процессов тепло – и массопереноса, протекающих при зажигании слоя лесных горючих материалов в условиях грозовой активности, антропогенной нагрузки.
7. Программная реализация нового подхода к прогностическому моделированию условий возникновения лесных пожаров на базе теплофизических моделей с использованием современных информационных и параллельных вычислительных технологий.
8. Формулировка и обоснование новой концепции организации лесопожарного мониторинга на базе математических моделей тепло- и массопереноса при зажигании ЛГМ и вероятностных критериев.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые экспериментально обоснована возможность и определены условия возгорания ЛГМ в результате взаимодействия с источником локального нагрева (частицей) и определены зависимости времени задержки зажигания материала от начальной температуры частицы. Разработана физиче-

- ская модель процесса зажигания ЛГМ одиночной нагретой до высоких температур частицей.
2. Впервые экспериментально обоснована возможность и определены условия зажигания ЛГМ в результате действия сфокусированного солнечного излучения. Верифицирован нижний предел зажигания ЛГМ по величине теплового потока солнечного излучения. Разработана физическая модель процесса зажигания ЛГМ сфокусированным солнечным излучением.
  3. Впервые сформулированы и численно реализованы одномерная, двумерная и пространственная математические модели тепло- и массопереноса при зажигании слоя ЛГМ одиночной нагретой до высоких температур частицей. Установлено хорошее соответствие экспериментальным значениям времен задержки зажигания, полученных при численном моделировании.
  4. Сформулированы и численно реализованы, не имеющие аналогов математические модели тепло- и массопереноса при зажигании лиственных и хвойных деревьев наземным грозовым разрядом. Установлено, что тепловыделение в хвойных деревьях происходит в подкорковой зоне, а в лиственных в сердцевине; наличие ветвей (реактивной древесины) снижает вероятность воспламенения деревьев; воспламенение происходит в газовой фазе в области трещины в коре; процессы воспламенения определяются поступлением газообразных продуктов пиролиза из подкорковой зоны у хвойных деревьев и из крупных сосудов у лиственных деревьев.
  5. Впервые теоретически подтверждена возможность зажигания слоя ЛГМ сфокусированным солнечным излучением. Сформулирована и численно реализована математическая модель тепло- и массопереноса при зажигании слоя ЛГМ излучением. Определены критические условия, при которых возможно воспламенение слоя ЛГМ сфокусированным потоком солнечного излучения.
  6. Разработан новый детерминировано-вероятностный метод прогностического моделирования лесной пожарной опасности на базе моделей тепло- и массопереноса при зажигании ЛГМ с учетом антропогенной нагрузки и грозовой активности. Предлагаемая модель позволяет более точно оценивать лесную пожарную опасность по сравнению с существующим ГОС-Том; ретроспективный анализ показал отклонение прогнозируемого числа лесных пожаров от зарегистрированного в среднем 10.4 %.
  7. Разработан проблемно-ориентированный подход ландшафтного распараллеливания при решении задач определения вероятности возникновения лесных пожаров. Создан прототип информационно-прогностической системы оценки вероятности возникновения лесных пожаров, обладающий графическим интерфейсом пользователя и способный взаимодействовать с географическими информационными системами и программами численного прогноза погоды.
  8. Сформулирована и разработана новая концепция организации лесопожарного мониторинга на базе моделей тепло- и массопереноса при зажигании ЛГМ и вероятностных критериев.

**Достоверность исследований** подтверждается анализом погрешностей результатов экспериментов, использованием хорошо апробированных при решении нелинейных задач тепло- и массопереноса численных методов и алгоритмов, проведением внутренних тестов программ, в ряде случаев сравнением с данными экспериментов и натуральных наблюдений, в предельных случаях с результатами других исследователей.

**Теоретическая значимость.** Экспериментально обоснована возможность и определены условия зажигания типичных ЛГМ (хвоя сосны и листья березы) в результате действия одиночной нагретой до высоких температур частицы (стальной и углеродистой). Определены зависимости времени задержки зажигания от начальной температуры частицы, анализ которых показал, что время задержки зажигания листьев березы меньше, чем, например, аналогичные времена задержки для керосина. Полученные результаты открывают перспективы разработки новых обобщенных математических моделей зажигания ЛГМ в смешанных лесах и развития новых математических моделей пожарной безопасности промышленных объектов, расположенных на лесопокрытой территории.

Впервые экспериментально обоснована возможность и определены условия зажигания типичных ЛГМ сфокусированным естественным солнечным излучением.

Разработаны не имеющие аналогов математические модели тепло- и массопереноса при зажигании листовых и хвойных деревьев наземным грозовым разрядом. Численное моделирование позволило установить основные закономерности процесса их воспламенения при воздействии разряда на деревья.

Разработан новый детерминированно-вероятностный метод прогноза лесной пожарной опасности.

Разработан новый подход ландшафтного распараллеливания при решении задачи лесопожарного мониторинга в режиме, опережающем реальное время развития процесса. Подход является проблемно-ориентированным, но в пределах области своего приложения является достаточно гибким и универсальным.

**Практическая ценность.** Впервые разработан вероятностный критерий лесной пожарной опасности, который учитывает не только метеоданные, но и грозовую активность, уровень антропогенной нагрузки на качественно новом уровне: учитывается динамика наземных грозовых разрядов, процессы тепломассопереноса при зажигании деревьев наземным грозовым разрядом и ЛГМ антропогенным источником, динамика антропогенной нагрузки в течение недели. Авторские разработки использованы при создании экспертных (ТГТУ, г. Тверь) и ГИС-систем (ИКАРП ДВО РАН, г. Биробиджан; ЦЭПЛ РАН, г. Москва). Получено 3 акта внедрения и использования результатов. Применение новых методов моделирования позволит более точно и оперативно прогнозировать лесную пожарную опасность.

## **Положения, выносимые на защиту:**

### 1.1 Основные элементы теории прогностического моделирования лесной пожарной опасности:

- Экспериментально обоснована возможность и определены условия зажигания типичных ЛГМ одиночной нагретой до высоких температур частицей.
- Экспериментально обоснована возможность и определены условия зажигания типичных ЛГМ сфокусированным солнечным излучением.
- Математические модели тепло- и массопереноса при зажигании ЛГМ нагретыми до высоких температур частицами, отличающиеся от известных учетом комплекса физико-химических процессов и пористой структуры приповерхностного слоя ЛГМ.
- Математические модели тепло- и массопереноса при зажигании слоя ЛГМ сфокусированным солнечным излучением.
- Математические модели тепло- и массопереноса при зажигании лиственных и хвойных деревьев наземным грозовым разрядом. Модели учитывают структурную неоднородность ствола и коры дерева, локализацию реактивной древесины, вольт-амперные характеристики разряда, пиролиз древесины, испарение влаги и химическое реагирование в газовой фазе.
- Основные теоретически определенные закономерности процессов зажигания ЛГМ и деревьев и вероятностной оценки лесной пожарной опасности.

### 1.2 Прикладные аспекты теории прогностического моделирования лесной пожарной опасности:

- Детерминированно-вероятностный подход к прогнозу лесной пожарной опасности, отличающийся от известных учетом процессов тепло-массопереноса при зажигании деревьев наземным грозовым разрядом и слоя ЛГМ нагретыми до высоких температур частицами природного и антропогенного происхождения и моделей зажигания ЛГМ сфокусированным солнечным излучением.
- Подход ландшафтного распараллеливания для лесопожарного мониторинга крупных лесопокрытых территорий, отличающийся ориентацией на структуру лесного хозяйства и отсутствием межпроцессорных обменов в процессе вычислений. Прототип информационно-прогностической системы оценки вероятности возникновения лесных пожаров.
- Новая концепция организации лесопожарного мониторинга, отличающаяся интеграцией моделей атмосферной циркуляции, систем сбора данных об уровне антропогенной нагрузки, систем пеленгации наземных грозовых разрядов, вероятностных критериев и моделей тепло- и массопереноса при зажигании ЛГМ в единый аппаратно-программный комплекс.

**Личный вклад автора.** Диссертант разработал новый подход к анализу и прогнозу лесной пожарной опасности. Автор сформулировал новые физические представления о рассматриваемых явлениях и процессах и разработал математические постановки всех решенных задач. При непосредственном участии автора экспериментально определены условия зажигания ЛГМ одиночной нагретой до высоких температур частицей. Барановский Н.В. спланировал и провел эксперимент по определению условий зажигания ЛГМ сфоку-

сированным солнечным излучением. Диссертант осуществил численную реализацию математических моделей, получил, проанализировал и обобщил все основные результаты, сформулировал выводы.

**Публикации и апробация работы.** Результаты, представленные в настоящей диссертационной работе, обсуждались на следующих конференциях: Сибирская школа-семинар по параллельным вычислениям (г. Томск, 2001, 2005); Международная конференция "Сопряженные задачи механики, информатики и экологии" (г. Томск, 2002); Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS (г. Томск, 2002, 2006, 2008); XIII международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана" (г. Томск, 2006); Международная конференция "Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании" (г. Павлодар, Казахстан, 2006); Всероссийская конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики" (г. Томск, 2006); Международная конференция "Современное состояние лесной растительности и ее рациональное использование" (г. Хабаровск, 2006); Международная научная конференция "Параллельные вычислительные технологии" (г. Челябинск, 2007; г. Нижний Новгород, 2009); IX Всероссийская конференция "Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф" (г. Барнаул, 2007); Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу (г. Томск, 2007, 2009, 2011); Международная научно-практическая конференция "Рациональное использование и воспроизводство лесных ресурсов в системе устойчивого развития" (Беларусь, г. Гомель, 2007); 7-я Международная конференция-семинар "Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах" (г. Нижний Новгород, 2007); Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы развития лесного комплекса" (г. Вологда, 2008, 2009); Всероссийская конференция по математике и механике, посвященная 130-летию ТГУ и 60-летию ММФ (г. Томск, 2008); III Международная научная конференция "Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования" (г. Воронеж, 2009); Всероссийская конференция "Новые математические модели механики сплошных сред: построение и изучение" (г. Новосибирск, 2009); III Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеграция науки и практики" (г. Ставрополь, 2009); Байкальская Всероссийская конференция "Информационные и математические технологии в науке и управлении" (г. Иркутск, 2009, 2012); International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (Kazan, 2009; Samara, 2011); III Всероссийская конференция "Безопасность и живучесть технических систем" (г. Красноярск, 2009); Научно-техническая конференция "Системы безопасности" (г. Москва, 2009, 2010, 2011); International Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences (Tomsk, 2007; Krasnoyarsk, 2009); VI-я Международная научно-техническая конференция "Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2009)" (г. Уфа, 2009); Всероссийская конфе-

ренция “Математическое моделирование и вычислительно-информационные технологии в междисциплинарных научных исследованиях” (г. Иркутск, 2009); 22<sup>nd</sup> International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (Belarus, Minsk, 2009); 8-ая Международная конференция “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (Украина, Алушта, 2010, 2011); Международная научно-практическая конференция “Наука о лесе XXI века” (Беларусь, Гомель, 2010); Международная научно-практическая конференция “Экология. Риск. Безопасность” (г. Курган, 2010); Всероссийская конференция “XXIX Сибирский теплофизический семинар” (г. Новосибирск, 2010); 5-ая Российская национальная конференция по теплообмену (г. Москва, 2010); 18-ая Международная научно-техническая конференция “Прикладные задачи математики и механики” (Украина, Севастополь, 2010); Международная конференция “Окружающая среда и менеджмент природных ресурсов” (г. Тюмень, 2010); Симпозиум “Современная химическая физика” (г. Туапсе, 2010, 2011); World Forum – International Congress “Geocataclysm” (Turkey, Istanbul, 2011). Материалы диссертационного исследования опубликованы в монографии и 42 статьях в журналах, входящих в перечень российских рецензируемых журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и двух приложений. Написана на 436 листах, содержит 56 таблиц и 129 рисунков. Список литературы содержит 465 наименований.

Во введение представлена цель и задачи исследования, методы их решения, кратко освещается круг исследуемых проблем и результатов, полученных в области прогноза лесной пожарной опасности ранее. Обоснована необходимость разработки нового подхода к прогностическому моделированию лесной пожарной опасности. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научно-практическая значимость и результаты апробации работы.

Глава 1 отражает современное состояние теории прогноза лесной пожарной опасности. Проведен анализ основных факторов, определяющих условия возникновения лесных пожаров и существующих методик прогноза лесной пожарной опасности. Показано, что процессы зажигания ЛГМ нагретой до высоких температур частицей, наземным грозовым разрядом и сфокусированным солнечным излучением до сих пор реально не учитываются в системах прогноза лесной пожарной опасности.

В главе 2 представлены результаты экспериментального и теоретического исследования зажигания слоя ЛГМ одиночной нагретой до высоких температур частицей. Обоснована возможность и определены условия возгорания ЛГМ в результате действия источника ограниченного теплосодержания. Опыты проводились с типичными ЛГМ (сосновая хвоя и листья березы).

Источник возгорания моделировался стальной либо углеродистой частицей. Выявлены основные закономерности и определены времена задержки зажигания ЛГМ (рис. 1). Типичные кадры видеोगраммы представлены на рис. 2.

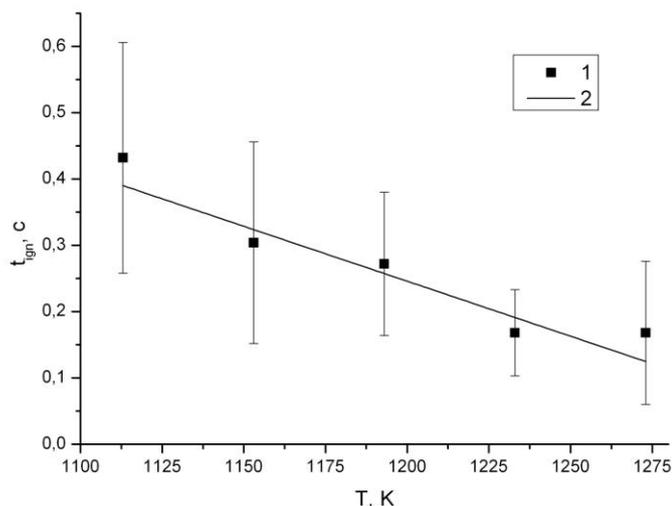


Рис. 1. Экспериментальная зависимость времени задержки зажигания ЛГМ (хвоя сосны) от начальной температуры частицы: 1, 2 – усредненные значения и аппроксимирующая прямая (частица размерами  $h=14$  мм;  $x_1=8$  мм;  $x_2=8$  мм; массой  $m=1,3$  г)



Рис. 2. Характерные кадры видеोगраммы процесса зажигания ЛГМ (хвоя сосны): а)  $t=0,08$  с – инертный прогрев слоя ЛГМ; б)  $t=0,20$  с – появление пламени (зажигание ЛГМ); в)  $t=0,32$  с – объединение пламени над частицей;

Разработаны физическая и математическая модели тепло- и массопереноса при зажигании ЛГМ нагретой частицей. Рассматривались углеродистые (этот вариант отвечает сценарию возникновения массовых лесных пожаров в результате переноса и выбрасывания обугленных фрагментов ЛГМ на нетронутый огнем слой горючего материала) и стальные частицы (вариант соответствует сценарию антропогенного источника огня, например электросварки). Газовая смесь принималась трехкомпонентной, содержащей окислитель (кислород), горючие компоненты (газообразные продукты пиролиза – оксид углерода) и инертные компоненты (азот, двуокись углерода). Считалось, что влага в ЛГМ отсутствует (допущение отвечает достаточно типичному в последние годы для многих территорий сценарию катастрофической пожарной опасности).

Процесс тепло- и массопереноса при воспламенении слоя ЛГМ нагретой до высоких температур частицей описывается системой трехмерных нестационарных нелинейных уравнений теплопроводности и диффузии.

Уравнение энергии для газовой смеси:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + q_5 (1 - \nu_5) R_5,$$

уравнение энергии для частицы:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right),$$

уравнение энергии для слоя ЛГМ:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right) + q_1 k_1 \rho_3 \varphi \exp \left( - \frac{E_1}{RT_3} \right),$$

уравнения диффузии для компонент газовой фазы:

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_4}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_4}{\partial z^2} \right) - \frac{M_4}{M_5} R_5,$$

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C_5}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_5}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_5}{\partial z^2} \right) - R_5$$

уравнение баланса массы:

$$\sum_{i=4}^6 C_i = 1.$$

На границах раздела двух сред сформулированы граничные условия 4-го рода, а на внешней границе области решения – 1-го рода.

Для численной реализации использован конечно-разностный метод. Двумерные и трехмерные разностные уравнения решены локально-одномерным методом. Разностные аналоги одномерных уравнений теплопроводности и диффузии решены методом прогонки в сочетании с методом простой итерации. Алгоритм программы был протестирован на различных менее сложных по сравнению с решенной задачах тепломассопереноса.

Типичное температурное поле представлено на рис. 3. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов приведено на рис. 4. Установлено, что времена задержки зажигания отличны для одномерной, двумерной и пространственной постановок. В первую очередь это объясняется процессами теплообмена частицы со слоем ЛГМ и окружающей средой в реальной пространственной геометрии. Тем не менее, понижение температуры частицы не столь значительное (не более 20 К). Можно сделать вывод, что возможно применение одномерной постановки для оперативного прогноза лесной пожарной опасности.

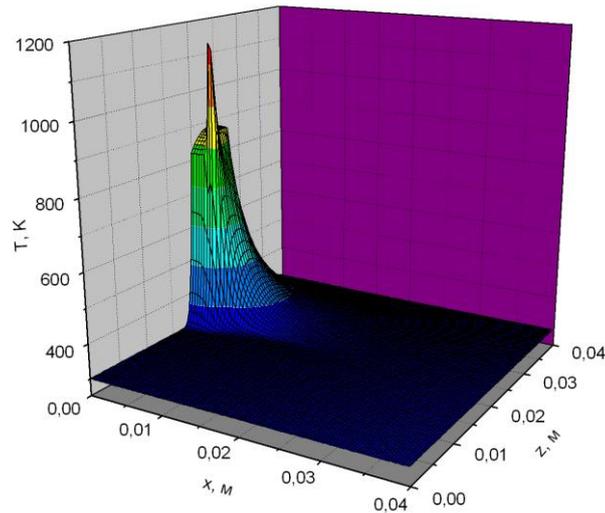


Рис. 3 Распределение температуры в системе “газовая смесь-частица-слой ЛГМ” в момент зажигания

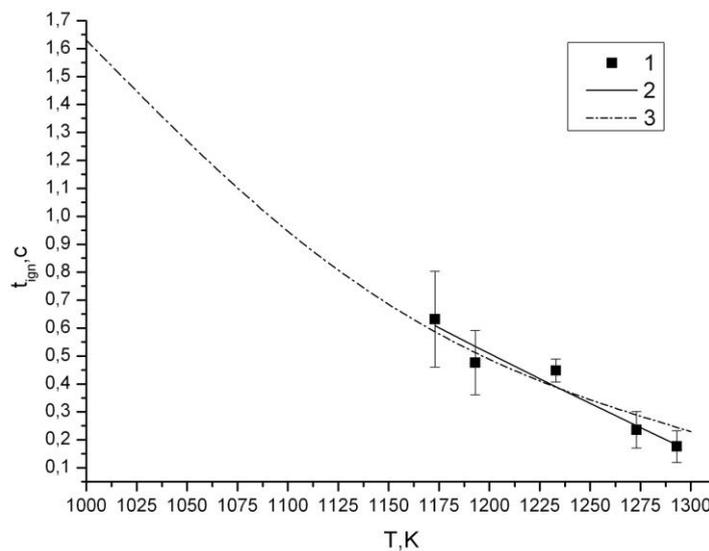


Рис. 4. Зависимость времени задержки зажигания ЛГМ от начальной температуры частицы: 1 – экспериментальные точки, 2 – аппроксимирующая прямая, 3 - теоретическая зависимость

Совокупность представленных в этой главе результатов можно классифицировать как обоснование возможности и установление условий зажигания типичных ЛГМ одиночными нагретыми частицами с использованием разработанных автором диссертации физической и математической моделей исследованного процесса.

В Главе 3 представлены результаты теоретического исследования процессов зажигания хвойных деревьев наземным грозовым разрядом с учетом тепловыделения в подкорковой зоне.

Постановка задачи проведена при ряде допущений: реактивная древесина образуется в нижней части ветвей; используется приближение “идеальной” трещины в коре; при моделировании рассматривалась только часть ветви, вырастающая из ствола; основным продуктом пиролиза является монооксид углерода; ведущей химической реакцией является реакция окисления монооксида углерода до диоксида углерода; дерево рассматривается как проводник типа резистор, для которого справедливы законы Ома и Джоуля-Ленца. Математическая постановка задачи представлена ниже:

Уравнение энергии для сердцевины ствола:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_1}{r^2} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \varphi^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} - Q_p k_p \rho_1 \varphi_{13} \exp \left( -\frac{E_1}{RT_1} \right),$$

уравнение энергии для подкорковой зоны:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_2}{r^2} \frac{\partial^2 T_2}{\partial \varphi^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + JU - Q_p k_p \rho_2 \varphi_{13} \exp \left( -\frac{E_1}{RT_2} \right),$$

уравнение энергии для коры:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\lambda_3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_3}{r^2} \frac{\partial^2 T_3}{\partial \varphi^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} - Q_p k_p \rho_3 \varphi_{13} \exp \left( -\frac{E_1}{RT_3} \right),$$

уравнения энергии для верхней части ветви:

$$\rho_4 c_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \frac{\lambda_4}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_4}{r^2} \frac{\partial^2 T_4}{\partial \varphi^2} + \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} - Q_p k_p \rho_4 \varphi_{13} \exp \left( -\frac{E_1}{RT_4} \right),$$

$$\rho_5 c_5 \frac{\partial T_5}{\partial t} = \frac{\lambda_5}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_5}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_5}{r^2} \frac{\partial^2 T_5}{\partial \varphi^2} + \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial z^2} + JU - Q_p k_p \rho_5 \varphi_{13} \exp \left( -\frac{E_1}{RT_5} \right),$$

$$\rho_6 c_6 \frac{\partial T_6}{\partial t} = \frac{\lambda_6}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_6}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_6}{r^2} \frac{\partial^2 T_6}{\partial \varphi^2} + \lambda_6 \frac{\partial^2 T_6}{\partial z^2} - Q_p k_p \rho_6 \varphi_{13} \exp \left( -\frac{E_1}{RT_6} \right),$$

уравнения энергии для нижней части ветви:

$$\rho_7 c_7 \frac{\partial T_7}{\partial t} = \frac{\lambda_7}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_7}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_7}{r^2} \frac{\partial^2 T_7}{\partial \varphi^2} + \lambda_7 \frac{\partial^2 T_7}{\partial z^2} - Q_p k_p \rho_7 \varphi_{13} \exp \left( -\frac{E_1}{RT_7} \right),$$

$$\rho_8 c_8 \frac{\partial T_8}{\partial t} = \frac{\lambda_8}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_8}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_8}{r^2} \frac{\partial^2 T_8}{\partial \varphi^2} + \lambda_8 \frac{\partial^2 T_8}{\partial z^2} + JU - Q_p k_p \rho_8 \varphi_{13} \exp \left( -\frac{E_1}{RT_8} \right),$$

$$\rho_9 c_9 \frac{\partial T_9}{\partial t} = \frac{\lambda_9}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_9}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_9}{r^2} \frac{\partial^2 T_9}{\partial \varphi^2} + \lambda_9 \frac{\partial^2 T_9}{\partial z^2} - Q_p k_p \rho_9 \varphi_{13} \exp \left( -\frac{E_1}{RT_9} \right),$$

уравнение энергии для газовой смеси:

$$\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\lambda_g}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_g}{r^2} \frac{\partial^2 T_g}{\partial \varphi^2} + \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} + Q_5 (1 - \nu_5) R_5.$$

уравнения диффузии:

$$\frac{\partial C_{10}}{\partial t} = \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C_{10}}{\partial r} \right) + \frac{D}{r^2} \frac{\partial^2 C_{10}}{\partial \varphi^2} + D \frac{\partial^2 C_{10}}{\partial z^2} - R_5 \frac{M_4}{2M_5},$$

$$\frac{\partial C_{11}}{\partial t} = \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C_{11}}{\partial r} \right) + \frac{D}{r^2} \frac{\partial^2 C_{11}}{\partial \varphi^2} + D \frac{\partial^2 C_{11}}{\partial z^2} - R_5,$$

$$\sum_{i=10}^{12} C_i = 1,$$

На границах раздела двух сред сформулированы граничные условия 4-го рода, а на внешней границе области решения – 1-го рода.

При проведении численных исследований принималось, что на ствол дерева действует отрицательный грозовой разряд длительностью 500 мс с током удара в 23.5 кА и напряжением 100 кВ. Это типичные параметры разряда [1,2]. На рис. 5 представлено распределение температуры по радиусу ствола в момент зажигания электрическим током ( $t=0.453$  с).

Исследовано влияние вольт-амперных характеристик наземного грозового разряда на характеристики зажигания ствола дерева хвойной породы с учетом локализации реактивной древесины. В таблице 1 приведены условия зажигания в зависимости от напряжения наземного грозового разряда при силе тока  $J=23.5$  кА для представительного сечения ствола дерева ( $z=8.2$  м).

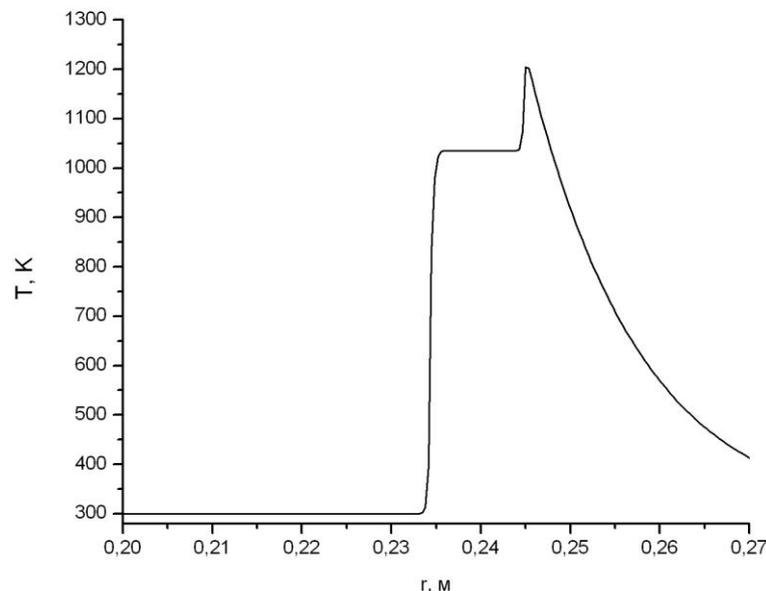


Рис. 5 Распределение температуры по радиальной координате в системе “ствол-газовая среда” в момент зажигания

Таблица 1 Условия зажигания хвойного дерева в зависимости от напряжения разряда при силе тока  $J=23.5$  кА ( $z=8.2$  м)

| Напряжение, U, кВ | Выполнение условий зажигания   | Температура поверхности зажигания, К | Тепловой поток к поверхности зажигания, кВт/м <sup>2</sup> |
|-------------------|--|--------------------------------------|--|
| 1 – 85            | За время действия наземного грозового разряда условия зажигания не достигаются | <867                                 | <210   |
| 90                | Условия зажигания выполняются  | 867                                  | 242  |
| 95                | Условия зажигания выполняются  | 867                                  | 246  |
| 100               | Условия зажигания выполняются  | 867                                  | 249  |
| 105               | Условия зажигания выполняются  | 867                                  | 252  |
| 110               | Условия зажигания выполняются  | 867                                  | 255  |

Анализ результатов показывает, что типичный наземный грозовой разряд с параметрами ( $U=100 - 110$  кВ и  $J=23.5 - 35$  кА) вызывает воспламенение обычной древесины хвойного дерева. Можно сделать вывод, что большинство наземных грозовых разрядов может вызвать зажигание обычной древесины хвойного дерева.

В таблице 2 приведены условия зажигания реактивной древесины в зависимости от напряжения наземного грозового разряда при силе тока  $J=23.5$  кА ( $z=8.47$  м)

Таблица 2 Условия зажигания реактивной древесины в зависимости от напряжения разряда при силе тока  $J=23.5$  кА ( $z=8.47$  м)

| Напряжение, U, кВ | Выполнение условий зажигания   | Температура поверхности зажигания, К | Тепловой поток к поверхности зажигания, кВт/м <sup>2</sup> |
|-------------------|--|--------------------------------------|--|
| 1 – 85            | За время действия наземного грозового разряда условия зажигания не достигаются | <867                                 | <210   |
| 90                |  | <867                                 | 215  |
| 95                |  | <867                                 | 227  |
| 100               |  | <867                                 | 238  |
| 105               |  | <867                                 | 250  |
| 110               |  | Условия зажигания выполняются        | 867  |

Определены времена задержки зажигания хвойного дерева наземным грозовым разрядом в рамках трехмерной модели (табл. 3 и 4).

Таблица 3 Времена задержки зажигания дерева в зависимости от напряжения разряда при силе тока  $J=23.5$  кА

| Напряжение, U, кВ | Время задержки зажигания, $t_*$ , с |
|-------------------|-------------------------------------|
| 1 – 85            | Зажигания не происходит             |
| 90                | 0.516                               |
| 95                | 0.486                               |
| 100               | 0.463                               |
| 105               | 0.441                               |
| 110               | 0.423                               |

Таблица 4 Время задержки зажигания ствола дерева в зависимости от силы тока при напряжении  $U=100$  кВ.

| Сила тока, J, кА | Время задержки зажигания |
|------------------|--------------------------|
| 1 – 20           | Зажигания не происходит  |
| 23.5             | 0.463                    |
| 30               | 0.366                    |
| 35               | 0.317                    |

Совокупность полученных в третьей главе результатов можно классифицировать как теоретическое обоснование возможности и условий зажигания ствола хвойного дерева под действием грозового разряда в условиях тепловыделения в подкорковой зоне.

В Главе 4 приведены результаты численного исследования процессов зажигания лиственных деревьев наземным грозовым разрядом с учетом тепловыделения в сердцевине ствола или в элементах его структуры. Исследование процесса зажигания лиственного дерева проведено с использованием математической модели, подобной главе 3 (зажигание хвойного дерева). В отличие от модели зажигания хвойных деревьев наземным грозовым разрядом в настоящей главе учитываются особенности структуры ствола лиственного дерева и процесс испарения влаги, которой в лиственном дереве значительно больше, чем в хвойном.

На рис. 6 представлено типичное распределение температуры по радиальной координате в сечении ствола дерева, проходящего через трещину в коре, в момент зажигания током наземного грозового разряда.

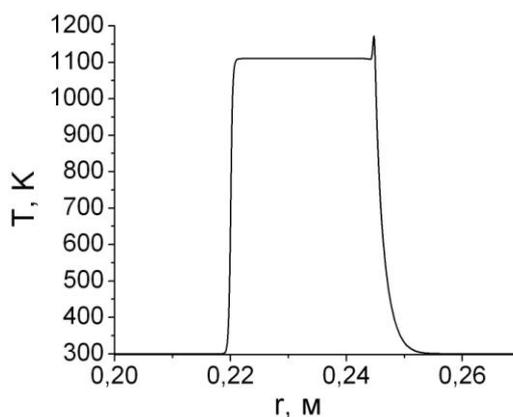


Рис. 6 Распределение температуры по радиальной координате в сечении трещины в момент зажигания

Анализ представленной на рис. 6 температурной зависимости показывает, что в результате действия типичного наземного грозового разряда ствол дерева в области крупных сосудов разогревается до температур, при которых происходит интенсивное образование продуктов пиролиза. На рис. 7.а представлены зависимости объемных долей органического вещества, влаги и водяного пара в области крупного сосуда от времени. В начальный период времени с повышением температуры происходит интенсивное испарение влаги, содержащейся в древесине. Интенсивный процесс термического разложения органического вещества древесины начинается в условиях, когда практически вся влага из древесины испарилась. На рис. 7.б представлено распределение объемных долей компонент по радиальной координате в момент зажигания.

В результате численного исследования установлено, что, например, при силе тока 1 – 15 кА и напряжении 1 – 60 кВ (типичные параметры разряда [1,2]) не происходит зажигания листовенного дерева при воздействии наземного грозового разряда (табл. 5 и табл. 6).

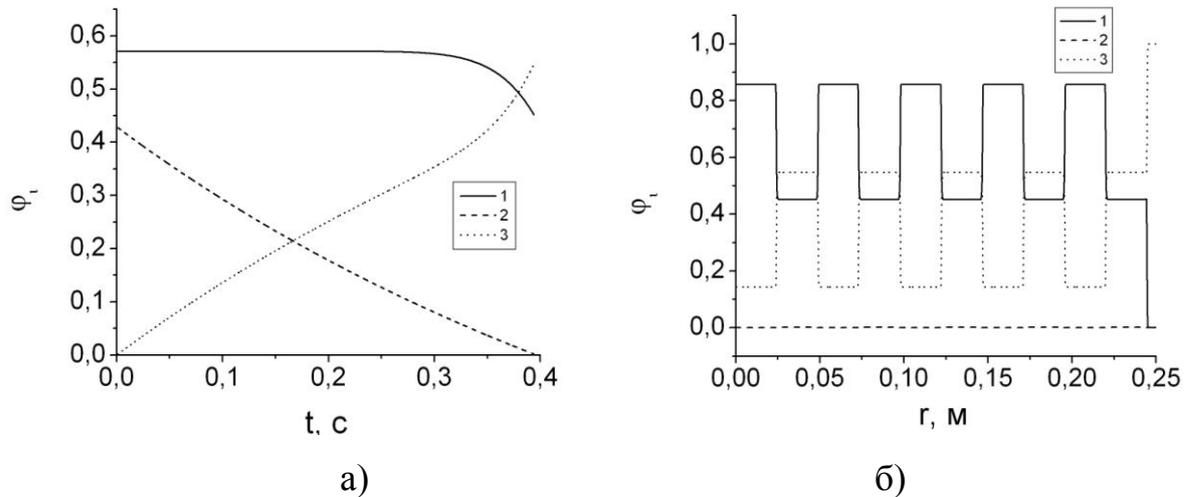


Рис. 7 Распределение объемных долей компонент в области крупного сосуда ( $r=0.24$  м) во времени (а); распределение объемных долей компонент по радиальной координате в момент зажигания (б): 1 – органическое вещество, 2 – влага, 3 – водяной пар

Таб. 5 Время задержки зажигания лиственного дерева в зависимости от напряжения (при  $J=23.5$  кА)

| Напряжение, U, кВ | Время задержки зажигания, $t^*$ , с   |
|-------------------|---|
| 1 – 60            | За время действия наземного грозового разряда возгорания дерева не происходит |
| 70                | 0.480   |
| 80                | 0.445   |
| 90                | 0.415   |
| 100               | 0.400   |
| 105               | 0.391   |
| 110               | 0.380   |

Таб. 6 Время задержки зажигания лиственного дерева в зависимости от силы тока (при  $U=100$  кВ)

| Сила тока, J, кА | Время задержки зажигания, $t^*$ , с   |
|------------------|---|
| 1 – 15           | За время действия наземного грозового разряда возгорания дерева не происходит |
| 20               | 0.428   |
| 23.5             | 0.400   |
| 25               | 0.385   |
| 30               | 0.350   |
| 35               | 0.320   |

Приведенные в четвертой главе теоретические следствия являются основанием для вывода о возможности использования разработанных автором диссертации физической и математической моделей процесса зажигания лиственного дерева для прогноза лесной пожарной опасности в условиях грозовой активности.

В главе 5 представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов зажигания ЛГМ сфокусированным солнечным излучением. Значительный интерес представляет проблема идентификации и прогнозирования лесных пожаров по неустановленным причинам, которые в реальности могут быть результатом действия концентрированных потоков солнечного излучения. В экспериментах по зажиганию ЛГМ солнечным излучением использовалась вогнуто-выпуклая стеклянная линза диаметром 11 см с фокусируемым размером пятна в 3-3,5 мм в диаметре. Проведены экспериментальные измерения теплового потока сфокусированного солнечного излучения, концентрируемого такой линзой. Установлено, что тепловой поток ( $q_{sun}$ ) сфокусированного линзой солнечного излучения на поверхность нагрева эталонного цилиндра равен  $17780 \pm 1293,5$  Вт/м<sup>2</sup>. Доверительный интервал определения  $q_{sun}$  рассчитан с доверительной вероятностью  $P=0.95$ .

По результатам видеосъемки процесса установлено, что первой непродолжительной стадией является инертный прогрев слоя ЛГМ. Затем следует этап пиролиза хвои. Необходимым условием зажигания является формирование очага термического разложения на поверхности нагрева не менее 1 см в диаметре. При скорости ветра менее 1 м/с ЛГМ в области воздействия и в небольшой окрестности вокруг пятна сфокусированного солнечного излучения термически разлагается в беспламенном режиме (протекают гетерогенные реакции окисления коксика, газообразные продукты пиролиза диффундируют в область газовой фазы и уносятся конвективными потоками). Экспери-

ментально установлено, что в случае порыва ветра (и как следствие, интенсивного вдува окислителя в нагретую до высоких температур область) возможно воспламенение в газовой фазе с образованием микрофакела пламени. С течением времени факел пламени растет и происходит устойчивое распространение пламени по слою ЛГМ. Процесс воспламенения при малых скоростях ветра носит случайный характер и сильно зависит от притока окислителя в результате воздействия ветра на очаг пиролиза ЛГМ (вынужденная конвекция воздушных масс). Характерные кадры процесса зажигания представлены на рис. 8.



Рис. 8. Характерные кадры видеосъемки процесса зажигания слоя сосновой хвои сфокусированным солнечным излучением: а)  $t=40$  сек – рост размеров очага тления, б)  $t=1$  мин 15 сек – зажигание в газовой фазе, в)  $t=1$  мин 30 сек – распространение фронта горения по слою

Все результаты выполненных автором экспериментов по зажиганию ЛГМ сфокусированным потоком солнечного излучения можно условно разделить на три группы (табл. 7): а) при ветре со скоростью до 3 м/с; б) метеорологические условия, для которых характерно наличие ветра со скоростью от 3 м/с до 4 м/с; в) скорость ветра 4 м/с и более. В первом случае имеет место формирование только очага тления, который с течением времени перестает увеличиваться в размере и затухает. Для второго и третьего режимов характерен также рост очага тления с течением времени и возгорание. Процесс возгорания при скорости ветра более 4 м/с является устойчивым. В диапазоне изменения  $v$  от 3 до 4 м/с воспламенение возможно, но процесс является случайным. Этот режим является переходным. В условиях интенсивной вынужденной конвекции происходит приток окислителя к поверхности пиролиза и переход в режим газофазного зажигания.

Таблица 7. Типичные результаты экспериментов по зажиганию хвои сосны

| Т<br>воз-<br>духа,<br>°С | Скорость<br>ветра,<br>м/с | Период<br>инертного<br>нагрева, с | Воспла-<br>менение | Распрост-<br>ранение<br>по слою | Вероятность<br>зажигания                       |                    |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------|--|--------------------|
|                          |                           |                                   |                    |                                 | Для со-<br>вокуп-<br>ности<br>режимов<br>1,2,3 | Для<br>режима<br>3 |
| 32                       | 1                         | 5                                 | Нет                | Нет                             | 0,066  | 1,0                |
| 32                       | 4                         | 5                                 | Да                 | Да                              |  |                    |
| 32                       | 2                         | 6                                 | Нет                | Нет                             |  |                    |
| 29                       | 2                         | 6,5                               | Нет                | Нет                             | 0,667  | 1,0                |
| 29                       | 1                         | 6                                 | Нет                | Нет                             |  |                    |
| 30                       | 0                         | 6                                 | Нет                | Нет                             |  |                    |
| 30                       | 5                         | 5,5                               | Да                 | Да                              |  |                    |
| 31                       | 4                         | 5,5                               | Да                 | Да                              |  |                    |
| 31                       | 0                         | 6                                 | Нет                | Нет                             | 0,700  | 1,0                |
| 31                       | 3,5                       | 5,5                               | Да                 | Да                              |  |                    |
| 32                       | 4                         | 5                                 | Да                 | Да                              |  |                    |
| 32                       | 1                         | 6                                 | Нет                | Нет                             |  |                    |
| 32                       | 5                         | 5                                 | Да                 | Да                              |  |                    |

Также в экспериментах зафиксировано, что наряду с сосновой хвоей возможно зажигание травяной ветоши, но листья березы не воспламеняются в результате действия сфокусированного солнечного излучения ни при каких реальных внешних воздействиях. Сформулирована модель, описывающая установленные закономерности.

Проведено математическое моделирование исследованного экспериментально процесса зажигания сосновой хвои сфокусированным солнечным излучением. При постановке задачи принята следующая схема процесса. На подстилающей поверхности расположен слой ЛГМ, на малом участке которого фокусируется поток солнечного излучения. Слой ЛГМ нагревается и термически разлагается с образованием газообразных продуктов пиролиза. Состав газовой смеси принимается трехкомпонентным (горючее – монооксид углерода, окислитель – кислород, инертные компоненты). Продукты пиролиза диффундируют в область газовой смеси. При определенных температуре и концентрациях реагирующих газов происходит зажигание смеси. Приняты следующие критерии зажигания: 1) теплоприход от химической реакции превышает тепловой поток от источника нагрева в область газовой смеси; 2) температура в газовой смеси достигает критического значения.

Математическая модель тепло- и массопереноса при зажигании слоя ЛГМ сфокусированным солнечным излучением:

Уравнение энергии для слоя ЛГМ:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) - q_p k_1 \rho_3 \varphi \exp \left( -\frac{E_1}{RT_1} \right),$$

уравнение энергии для газовой смеси:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) + q_5 (1 - \nu_5) R_5,$$

уравнения диффузии:

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_4}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_4}{\partial z^2} \right) - \frac{M_4}{M_5} R_5,$$

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C_5}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_5}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_5}{\partial z^2} \right) - R_5,$$

$$\sum_{i=4}^6 C_i = 1.$$

На границах раздела двух сред сформулированы граничные условия 4-го рода, а на внешней границе области решения – 1-го рода.

В таблице 8 приведены времена задержки воспламенения в зависимости от величины теплового потока. Также приведены экспериментальные данные по зажиганию слоя ЛГМ излучением, полученные Гоманом П.А. (Беларусь) [3].

Таблица 8 Времена задержки воспламенения слоя ЛГМ лучистым тепловым потоком

| Тепловой поток, $q_s$ , кВт/м <sup>2</sup> | Время задержки воспламенения (модель 2D), $t_{ign}$ , с | Время задержки воспламенения (модель 3D), $t_{ign}$ , с | Время задержки воспламенения (эксперимент) [3], $t_{ign}$ , с | Эксперимент автора, $t_{ign}$ , с |
|--|---|---|---|-----------------------------------|
| 15   | 99  | 105   | Нет зажигания   |                                   |
| 17   | 85  | 87  | Нет зажигания   | 67±15                             |
| 20   | 62  | 63  | 197-207   |                                   |
| 25   | 33  | 34  | 93-100  |                                   |
| 30   | 26  | 26  | 40-42   |                                   |
| 35   | 21  | 21  | 27-30   |                                   |
| 40   | 18  | 18  | 18-26   |                                   |

Среднее отклонение результатов численного моделирования от экспериментальных данных [3] составило около 42 %, а от экспериментальных результатов автора – 20 %. Полученные результаты можно считать удовлетворительными с точки зрения соответствия теоретических результатов экспериментальным данным. Следует отметить, что разность теоретических и экспериментальных значений времени задержки воспламенения существенно уменьшается с увеличением величины потока сфокусированного излучения.

Численное моделирование позволило установить нижний порог теплового потока сфокусированного солнечного излучения, при котором происхо-

дит воспламенение слоя ЛГМ. Моделирование проведено в трехмерной постановке. Тепловой поток плотностью  $15 \text{ кВт/м}^2$  является минимальной величиной, при котором еще возможно воспламенение слоя ЛГМ. 10-кратное превышение интенсивности потока естественного солнечного излучения может привести к возникновению очага низового лесного пожара. Распределение температуры в центре зоны воздействия теплового потока сфокусированного солнечного излучения представлено на рис. 9 в различные моменты времени.

На начальной стадии слой ЛГМ и газовая смесь прогреваются инертно. Этот процесс длится до достижения температуры около  $900 \text{ К}$ . С течением времени в газовой смеси формируется характерный для области воспламенения пик на температурной кривой (рис. 9).

Представляет интерес исследование условий воспламенения слоя ЛГМ при малых периферических размерах зоны воздействия сфокусированного солнечного излучения. В таблице 9 представлены времена задержки воспламенения в зависимости от теплового потока излучения и периферического размера зоны воздействия.

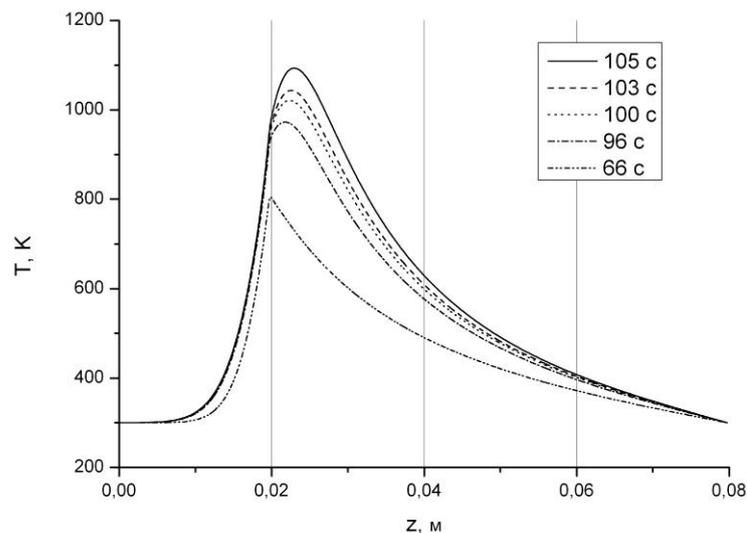


Рис. 9 Распределение температуры в системе “слой ЛГМ-газовая смесь” до и в момент зажигания при  $q_s=15000 \text{ Вт/м}^2$

Таблица 9 Времена задержки воспламенения в зависимости от периферического размера зоны воздействия излучения

| Периферический<br>Размер $d, \text{ мм}$ | Время задержки воспламенения, $t_{\text{ign}}, \text{ с}$ |                      |                      |                      |                      |
|--|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|  | $40 \text{ кВт/м}^2$                                      | $35 \text{ кВт/м}^2$ | $30 \text{ кВт/м}^2$ | $25 \text{ кВт/м}^2$ | $20 \text{ кВт/м}^2$ |
| 10                                       | 26  | 35                   | 48                   | 69                   | 108                  |
| 8  | 35  | 49                   | 70                   | 104                  | 159                  |
| 6  | 59  | 84                   | 126                  | нет                  | нет                  |
| 4  | 154   | нет                  | нет                  | нет                  | нет                  |
| 2  | нет   | нет                  | нет                  | нет                  | нет                  |

Установлено, что при периферических размерах зоны воздействия равных и менее 10 мм величина  $t_{ign}$  увеличивается с уменьшением  $d$ . Такие зоны воздействия можно считать точечными. Во-первых, увеличивается время задержки воспламенения по сравнению с зонами воздействия большого размера. Во-вторых, при прочих равных условиях для зоны воздействия с периферическим размером 2 мм и менее установлено, что воспламенения не происходит. Минимальное отклонение от зон воздействия большого размера наблюдается для  $d=10$  мм и теплового потока величиной 40 кВт/м<sup>2</sup>. Вычисления показали, что при тепловых потоках меньше 20 кВт/м<sup>2</sup> (в условиях отсутствия интенсивного притока окислителя) не происходит воспламенения слоя ЛГМ. Результаты проведенных вычислительных экспериментов позволяют сделать вывод о важности периферических размеров зоны воздействия теплового потока излучения. Также была разработана математическая модель, которая учитывает пористую структуру слоя ЛГМ и проникновение излучения в слой по закону Бугера-Ламберта-Бера.

Совокупность представленных в пятой главе результатов можно классифицировать как экспериментальное и теоретическое обоснование возможности и установление условий зажигания типичного ЛГМ (сосновой хвои) сфокусированным потоком солнечного излучения с использованием разработанных автором физической и математической моделей исследованного процесса.

Полученные при проведении экспериментальных и теоретических исследований процессов зажигания типичных ЛГМ (главы 2-5) результаты стали основой для разработки в главе 6 вероятностных критериев лесной пожарной опасности и новой методики определения вероятности возникновения лесных пожаров с учетом грозовой активности и уровня антропогенной нагрузки на контролируемой территории. Ниже представлены результаты анализа лесной пожарной опасности, выполненного для типичной территории бореальных лесов (Томская область).

Автором разработана формула для сценария совместных событий:

$$P_j = [P(A)P(A_j / A)P(ЛП / A_j, A) + P(M)P(M_j / M)P(ЛП / M_j, M) - P(A)P(A_j / A)P(M)P(M_j / M)P(ЛП / A_j, A, M_j, M)]P_j(C)$$

где  $P(ЛП/A_j, A, M_j, M)$  – вероятность возникновения лесного пожара от совместного действия антропогенной нагрузки и грозовой активности;  $P_j(C)$  – вероятность возникновения пожара по метеоусловиям; индекс  $j$  соответствует дню пожароопасного сезона.

На основании анализа и обобщения полученных автором диссертации результатов предложено использовать сценарный подход для исследования типичных условий возникновения лесных пожаров, который хорошо себя зарекомендовал при прогнозировании лесной пожарной опасности. Рассмотрен сценарий по влиянию антропогенной нагрузки, который соответствовал лесопожарной обстановке в Тимирязевском лесхозе Томской области. На рис. 10 представлены в качестве типичного примера вероятности возникно-

вения лесных пожаров для различных дней недели (Тимирязевское лесничество).

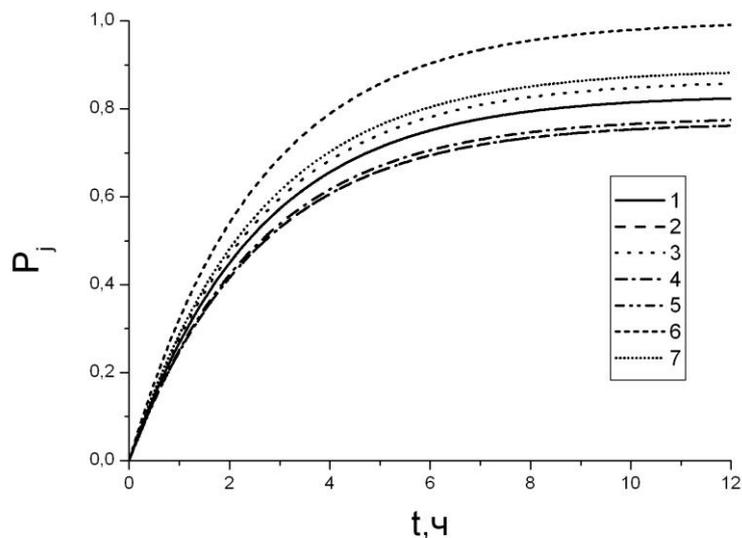


Рис. 10 Изменение вероятности возникновения лесных пожаров по дням недели (Тимирязевское лесничество Тимирязевского лесхоза)

Итоговая вероятность возникновения лесных пожаров на рассматриваемой территории определена по следующей формуле:

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(A_i)).$$

В соответствии с результатами Garsia Diez E.L., число прогнозируемых лесных пожаров автор диссертации предлагает определять по формуле:

$$PNF(d) = \frac{RNF(d-1)P_j^0(d)}{P_j^0(d-1)}, \quad (6.34)$$

где  $PNF(d)$  – прогнозируемое число лесных пожаров;  $RNF(d-1)$  – зарегистрированное число лесных пожаров;  $d$  и  $d-1$  – текущий и предыдущий день соответственно.

Представляет практический интерес ретроспективный анализ разработанной автором диссертации методики. На рисунке 11 представлены статистические данные и прогноз по числу лесных пожаров, полученные автором, в течение недели на территории Тимирязевского лесничества Тимирязевского лесхоза Томской области для одного лесопожарного сезона.

На рис. 11 цифрами обозначены: 1 - статистические данные по числу лесных пожаров за неделю по Тимирязевскому лесничеству, 2 - прогнозируемое число лесных пожаров за неделю по Тимирязевскому лесничеству. Наибольшее количество пожаров возникает в субботу, воскресенье и как следствие продолжается в понедельник. Средняя относительная погрешность прогнозирования составила 10,4 %.

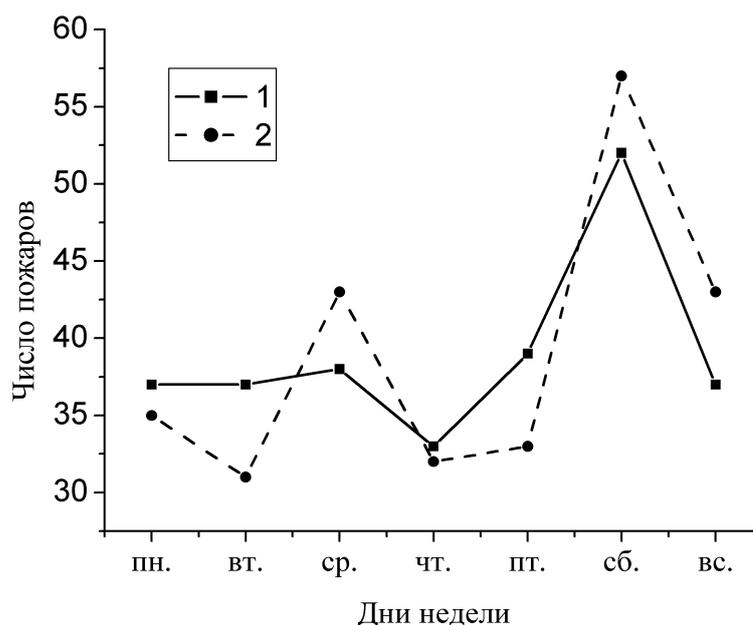


Рис. 11 Сравнительный анализ статистики и прогноза по числу лесных пожаров на территории Тимирязевского лесничества Тимирязевского лесхоза

Как результат обобщения выполненных автором экспериментальных и теоретических исследований разработана модель дифференцированной оценки лесной пожарной опасности с учетом антропогенной нагрузки, грозовой активности, умышленного поджога и конкретизации неустановленных причин (действие сфокусированного солнечного излучения).

Проведено моделирование процессов возникновения лесных пожаров в результате умышленного поджога. Сценарий А (всего предлагается три сценария) характеризуется следующими параметрами умышленного поджога: присутствуют все причины умышленного поджога, характерно наличия всех характеристик лесопокрытой территории. Варьировались метеорологические условия. Для демонстрационных расчетов использованы различные значения такого параметра, как количество выпавших осадков. Проведен численный анализ вероятности возникновения лесных пожаров на пять дней, в которые выпало соответственно 0 мм, 3 мм, 12 мм, 18 мм и 21 мм осадков. Остальные метеорологические параметры являются постоянными. В таблице 10 представлены результаты численного расчета вероятности возникновения лесного пожара в результате преднамеренного поджога на 13 часов дня для сценария А.

Таблица 10 Вероятность возникновения лесных пожаров в результате преднамеренного поджога на 13 часов дня (сценарий А)

| День/осадки | P(C) | P(ЛП <sub>1</sub> ) | P(ЛП <sub>2</sub> ) | P(ЛП <sub>3</sub> ) | P(ЛП) |
|-------------|------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|
| I, 0 мм     | 1.0  | 0.986               | 0.25                | 0.835               | 0.998 |
| II, 3 мм    | 0.4  | 0.669               | 0.1                 | 0.465               | 0.841 |
| III, 12 мм  | 0.2  | 0.401               | 0.05                | 0.259               | 0.578 |
| IV, 18 мм   | 0.1  | 0.219               | 0.025               | 0.137               | 0.343 |
| V, 21 мм    | 0    | 0                   | 0                   | 0                   | 0     |

Совокупность представленных в шестой главе результатов можно классифицировать как основные положения нового подхода к вероятностному прогнозированию при моделировании лесной пожарной опасности с учетом процессов тепло- и массопереноса при зажигании типичных ЛГМ.

В 7-ой главе на основе разработанных автором моделей зажигания типичных ЛГМ (главы 2-5), отличающихся от известных учетом комплекса взаимосвязанных процессов тепло- и массопереноса в слое ЛГМ и прилегающей к его поверхности атмосфере, и новых вероятностных критериев (глава 6) разработана новая концепция прогноза лесной пожарной опасности. Показано, что создание в обозримой перспективе отечественной системы прогноза лесной пожарной опасности, обладающей большей достоверностью и точностью прогнозной информации, потребует привлечения современных информационно-вычислительных технологий и физически-содержательных моделей и критериев. Концепция предполагает создание и развитие отечественной системы прогноза лесной пожарной опасности с целью повышения экологической и экономической безопасности государства посредством мониторинга и управления уровнем пожарной опасности с учетом основных значимых факторов и климатических изменений. Схема прогнозирования в рамках новой концепции представлена на рис. 12.

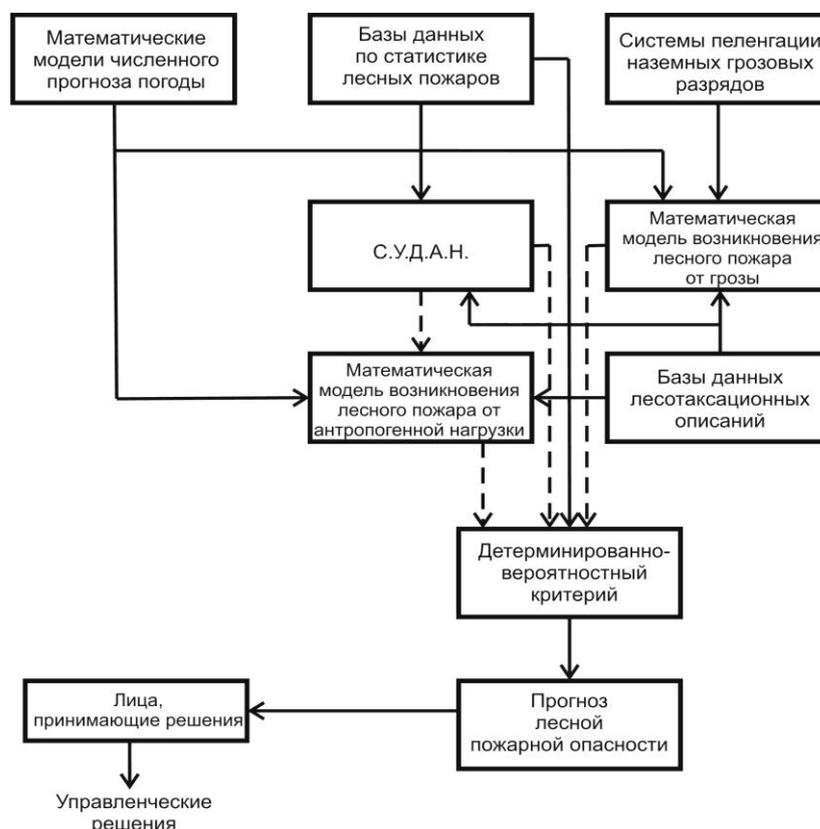


Рис. 12. Схема новой концепции прогноза лесной пожарной опасности

В целях поэтапной разработки параллельного программного комплекса (ППК) прогноза лесной пожарной опасности предложен оригинальный подход ландшафтного распараллеливания. Разработаны масштабируемые парал-

тельные программы (число задействованных процессоров является параметром программы). Установлено, что реальная эффективность распараллеливания по сравнению с оценкой падает незначительно. В переходный период развития ППК рассматриваемая в настоящей работе методика прогноза лесной пожарной опасности была реализована в виде прототипа информационно-прогностической системы для однопроцессорной вычислительной техники.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые экспериментально и теоретически обоснована пожароопасность нагретых до высоких температур частиц, которые могут являться причиной “пятнистых” и массовых лесных пожаров, а также служат основным механизмом перехода лесного пожара на населенный пункт. В результате экспериментальных исследований установлено, что опад первого сезона широколиственных пород деревьев представляет большую пожарную опасность, чем слои из сосновой хвои. Более того, типичные ЛГМ (листья березы) опада широколиственных пород являются более опасными, чем горючее вещество керосин – времена задержки зажигания листьев березы в 2,5 раза ниже, чем у керосина. Установленные закономерности обуславливают необходимость проведения дополнительных лесоохранных мероприятий в смешанных лесах в засушливые периоды лета.
2. Сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментальных данных по времени задержки зажигания ЛГМ показывает, что необходимым условием согласования теоретических следствий и экспериментальных зависимостей является учет пористой структуры приповерхностного слоя ЛГМ. Установлено, что зависимость времени задержки зажигания типичных ЛГМ от начальной температуры частицы можно аппроксимировать прямой. Вид зависимости существенно отличается от кривых, характерных для топливных композиций.
3. Впервые посредством численного моделирования исследованы процессы зажигания деревьев лиственных и хвойных пород наземным грозовым разрядом. Созданы не имеющие в мире аналогов математические модели тепло- и массопереноса при зажигании хвойных деревьев с учетом тепловыделения в подкорковой зоне, а также модели зажигания лиственных деревьев с учетом тепловыделения в сердцевине или в крупных сосудах ствола. Установлено, что наличие реактивной древесины снижает вероятность возникновения возгорания деревьев как лиственных, так и хвойных пород.
4. Установлено, что зажигание лиственных деревьев возможно при силе тока 1 – 15 кА и напряжении 1 – 60 кВ. Для хвойных деревьев: при силе тока 1 – 20 кА и напряжении 1 – 80 кВ. Зажигание происходит в газовой фазе в области структурной неоднородности – трещины в коре. Различия в толщине трещины в реальной геометрии не оказывают существенного влия-

- ния на время задержки зажигания, которые являются входными параметрами для вероятностного критерия оценки лесной пожарной опасности.
5. Впервые экспериментально и теоретически обоснована возможность зажигания слоя ЛГМ в результате действия сфокусированного потока солнечного излучения. Разработаны не имеющие аналогов математические модели тепло- и массопереноса при зажигании слоя ЛГМ концентрированным потоком солнечного излучения. Показано, что 10-кратное усиление интенсивности естественного солнечного излучения может приводить к возникновению возгорания. Теоретически обоснованы требования “Правил пожарной безопасности в лесах” о недопустимости разбрасывания стеклянных емкостей и их осколков, так как они могут выполнять роль антропогенного концентратора солнечного излучения.
  6. Численное моделирование позволило установить, что при периферических размерах зоны воздействия равных и менее 10 мм величина времени задержки зажигания увеличивается с уменьшением периферического размера. Такие зоны воздействия можно считать точечными. Во-первых, увеличивается время задержки воспламенения по сравнению с площадными зонами воздействия. Во-вторых, при прочих равных условиях для зоны воздействия с периферическим размером 2 мм и менее установлено, что воспламенения не происходит. Минимальное отклонение от площадных зон воздействия наблюдается для периферического размера 10 мм и теплового потока величиной 40 кВт/м<sup>2</sup>.
  7. Экспериментально установлено, что сфокусированное солнечное излучение является реальным фактором лесной пожарной опасности. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили результаты теоретического анализа (зажигание ЛГМ возможно при тепловом потоке сфокусированного солнечного излучения 15 кВт/м<sup>2</sup> и выше).
  8. На основе анализа и обобщения экспериментальных и теоретических исследований по зажиганию ЛГМ разработан вероятностный критерий, который впервые учитывает всю совокупность факторов лесной пожарной опасности: грозовую активность, антропогенную нагрузку, метеорологические условия, свойства ЛГМ и физико-химические процессы, протекающие при зажигании ЛГМ и деревьев. В отличие от зарубежных и отечественной методик (результат - абстрактный индекс) новый критерий оценивает вероятность возникновения лесных пожаров. Предложена упрощенная методика прогноза лесной пожарной опасности с учетом настоящего ГОСТ Р 22.1.09-99 «Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования». В модифицированном виде методика в настоящее время используется в ИСДМ-Рослесхоз на федеральном уровне.
  9. В рамках подхода ландшафтного распараллеливания на основе детерминированно-вероятностной методики определения вероятности возникновения лесных пожаров разработан параллельный программный комплекс. Обеспечено минимальное межпроцессорное взаимодействие (только на этапах рассылки и сбора данных, в процессе вычислений такие обмены

отсутствуют). На основе представленной в диссертации детерминированно-вероятностной модели определения вероятности возникновения лесного пожара разработан прототип информационно-прогностической системы. Формат выходных данных позволяет организовать взаимодействие в реальном времени с геоинформационной системой.

10. Разработана новая концепция и система оценки лесной пожарной опасности, отличающаяся от известных учетом грозовой активности, антропогенной нагрузки, метеорологических условий и процессов тепло- и массопереноса, протекающие при зажигании ЛГМ и деревьев.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Soriano L. R., De Pablo F., Tomas C. Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2005. V. 67, N 16. P. 1632—1639.
2. Burke C.P., Jones D.L. On the polarity and continuing current in unusually large lightning flashes deduced from ELF events // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1996. Vol. 58. P. 531 – 548.
3. Касперов Г.И., Гоман П.Н. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений // *Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая промышленность*. 2010. Вып. XVIII. С. 337–340.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 С.
2. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Исследование процесса зажигания хвойного дерева наземным грозовым разрядом в приближении “идеальной” трещины в коре // **Химическая физика и мезоскопия**. 2011. Т.13, № 1. С. 13-20.
3. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Численное исследование задачи о зажигании слоя лесного горючего материала нагретой до высоких температур частицей в плоской постановке // **Химическая физика и мезоскопия**. 2011. Т.13, № 2. С. 173-181.
4. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Моделирование зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения с учетом пористости ЛГМ и проникновения излучения в слой // **Химическая физика и мезоскопия**. 2011. Т. 13. № 3. С. 326 – 330.
5. Барановский Н.В., Захаревич А.В., Максимов В.И. Условия зажигания слоя лесных горючих материалов при локальном нагреве // **Химическая физика и мезоскопия**. 2012. Т. 14. № 2. С. 175 – 180.
6. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Детерминированно-вероятностный прогноз лесопожарных возгораний // **Пожаровзрывобезопасность**. 2006, Т. 15. № 5, С. 56 – 59.
7. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей // **Пожаровзрывобезопасность**. 2006, Т. 15. № 4, С. 42 – 46.

8. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания дерева хвойной породы наземным грозовым разрядом // **Пожаровзрывобезопасность**. 2008. Т. 17. № 3. С. 41 – 45.
9. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Условия зажигания дерева хвойной породы наземным грозовым разрядом // **Пожаровзрывобезопасность**. 2009. № 3. С. 29 – 35.
10. Барановский Н.В. Совместное действие антропогенной нагрузки и грозовой активности и вероятность возникновения лесных пожаров // **Пожаровзрывобезопасность**. 2009. № 3. С. 52 – 56.
11. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Математическое моделирование зажигания дерева лиственной породы наземным грозовым разрядом // **Пожаровзрывобезопасность**. 2009. № 4. С. 19 – 22.
12. Барановский Н. В., Кузнецов Г. В. Учет умышленного поджога при детерминированно-вероятностном прогнозе лесной пожарной опасности // **Пожаровзрывобезопасность**. 2009. № 4. С. 37 – 43.
13. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Моделирование зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом в приближении крупных сосудов // **Пожаровзрывобезопасность**. 2009. № 5. С. 37 – 41.
14. Барановский Н.В. Полный цикл разработки и поддержки параллельного программного комплекса прогноза лесной пожарной опасности // **Пожаровзрывобезопасность**. 2010. Т. 19. № 9. С. 15 – 21.
15. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Пространственная постановка задачи о зажигании хвойного дерева наземным грозовым разрядом // **Пожаровзрывобезопасность**. 2010. Т. 19. № 10. С. 30 – 37.
16. Барановский Н.В., Кузнецов Г.В. Влияние М-компонентов наземного грозового разряда на процесс зажигания лиственного дерева // **Пожаровзрывобезопасность**. 2011. Т. 20, № 2. – С. 15-19.
17. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование газофазного зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом в приближении крупных сосудов с учетом испарения влаги // **Пожаровзрывобезопасность**. 2011. Т. 20, № 3. – С. 2-7.
18. Барановский Н.В., Кузнецов Г.В. Конкретизация неустановленных причин в детерминированно-вероятностной модели прогноза лесной пожарной опасности // **Пожаровзрывобезопасность**. 2011. Т. 20, № 6. С. 24 – 27.
19. Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения // **Пожаровзрывобезопасность**. 2011. Т. 20. № 8. С. 34 – 37.
20. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Детерминированная компонента методики прогноза лесной пожарной опасности по неустановленным причинам // **Пожаровзрывобезопасность**. 2011. Т. 20. № 11. С. 29 – 33.
21. Захаревич А.В., Барановский Н.В., Максимов В.И. Зажигание лесных горючих материалов одиночными, нагретыми до высоких температур частицами // **Пожаровзрывобезопасность**. 2012. Т. 21. № 4. С. 13 – 16.
22. Захаревич А.В., Барановский Н.В., Максимов В.И. Зажигание типичных лесных горючих материалов опада лиственных пород локальным источником энергии // **Пожаровзрывобезопасность**. 2012. Т. 21. № 6. С. 23 – 28.
23. Барановский Н.В. Прогнозирование количества лесных пожаров // **Пожарная**

- безопасность.** 2007. № 1. С. 123 – 127.
24. Барановский Н.В. Методика прогнозирования лесной пожарной опасности как основа нового государственного стандарта // **Пожарная безопасность.** 2007. № 4. С. 80 – 84.
  25. Барановский Н.В. Основные принципы параллельной реализации общей математической модели лесного пожара // **Пожарная безопасность.** 2008. № 1. С. 98 – 102.
  26. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Исследование физико-химических процессов зажигания хвойного дерева наземным грозовым разрядом // **Бутлеровские сообщения.** 2010. Т. 20. № 6. С. 52 – 58.
  27. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Пространственная постановка и численное исследование задачи о зажигании слоя лесного горючего материала нагретой до высоких температур частицей // **Бутлеровские сообщения.** 2010. Т. 22. № 12. С. 30 – 37.
  28. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Пространственная постановка и численное исследование задачи о зажигании лиственного дерева наземным грозовым разрядом // **Бутлеровские сообщения.** 2011. Т. 24. № 1. С. 122 – 132.
  29. Барановский Н.В. Численное исследование зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения // **Бутлеровские сообщения.** 2011. Т. 26. № 11. С. 53 – 60.
  30. Захаревич А.В., Барановский Н.В., Максимов В.И. Зажигание лесного горючего материала углеродистой нагретой до высоких температур частицей // **Бутлеровские сообщения.** 2012. Т. 29. № 2. С. 102 – 108.
  31. Барановский Н.В., Кузнецов Г.В. Влияние локализации реактивной древесины на процесс зажигания лиственного дерева положительным наземным грозовым разрядом // **Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика.** 2011. Т. 6. № 4. С. 95 – 106.
  32. Барановский Н.В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности // **Экология и промышленность России.** 2008. № 9. С. 59 – 61.
  33. Барановский Н.В. Интегральная оценка лесной пожарной опасности // **Экология и промышленность России.** 2010. № 3. С. 58 – 59.
  34. Барановский Н.В. Детерминированно-вероятностный прогноз лесной пожарной опасности на основе экспериментальных данных по зажиганию лесного горючего материала // **Наукоёмкие технологии.** 2009. № 6. Т. 10. С. 66 – 70.
  35. Барановский Н.В. Модель дифференцированной оценки лесной пожарной опасности по антропогенным причинам // **Безопасность жизнедеятельности.** 2009. № 7. С. 49 – 53.
  36. Барановский Н.В. Математическое обеспечение прогноза степной пожарной опасности // **Экологические системы и приборы,** 2007. № 2. С. 41 – 45.
  37. Барановский Н.В. Детерминированно-вероятностная модель перехода лесного пожара на населенный пункт // **Экологические системы и приборы.** 2007. № 3. С. 59 – 63.
  38. Захаревич А.В., Барановский Н.В., Максимов В.И. Экспериментальное исследование процессов зажигания опада широколиственных пород деревьев источником ограниченной энергоемкости // **Экологические системы и приборы.** 2012. № 7. С. 18 – 23.
  39. Барановский Н.В. Концептуальная база российской системы прогноза лесной пожарной опасности // **Безопасность в техносфере.** 2010. № 6. С. 34 – 42.

40. Барановский Н.В. Зависимость вероятности возникновения лесных пожаров от продолжительности действия электрического разряда // **Безопасность в техно-сфере**. 2011. № 4. С. 13-16.
41. Барановский Н.В. Ландшафтное распараллеливание и прогноз лесной пожарной опасности // **Сибирский журнал вычислительной математики**. 2007. Том 10, № 2. С. 141 – 152.
42. Барановский Н.В. Влияние антропогенной нагрузки и грозовой активности на вероятность возникновения лесных пожаров // **Сибирский экологический журнал**, 2004. № 6, с. 835-842
43. Барановский Н.В. Экспериментальные исследования зажигания слоя лесных горючих материалов сфокусированным солнечным излучением // **Пожаровзрывобезопасность**. 2012. Т. 21. № 9. С. 23 – 27.