На правах рукописи

Aysies,

Субботин Александр Николаевич

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ЗАЖИГАНИИ И ГОРЕНИИ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный консультант:	доктор физико-математических наук, профессор Кузнецов Гений Владимирович
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН Алексеенко Сергей Владимирович
	доктор физико-математических наук, профессор Крайнов Алексей Юрьевич
	доктор физико-математических наук, профессор Смоляков Виктор Кузьмич
Ведущая организация:	Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва

Защита диссертации состоится «18 » января 2011 года в 14:30 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2, корпус 10, ауд. 228

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Автореферат разослан «<u>14</u> » <u>декабря</u> 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите

докторских и кандидатских диссертаций О.Ю. Долматов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В последние десятилетия, несмотря на повышенное внимание к безопасности современных производств и технологических процессов со стороны органов технического надзора всех государств мирового сообщества, увеличивается число происшествий, малых и крупных аварий, техногенных катастроф. В основном это обусловлено тем, что по многим современным производствам и технологиям на этапе проектирования не прорабатываются возможные сценарии аварийных ситуаций, возникающих в результате старения и износа элементов конструкций основного оборудования в результате его эксплуатации. Так, например, более 70% возгораний и пожаров на атомных электрических станциях возникают в результате нарушений в системе электроснабжения, связанных, как правило, со старением и износом изоляционных материалов и контактных соединений. В результате возникают электрические поля и разряды, которые в определенных условиях могут привести к возгораниям газообразных веществ, продуктов термического разложения изоляционных материалов или к горению самой изоляции. Возможны различные варианты реализации условий зажигания пожароопасных материалов в условиях самых разных производств. Источники зажигания, встречающиеся в производственных и природных условиях, а также в быту, весьма разнообразны как по запасу энергии, так и по природе своего происхождения. Спецификой большинства возгораний и пожаров на промышленных, социальных объектах и в природе является существенная структурная неоднородность воспламеняемых материалов и веществ. Моделирование процессов тепломассопереноса при зажигании и горении реальных горючих материалов и веществ без учета этого фактора приводит к получению во многих случаях неадекватных практике теоретических следствий. Особенно значимо влияние фактора структурной неоднородности проявляется при теоретическом анализе процессов горения торфа, лесных горючих материалов, натуральных топлив (угля), полимерных конструкционных материалов и многих других сред.

Несмотря на масштабность рассматриваемой государственной проблемы до настоящего времени не разработаны теоретические основы процессов тепломассопереноса при зажигании и горении структурно неоднородных сред, к которым можно отнести подавляющее большинство реальных практических приложений в самых различных отраслях промышленности и народного хозяйства. Наиболее просты и типичны примеры зажигания реагирующих веществ нагретым телом, проволочкой, разрядом электрического тока, световым потоком.

В настоящее время в мире регистрируется ежегодно около семи миллионов пожаров, в огне которых гибнет до ста тысяч человек. В России только от лесных пожаров ежегодно погибают тысячи человек, а экономический ущерб составляет около 13 миллиардов рублей. Как показывает анализ, особенно часто лесные пожары возникают в Сибири и на Дальнем Востоке, где число погибших от лесных пожаров на 10 тысяч человек в 4-5 раз превышает этот же показатель Европейской части России.

Не лучше обстоит дело и с пожарами в городах и населенных пунктах. Например, по статистическим данным за 2007 год в России зарегистрировано 211 тысяч пожаров, в которых погибло около 16 тысяч человек и причинен прямой материальный ущерб в размере 8,6 миллиардов рублей. За 9 месяцев 2009 года – 143 тысячи пожаров, в которых погибло около 10 тысяч человек и причинен прямой материальный ущерб в размере 9 миллиардов рублей.

Современные методы прогноза пожарной опасности горючих веществ используют, как правило, модели, в которых источником зажигания является высокотемпературный газовый поток, излучение или конденсированный объемный источник высокой температуры. Но источники воспламенения, встречающиеся в природных и производственных условиях, а также в быту, очень разнообразны. Часто пожары возникают в результате воздействия нагретых тел (частицы металлов, их окислы и т.д.) на химически активные вещества. Одиночные частицы или искры нередко являются источниками возникновения пожаров на промышленных и гражданских объектах. В природных условиях причиной возникновения пожаров являются непотушенные костры, брошенные стеклянные бутылки, охотничьи пыжи, сухие грозы и т.д. Поэтому создание теории тепломассопереноса при зажигании структурно неоднородных веществ и материалов является актуальной научной проблемой имеющей большое народнохозяйственное значение.

Несмотря на то, что исследования механизма зажигания реагирующих веществ нагретыми телами начинались в первой половине двадцатого века, до настоящего времени отсутствуют для многих горючих веществ экспериментальные и теоретические зависимости по минимальной энергии зажигания. Такие зависимости необходимы для прогноза пожарной опасности горючих веществ на производстве, в быту и лесу. На практике наибольшую опасность для окружающей среды представляют технологические процессы: сварка и резка металлов, сжигание мусора и промышленных отходов на неподготовленных или плохо подготовленных для этого площадках.

В последние годы все более актуальным становится анализ особенностей механизма и условий тепломассопереноса при зажигании и горении растительных горючих материалов (опад хвои, подстилка, торф и т. д.). Торфяные и лесные пожары в окрестностях Москвы летом 2010 года привели к чрезвычайной ситуации на территории не только столицы России, но и многих муниципальных образований Московской области. Отсутствие теории, описывающей, например, процесс распространения горения в слоях торфа на некотором расстоянии от поверхности земли существенно затрудняет работу пожарных частей. Поэтому изучение закономерностей процесса тепломассопереноса и механизма зажигания источниками тепла конечных размеров растительных горючих материалов также является актуальной, нерешенной до настоящего времени научной проблемой.

Технология подземной газификации угля (ПГУ) – нетрадиционный способ разработки угольных месторождений, открывающий новые возможности в отработке угольных пластов со сложными горно-геологическими условиями залегания. Все технологические операции по газификации угольного пласта осуществляются с земной поверхности, без применения подземного труда работающих, а разработка месторождения происходит экологически приемлемым способом. В настоящее время практически во всех крупных угледобывающих странах мира резко возрос интерес к подземной газификации угля. Интенсивные работы исследовательского и практического характера проводятся в Китае, Австралии. Проявляется активный интерес к этой технологии в России и таких странах, как Индия, КНДР, Южная Корея и многих других. Но, несмотря на перспективность рассматриваемой технологии ПГУ, известны немногочисленные примеры её практической реализации. Это обусловлено в первую очередь отсутствием теории процессов тепломассопереноса в угле при его газификации под землей. Выбор основных технологических режимов реализации ПГУ невозможен путем только экспериментальных исследований рассматриваемого процесса. Необходимо создание теории процесса ПГУ на базе математических моделей, учитывающих комплекс основных процессов тепломассопереноса, протекающих при подземной газификации.

Актуальность темы диссертации подтверждается также тем, что основные ее результаты получены при проведении исследований в соответствии с Федеральной целевой программой (ФЦП) "Интеграция" (проект "Академический университет"), ФЦП "Университеты России" (подразделение "Математическое моделирование"), грантами РФФИ №93-013-16509, №96-01-00011, №98-01-03005, №99-01-00363, №00-02-16747, грантом "Университеты России" "Математическое моделирование и прогноз возникновения, распространения и экологических последствий низовых лесных пожаров" код проекта УР.03.01.010, программой Федерального Агентства по Образованию шифр гранта "П 042242".

Цель работы. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в структурно неоднородных химически активных веществах и материалах, с последующим аналитическим или численным исследованием критических условий зажигания и горения этих веществ.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- 1) создание математической модели тепломассопереноса при зажигании и горении торфа;
- 2) создание математического аппарата для решения сформулированных в диссертационной работе задач в виде разностных схем и программ;
- численный анализ закономерностей распространения горения вдоль торфяного пласта, установление условий тепломасоообмена с приземным слоем воздуха, при которых горение перемещается внутрь слоя, к верхней поверхности торфяного пласта или прекращается;
- определение критических условий зажигания торфа минимального значения температуры источника или среднего теплового потока от источника, инициирующих зажигание;
- 5) создание математической модели тепломассопереноса при зажигании и горении растительных горючих материалов (РГМ);
- 6) изучение механизма зажигания РГМ локальным источником тепла, установление пределов распространения очага горения по влагосодержанию и теплообмену (коэффициенту теплоотдачи) с приземным слоем воздуха;
- определение критических условий зажигания РГМ локальным источником тепла, получение зависимостей времени зажигания от мощности источника, скорости горения от влагосодержания и теплообмена с приземным слоем воздуха;

- определение аналитических зависимостей для времени прогрева, температуры и предела зажигания конденсированного вещества – минимального значения напряжения разрядного тока или размера нагретого тела, при котором произойдет зажигание;
- 9) анализ влияния пористости, массообмена на поверхности, давления внутри пор, внешнего давления и величины лучистого потока на время зажигания конденсированного вещества;
- 10) получение зависимостей для предельной энергии зажигания газообразного реагента нагретой инертной частицей и искрой;
- 11) анализ условий, при которых для расчета диффузных свойств горючих газовых смесей необходимо использовать формулы строгой кинетической теории газов или упрощенные зависимости;
- 12) создание математической модели тепломассопереноса при подземной газификации угля.

Научная новизна. Проведено математическое моделирование процессов тепломасоопереноса при зажигании и горении структурно неоднородных сред. В рамках этого направления были впервые получены следующие научные результаты.

1. Разработана математическая модель тепломассопереноса при зажигании и горении торфа. Установлены закономерности распространения горения вдоль торфяного пласта. Сформулированы условия потухания и тепломасоообмена с приземным слоем воздуха, при которых очаг горения перемещается внутрь слоя или к верхней поверхности торфяного пласта.

2. Для решения сформулированных в диссертационной работе задач создан математический аппарата в виде разностных схем, отличающихся от известных ранее тем, что с их помощью можно решать существенно нелинейные уравнения математической физики с переменными коэффициентами.

3. Определены критические условия зажигания торфа (минимальное значение температуры источника и его средний тепловой поток). Впервые установлена возможность прогностического моделирования подземного распространения торфяного пожара и выхода на поверхность на значительном расстоянии от очага возгорания.

4. Создана математическая модель тепломассопереноса при зажигании и горении растительных горючих материалов (РГМ), отличающаяся от известных тем, что впервые учтена структурная неоднородность растительного горючего материала. Установлены закономерности тепломассопереноса при зажигании РГМ локальным структурно неоднородным источником тепла.

5. Выделены пределы распространения очага горения в зависимости от влагосодержания и теплообмена с приземным слоем воздуха. Получены зависимости времени зажигания от мощности источника. Определены критические условия зажигания РГМ локальным источником тепла.

6. Получены аналитические зависимости для времени прогрева, температуры и предела зажигания реагирующего конденсированного вещества, имеющие большое практическое значение, отличающиеся от известных обобщением на широкий класс веществ, материалов и сред.

7. Установлено влияние пористости, массообмена на поверхности, давления внутри пор, внешнего давления и величины излучения на время зажигания конденсированного вещества.

8. Получены аппроксимирующие зависимости для предельной энергии зажигания газообразного реагента, нагретой инертной частицей и искрой. Установлена необходимость решения задач данного класса в сопряженной постановке.

9. Определены условия, при которых для расчета диффузных свойств горючих газовых смесей необходимо использовать формулы строгой кинетической теории газов и упрощенные зависимости.

10.Сформулирована математическая модель тепломассопереноса при подземной газификации угля, впервые проведен анализ процессов, протекающих при ПГУ.

Практическая значимость работы. Разработан единый методологический подход к исследованию тепломассопереноса при зажигании и горении структурно неоднородных сред. Полученные в работе зависимости могут быть использованы при разработке системы мониторинга пожарной опасности (на отдельном предприятии, в лесхозе и т.д.). Математическая модель тепломассопереноса в пористых реагирующих коксующихся средах может быть использована для математического моделирования процессов газификации угля.

Совокупность полученных в диссертационной работе разностных схем для уравнений тепломассопереноса при зажигании нагретыми телами конечных размеров можно использовать при исследовании различных прикладных задач зажигания и горения структурно неоднородных сред.

Положения, выносимые на защиту.

- 1. Математическая модель тепломассопереноса при зажигании и горении торфа.
- 2. Результаты численного анализа закономерностей распространения горения в торфяном пласте.
- 3. Критические условия зажигания торфа (минимальное значение температуры источника зажигания и его средний тепловой поток).
- 4. Математическая модель тепломассопереноса при зажигании и горении растительного горючего материала (РГМ).
- 5. Результаты теоретических исследований критических условий зажигания РГМ. Зависимости времени зажигания от мощности источника, пределы распространения очага горения при разном влагосодержании и теплообмене.
- 6. Аналитические зависимости для времени прогрева, температуры и предела зажигания реагирующих конденсированных веществ.
- 7. Результаты теоретических исследований зависимости времени зажигания от пористости, массообмена на поверхности, давления и величины излучения.
- 8. Зависимости предельной энергии зажигания газообразного реагента нагретой инертной частицей и искрой от определяющих параметров задачи.
- 9. Результаты теоретических исследований по воспламенению и горению много-компонентных газов.
- 10. Новый подход к теоретическому анализу проблемы подземной газификации угля.
- 11. Математическая модель тепломассопереноса при подземной газификации угля.

12. Математический аппарата для решения сформулированных в диссертационной работе задач в виде разностных схем.

Апробация работы. Основные результаты исследований, включенные в диссертационную работу докладывались на: Минской Международной конференции «Тепло- и массоперенос» (Минск, 1972), Всесоюзном симпозиуме по методам аэрофизических исследований (Новосибирск, 1976), Минском Международном форуме «Тепломассообмен - VI / Тепло - и массоперенос при физикохимических превращениях» (Минск, 1980), Международной научной конференции «Сопряженные задачи физической механики и экология» (Томск, 1994), Международной конференции «Лесные пожары: Возникновение, распространение и экологические последствия» (Томск, 1995), Международной конференции «Математическое и физическое моделирование лесных пожаров и их экологических последствий (Томск-Иркутск, 1997), Международной конференции «Сопряженные задачи механики и экологии» (Томск, 1998), IV Минском Международном форуме «Тепломассообмен ММФ – 2000 / Радиационный и комбинированный теплообмен» (Минск, 2000), IV Минском Международном форуме «Тепломассообмен ММФ – 2000 / Тепломассообмен в энергетических устройствах» (Минск, 2000), IV Минском Международном форуме «Тепломассообмен ММ Φ – 2000 / Тепломассообмен в капиллярно-пористых телах» (Минск, 2000), IV Минском Международном форуме «Тепломассообмен ММФ – 2000 / Тепломассообмен в химически реагирующих системах» (Минск, 2000), Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2002), Международной научно-практической конференции «Третьи Окуневские чтения» (СПб, 2002), Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2004), Второй Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы)» (Москва, 2005), Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2006), VI Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 2008), Всероссийском семинаре кафедр вузов по теплофизике и энергетике (Красноярск, 2009), Международной научнопрактической конференции «Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири / Физика и химия торфа, переработки» (Томск, 2009), VII Всероссийской конференции «Горение твердого топлива» (с международным участием) (Новосибирск, 2009), Международном научно-техническом конгрессе и выставке «Энергетика в глобальном мире» (Красноярск, 2010), Пятой Российской национальной конференций по теплообмену (Москва, 2010).

Личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, заключается в непосредственном участии на всех этапах исследования: развитие физических представлений о рассматриваемых процессах, математическое описание задач, разработка методов их решения и анализ результатов.

Публикации. По направлению диссертационной работы автором опубликована 51 работа, из них в автореферате приведены – 32, в том числе 17 работ в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора наук.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, анализа современного состояния исследуемой проблемы, шести глав, основных выводов, списка литературы из 336 наименований. Общий объем 307 страниц, включая 275 страниц текста, который содержит 130 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приводятся цели и общая характеристика работы (новизна, достоверность, практическая значимость), сформулированы основные положения, выносимые на защиту, дана краткая аннотация содержания по главам.

В разделе о современном состоянии проблемы тепломассопереноса при зажигании и горении структурно неоднородных сред представлен анализ современного состояния исследований по теме диссертационной работы. Большой вклад в развитие этого научного направления внесли представители разных научных школ: Н.Н. Семенов, Я.Б. Зельдович, О.М. Тодес, А.Г. Мержанов, А.Э. Аверсон, В.В. Барзыкин, К.Г. Шкадинский, В.Е. Зарко, С.С. Хлевной, В.В. Померанцев, В.Н. Вилюнов, Л.Н. Хитрин, А.Ф. Беляев, F.А. Williams, А.М. Гришин, Э.В. Конев, И.Р. Хасанов, А.И. Сухинин, Н.П. Курбатский, Г.А. Доррер, У.И. Гольдшрегер, J.А. Albini, С.R. Wilke и др. На основе проведенного литературного обзора сделан вывод об актуальности работы и сформулирована цель исследования.

В первой главе диссертации представлена математическая модель тепломассопереноса при зажигании и горении торфа. Выявлены определяющие параметры процесса, исследован механизм зажигания от локального источника тепла, определена минимальная энергия зажигания и проанализированы закономерности распространения очага горения по торфяному пласту в зависимости от определяющих параметров процесса. При нахождении определяющих параметров использовалась математическая модель осредненная по вертикальной переменной z

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_p, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_p - R_{3s}, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_s R_p, \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_5 \phi_5) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_5 \phi_5 u) = R_5 - (\rho_5 \phi_5 v)_w / H, \qquad \sum_{i=1}^5 \phi_i = 1, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_5 \, \varphi_5 \, c_j \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_5 \, \varphi_5 \, u \, c_j \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_5 \, \varphi_5 \, D_j \, \frac{\partial \, c_j}{\partial x} \right) + R_{5j} + R_{5js} - R_{5jw} / H ,$$

$$j = \overline{1, 6}, \qquad \sum_{i=1}^7 c_j = 1, \qquad R_{5jw} = \alpha_1 \varphi_5 (c_j - c_{je}) / c_{P5}, \qquad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{5} \rho_{i} \phi_{i} c_{pi} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{5} \phi_{5} c_{p5} u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - q_{p} R_{p} - q_{25} R_{25} + q_{35} R_{35} + q_{co} R_{co} + q_{H_{2}} R_{H_{2}} + q_{CH_{4}} R_{CH_{4}} - \frac{c_{p5}}{H} R_{5W} - \frac{\overline{\alpha}_{1}}{H} \left(T - T_{e} \right) - \frac{\alpha_{2}}{H} \left(T - T_{s} \right),$$

$$\tag{4}$$

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \qquad p = \frac{\rho_5 RT}{M}, \qquad M = \frac{1}{\sum_{j=1}^7 \frac{c_j}{M_{5j}}}.$$
(5)

Источник зажигания моделировался непроницаемой нагретой инертной пластиной, теплопроводность которой значительно больше теплопроводности слоя торфа, температура источника принималась постоянной по х и краевые условия для системы уравнений (1)–(5) записывались в виде

$$t = 0: \qquad \varphi_{i} = \varphi_{iH}, \quad i = 1, 4, \quad c_{j} = c_{jH}, \quad j = 1, 6, T \Big|_{x > x_{0}} = T_{H}, \quad T \Big|_{x = x_{0}} = T_{0}, \quad \rho_{5} = \rho_{5H}, \quad u = 0;$$
(6)
$$x = x_{0}: \qquad u = 0, \quad \frac{\partial c_{j}}{\partial x} = 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_{0} c_{0} x_{0} \frac{d T_{0}}{d t};$$

$$x = L: \quad c_j = c_{jH}, \quad T = T_H, \quad p = p_H.$$
 (7)

Здесь индексы 0, e, s, H соответствуют величинам, характеризующим источник зажигания, внешнюю среду, конденсированную фазу и начальное состояние торфяного пласта; ϕ_i , (i=1,...,5) – объемные доли торфа, влаги, кокса, золы и газовой фазы соответственно; ρ_i (i=1,...,5) – истинные плотности торфа, влаги, кокса, золы и газовой фазы, кг/м³; ρ_0 , c_0 – плотность и удельная теплоемкость теплового источника, кг/м³, Дж/(кг·К); T_e, T_s – температура приземного слоя воздуха и подстилающей поверхности, K; α_c , α_s , α_g , α_{CO} , α_{CO_2} , α_{H_2} , α_{CH_4} , α_{H_2O} – массовые доли кокса, золы, газовой фазы, оксида углерода, диоксида углерода, водороводяного пара, образующиеся при пиролизе метана И торфа, да, $\alpha_{c} = \nu'_{3}M_{3}/\nu_{1}M_{1}, \ \alpha_{s} = \nu'_{4}M_{4}/\nu_{1}M_{1}, \ \alpha_{g} = \sum_{i=2}^{6}\nu'_{5i}M_{5i}/\nu_{1}M_{1}, \ \alpha_{co} = \nu'_{52}M_{52}/\nu_{1}M_{1},$ $\alpha_{H_2} = \nu_{54}' M_{54} / \nu_1 M_1,$ $\alpha_{CO2} = \nu_{53}' M_{53} / \nu_1 M_1$ $\alpha_{CH_4} = \nu_{55}' M_{55} / \nu_1 M_1,$ $\alpha_{H_{2}O} = v_{56}' M_{56} / v_1 M_1; M_3, M_{51}, M_{52}, M_{53}, M_{54}, M_{55}, M_{56}, M_{57}$ – атомарная масса углерода и молекулярные массы кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, водорода, метана, водяного пара и азота, кг/моль; $v_1, v_2, v_2', v_3', v_4', v_{5i}'$ – стехиометрические коэффициенты; λ – эффективная теплопроводность торфа, $\lambda = \lambda_s + \lambda_R$, $\lambda_s = \sum_{j=1}^{3} \lambda_j \phi_j - 3 \phi \phi$ ективная молекулярная теплопроводности пористой среды, $\lambda_{R} = 16\sigma T^{3}/s$ – лучистая теплопроводность пористой среды, Вт/(м·К); σ- постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²К⁴); *s* – удельная поверхность пор, 1/м; k – коэффициенты проницаемости, $k = k_* \phi_5^3 / (1 - \phi_5)^2$, $k_* -$ эмпирическая константа, м²; φ_5 – пористость (объемная доля газовой фазы), м³/м³; $c_{\rm p5}$, λ_5 – удельная теплоемкость и теплопроводность газовой фазы в порах торфа, R₂₈ массовая скорость испарения влаги, $R_{2S} = \rho_2 \phi_2 s k_{2S} / \sqrt{T} \exp(-E_{2S} / RT)$, кг/(м³с), R_p – массовая скорость разложения торфа $R_p = k_p \rho_1 \phi_1 \exp\left(-E_p/RT\right)$, кг/(м³c); $c_{p5} = \sum_{i=1}^{\prime} c_{p5j} c_j$, $\lambda_5 = \sum_{i=1}^{\prime} \lambda_{5j} c_j$, Дж/(кг·К), Вт/(м·К); R_{3S} – массовая скорость окис-

ления кокса, R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); R_{3S} = $(M_3/M_{51}) \rho_5 \phi_5 c_1 s k_{35} \phi_3 \exp(-E_{53}/RT)$, кг/(м³с); μ – динамическая вязкость, H·c/м²; R₅ – массовая скорость образования газовой фазы вследствие протекающих в торфе реакций пиролиза, испарения воды и окисления кокса, $R_5 = \alpha_g R_p + R_{2S} + \overline{R}_{3S};$ \overline{R}_{3S} – массовая скорость образования газовой фазы при протекании реакции окисления кокса $\overline{R}_{3S} = (M_{53} - M_{51})/M_C \cdot R_{3S}$, кг/(м³c); R_{CO} , R_{CH_4} , R_{H_2} – массовые скорости окисления оксида углерода, метана и водорода, KΓ/(M³c); $R_{CO} = T^{-2.25} k_{CO} (c_1 M / M_{51})^{0.25} (c_2 M / M_{52}) exp(-E_{CO} / RT),$ $R_{CH_{4}} =$ $M_{55}k_{CH_4}(\rho_5 R/M)(c_1 M/M_{51})^{1.5}(c_5 M/M_{55})^{-0.5}exp(-E_{CH_4}/(RT)),$ $R_{H_2} =$ $M_{54}k_{H_2}(\rho_5c_1/M_{51})(\rho_5c_4/M_{54})^{1.5}exp(-E_{H_2}/(RT)); E_{35},k_{35}, E_{25},k_{25}, E_p,k_p, E_{CO},k_{CO},$ E_{H_2} , k_{H_2} , E_{CH_4} , k_{CH_4} – энергия активации и предэкспоненциальный множитель гетерогенных реакций горения кокса, испарения влаги, Дж/моль, м/с и гомогенных реакций разложения торфа, окисления оксида углерода, диоксида углерода, водорода и метана Дж/моль, 1/с; $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7$ – массовые концентрации кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, водорода, метана, водяного пара и азота; q_p , q_{S2} , q_{S3} , q_{CO} , q_{H_2} , q_{CH_4} – тепловые эффекты реакций пиролиза торфа, испарения влаги, окисления кокса, оксида углерода, водорода и метана, Дж/кг; t – время, с; *p* – давление газообразных продуктов в порах, Па; *D_i* – эффективный коэффициент диффузии j-компонента; м²/с $\overline{\alpha}_1$, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, характеризующие теплообмен слоя торфа с внешней средой (приземным слоем воздуха) и подстилающей поверхностью, Вт/(м²К); для пористой среды $\overline{\alpha}_1 = \alpha_1 [1 - k_1 (\rho_5 \phi_5 v)_w], k_1 - эмпирическая константа, (м²·с)/кг; \alpha_1 - коэффициент$ теплоотдачи, характеризующий теплообмен потока газа с непроницаемой стенкой; второе слагаемое в формуле учитывает изменение теплообмена на поверхности торфа вследствие выдува газообразных продуктов через верхнюю пористую границу (верхней границе соответствует индекс w); v_w - скорость фильтрации газообразных продуктов из слоя торфа через верхнюю поверхность, м/с; $R_{5 jw} = \beta_1 (c_j - c_{je})$ – скорость изменения массы j-компоненты на верхней границе, кг/(м²с); $\beta_1 = \alpha_{1m}/c_{P5}$ – коэффициенты массообмена слоя торфа с внешней средой, кг/(м²с); $\alpha_{1m} = \alpha_1 L_m$, $0 \le L_m \le 1$; L_m – эмпирическая константа, аналог эффективного числа Льюиса-Семенова (параметр подобия процессов тепло- и массообмена). перечисленных, уравнениях (3) - (5)введены Кроме В обозначения $\hat{R}_{51} = -(M_{51}/2M_{52})R_{CO}, \quad R_{5S1} = -(M_{51}/M_3)R_{3S}, \quad R_{52} = \alpha_{CO}R_P - R_{CO}, \quad R_{5S2} = 0,$ $R_{553} = (M_{53}/M_3)R_{35}, \quad R_{53} = \alpha_{CO_2}R_P + (M_{53}/M_{52})R_{CO} + (M_{53}/M_{55})R_{CH_4}, \quad R_{554} = 0,$ $R_{54} = \alpha_{H_2} R_P, \quad R_{555} = 0, \quad R_{55} = \alpha_{CH_4} R_P, \quad R_{556} = 0, \quad R_{56} = \alpha_{H_2O} R_P + (M_{56}/M_{54}) R_{H_2}$ $+(M_{56}/M_{55})R_{CH_4}; W=(m_{\rm BJ}/m_{\rm T})\cdot 100\%$ – влагосодержание, $m_{\rm BJ}$ – масса влаги, кг; $m_{\rm T}$ – масса сухого торфа, кг.

В результате решения краевой задачи (1)–(7) было установлено (рис. 1) существование двух режимов горения. Низкотемпературный режим (условно его можно назвать – тление) реализуется при малых α_1 ($\alpha_1 < 7$ Вт/м²К). Температура горения для этого режима изменяется в диапазоне 650÷850 К. При $\alpha_1 > 16$ Вт/(м²К) реализуется высокотемпературный режим горения. Для второго режима температура горения 975÷1150 К.



Рис.1. Зависимость температуры горения от интенсивности теплообмена торфа с приземным слоем воздуха: $1 - \rho_{1H} = 60 \text{ кг/m}^3$, $2 - \rho_{1H} = 360 \text{ кг/m}^3$



Рис.2. Зависимость нормальной скорости горения торфа от теплообмена с приземным слоем воздуха (а) и подстилающей поверхностью (b)

Следует отметить, что большие значения α₁ соответствуют вынужденной конвекции (вдув воздуха в поры) и в реальных условиях, как правило, не реализуется. Штриховые линии на рис.1 показывают предельные условия горения по

α₁. В первом случае (α₁ мало) это связано с недостатком кислорода в порах торфа, во втором (α₁ достаточно большое) – с большим отводом тепла во внешнюю среду. На рис.2 и 3 представлены типичные зависимости нормальной скорости горения от условий теплообмена, удельной поверхности пор и влагосодержания.



Рис.3. Зависимость нормальной скорости горения от удельной поверхности пор (а) и влагосодержания (b) торфа

Т.к. в естественных условия скорость горения торфа не превышает $1,94 \cdot 10^{-5}$ м/с, то по зависимостям Ω (lg s_{*}) и Ω (*W*) можно определить границы изменения параметров, определяющих процесс горения торфа.

Математическое моделирование условий зажигания и горения торфа в одномерной постановке позволило выделить определяющие параметры исследуемого процесса. Сопоставляя результаты численного решения с известными экспериментальными данными, впервые были определены границы изменения определяющих параметров задачи (коэффициента теплообмена и влагосодержания), которые использовались при математическом моделировании рассматриваемого процесса в двумерной постановке

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_p, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2S}, \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_p - R_{3S}, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_s R_p, \qquad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5\varphi_5) + \frac{1}{\overline{r}}\frac{\partial}{\partial \overline{r}}(\overline{r}\,\rho_5\varphi_5u) + \frac{\partial}{\partial \overline{z}}(\rho_5\varphi_5v) = \alpha_g R_p + R_{2S} + R_{3S}, \qquad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_5 \varphi_5 c_j) + \frac{1}{\overline{r}} \frac{\partial}{\partial \overline{r}} (\overline{r} \rho_5 \varphi_5 u c_j) + \frac{\partial}{\partial \overline{z}} (\rho_5 \varphi_5 v c_j) = \frac{1}{\overline{r}} \frac{\partial}{\partial \overline{r}} (\overline{r} \rho_5 \varphi_5 D_j \frac{\partial c_j}{\partial \overline{r}}) + \frac{\partial}{\partial \overline{z}} (\rho_5 \varphi_5 D_j \frac{\partial c_j}{\partial \overline{z}}) + R_{5j} + R_{5js}, \qquad j = 1, \dots, 6,$$
(10)

$$\sum_{i=1}^{5} \rho_{i} \phi_{i} c_{pi} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{5} \phi_{5} c_{P5} \left(u \frac{\partial T}{\partial \bar{r}} + v \frac{\partial T}{\partial \bar{z}} \right) = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{z}} \right) + q_{p} \rho_{1} R_{p} - q_{2S} \rho_{2} R_{2S} + q_{3S} R_{3S} + q_{CO} R_{CO} + q_{H_{2}} R_{H_{2}} + q_{CH_{4}} R_{CH_{4}}, \qquad (11)$$

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \bar{r}}, \qquad v = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial \bar{z}} - \rho_5 g \right), \tag{12}$$

$$p = \frac{\rho_5 RT}{M}, M = \frac{1}{\sum_{j=1}^7 \frac{c_j}{M_{5j}}}, \qquad \sum_{j=1}^7 c_j = 1, \qquad \sum_{i=1}^5 \varphi_i = 1.$$
(13)

Система уравнений (8)–(13) решалась при краевых условиях:

$$t = 0: \qquad \phi_{i} = \phi_{iH}, \quad i = \overline{1,4}, \quad c_{j} = c_{jH}, \quad j = \overline{1,6}, \quad \rho_{5} = \rho_{5H}, \quad T|_{\overline{z}\neq 0} = T_{H}; \\ T|_{\overline{r}\leq r_{0},\overline{z}=0} = T_{0}, \qquad T|_{\overline{r}>r_{0},\overline{z}=0} = T_{H}, \qquad (14)$$

 $\overline{r} = 0$: $\frac{\partial c_j}{\partial \overline{r}} = 0$, $\frac{\partial p}{\partial \overline{r}} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial \overline{r}} = 0$;

$$\overline{r} = L: \qquad c_j = c_{jH}, \qquad T = T_H, \qquad p = p_H; \qquad (15)$$

$$\overline{z} = 0: \qquad \frac{\partial p}{\partial \overline{z}}\Big|_{\overline{r} \le r_0} = \rho_5 g - \frac{\mu}{k} \frac{\phi_{50}}{\phi_5} v_w, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial \overline{z}}\Big|_{\overline{r} \le r_0} = \overline{\alpha}_0 (T - T_0), \quad p\big|_{\overline{r} > r_0} = p_e, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial \overline{z}}\Big|_{r > r_0} = \overline{\alpha}_1 (T - T_e), \quad \rho_5 \phi_5 D_j \frac{\partial c_j}{\partial \overline{z}}\Big|_{r > r_0} = \beta_1 (c_j - c_{je}), \qquad (16)$$

$$\rho_{5}\varphi_{5}D_{j}\frac{\partial c_{j}}{\partial \overline{z}}\Big|_{r\leq r_{0}}=\beta_{0}(c_{j}-c_{j0});$$

 $\overline{z} = H:$ $\frac{\partial p}{\partial \overline{z}} = -\rho_5 g, \quad \frac{\partial c_j}{\partial \overline{z}} = 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial \overline{z}} = \alpha_2 (T - T_s).$

В результате решения краевой задачи (8)–(16) установлены закономерности распространения очага горения в торфяном пласте. В зависимости от условий тепло- и массообмена с приземным слоем воздуха очаг горения распространяется вдоль верхней поверхности торфяного пласта или перемещается вглубь его (рис. 4).

Установлены зависимости скорости распространения очага горения Ω от коэффициента теплоотдачи α_1 и параметра подобия процессов тепло – и массообмена L_m . На рис. 5 представлены типичные зависимости Ω (W = 15%) от этих параметров. Прямая $\Omega = 1,94 \cdot 10^{-5}$ м/с соответствует известному полевому эксперименту с торфом 15% влагосодержания. Для численных расчетов – это «тление» торфа при определенных условиях теплообмена с внешней средой. Точка пересечения экспериментальной прямой с теоретической зависимостью определяет условия теплообмена (рис. 5а) или параметр подобия (рис. 5б).



Рис.4. Изотермы очага «тления» в слое торфа при отсутствии (а) и наличии (b) тепло- и массообмена с приземным слоем воздуха



Рис.5. Влияние на скорость распространения волны горения теплообмена (a): 1 – $L_{\rm m}$ =0,1; 2 – $L_{\rm m}$ =0,2; 3 – $L_{\rm m}$ =0,4; 4 – $L_{\rm m}$ =1 и параметра подобия процессов тепло- и массообмена с приземным слоем воздуха (b): 1– α_1 = 8,1 Вт/(м²·K), 2– α_1 = 2,9 Вт/(м²·K), 3– α_1 = 1,45 Вт/(м²·K)

Из рисунка 5а следует, что при $L_m = 1$ коэффициент теплоотдачи больше 1 Вт/(м²·К) (кривая 1), при $L_m = 0,4 - \alpha_1 = 4,6$ Вт/(м²·К) (кривая 2), при $L_m = 0,2 - \alpha_1 = 30,2$ Вт/(м²·К) (кривая 3) и, наконец, при $L_m = 0,1$ коэффициент α_1 значительно больше 40 Вт/(м²·К) (кривая 4). Из рисунка 5b видно, что в случае аналогии между процессами теплообмена и массообмена величина L_m близка к единице, коэффициент теплоотдачи примерно равен 1,4 Вт/(м²·К). В третьем параграфе первой главы представлено решение, в котором определена минимальная энергия зажигания торфа локальным цилиндрическим источником тепла, расположенном на границе раздела «торф–атмосфера», в зависимости от условий, в которых находится торфяной пласт и источник тепла.

Система уравнений (8)–(13) в этом случае решалась при краевых условиях:

$$t = 0: \quad \varphi_{i} = \varphi_{iH}, \quad i = 1,4, \quad c_{j} = c_{jH}, \quad j = 1,6, \quad \rho_{5} = \rho_{5H}, \\ T \big|_{\overline{r} \leq r_{0}, \overline{z} = 0} = T_{0}, \qquad T \big|_{\overline{r} > r_{0}, \overline{z} = 0} = T_{H}, \qquad T \big|_{\overline{z} \neq 0} = T_{H}; \quad (17)$$

$$\overline{r} = 0: \quad \frac{\partial c_{j}}{\partial \overline{r}} = 0, \qquad \frac{\partial p}{\partial \overline{r}} = 0, \qquad \frac{\partial T}{\partial \overline{r}} = 0; \\ \overline{r} = L: \quad c_{j} = c_{jH}, \qquad T = T_{H}, \qquad p = p_{H}; \quad (18)$$

$$\overline{z} = 0: \quad p \big|_{\overline{r} > r_{0}} = p_{e}, \quad \frac{\partial p}{\partial \overline{z}} \Big|_{\overline{r} \leq r_{0}} = 0, \quad V_{0} c_{0} \rho_{0} \frac{dT_{0}}{dt} = S_{0} \lambda \frac{\partial T}{\partial \overline{z}} \Big|_{\overline{r} \leq r_{0}} - S_{e} q_{e}, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial \overline{z}} \Big|_{r > r_{0}} = \overline{\alpha}_{1} (T - T_{e}), \quad \rho_{5} \varphi_{5} D_{j} \frac{\partial c_{j}}{\partial \overline{z}} \Big|_{r > r_{0}} = \beta_{1} (c_{j} - c_{je}), \quad \rho_{5} \varphi_{5} D_{j} \frac{\partial c_{j}}{\partial \overline{z}} \Big|_{r \leq r_{0}} = 0; \\ \overline{z} = H: \quad \frac{\partial p}{\partial \overline{z}} = -\rho_{5}g, \qquad \frac{\partial c_{j}}{\partial \overline{z}} = 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial \overline{z}} = \alpha_{2} (T - T_{s}). \quad (19)$$

Здесь V_0 – объем источника зажигания, $V_0 = \pi r_0^2 h$, м³, S_0 – площадь основания источника тепла, $S_0 = \pi r_0^2$, м²; S_e – поверхность, через которую уносится тепло в приземный слой воздуха, сумма площадей верхнего основания и боковой поверхности, $S_e = \pi r_0^2 + 2\pi r_0 h$, м²; h и L – высота и радиус исследуемого торфяного пласта, м; u и v – компоненты скорости фильтрации газообразных продуктов в направлении цилиндрических осей координат \bar{r} и \bar{z} , м/с; T_s , T_e , T_0 – температуры подстилающей поверхности, окружающей источника воздушной среды, источника зажигания, К; q_e – тепловой поток от источника зажигания в окружающую воздушную среду, Вт/м², $q_e = \alpha_0 (T_0 - T_e) + \varepsilon_0 \sigma (T_0^4 - T_e^4)$; α_0 – коэффициент теплоотдачи, характеризующий конвективный теплообмен источника зажигания с внешней средой, Вт/(м²·K); $\varepsilon_0 \sigma T_0^4$, $\varepsilon_0 \sigma T_e^4$ – лучистый теплообмен источника; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·K⁴). Остальные совпадают с обозначениями, введенными в начале главы.

Решена задача тепломассопереноса, когда внешняя поверхность источника тепла покрыта тепловой изоляцией, т.е. тепловые потери во внешнюю среду отсутствуют ($\varepsilon_0 = 0$, $\alpha_0 = 0$). В данном случае остывание источника зажигания происходит лишь за счет теплоотдачи через нижнее основание в слой торфа теплопроводностью и излучением, а энергия зажигания источника является минимальной.

На рис. 6 приведено время прогрева торфа с 15% влагосодержанием для различных значений начальной температуры и среднего теплового потока источника. Здесь и ниже под средним тепловым потоком понимается минимальный

средний тепловой поток, при котором источник тепла способен зажечь торф. Следует отметить, что для данных условий при температуре T_0 меньше 605 К зажигание торфа не происходит. Время прогрева очень сильно зависит от начальной температуры источника. При увеличении температуры источника тепла на 145 градусов – с 605 К до 750 К время прогрева уменьшается более чем в 5 раз – с 3720 до 720 с. При решении задачи за время прогрева принимался момент времени τ_p , в который менялся знак теплового потока от источника в слой торфа.



Рис. 6. Зависимость времени прогрева торфа от начальной температуры (а) и среднего теплового потока (b) теплоизолированного от внешней среды источника зажигания



Рис. 7. Зависимость начальной температуры (а) и среднего теплового потока (b) источника тепла от влагосодержания торфа при зажигании: $\alpha_0 = 4,2$ Вт/(м²·K), $\varepsilon_0 = 0,1$

Анализ условий зажигания влажного торфа источником тепла конечных размеров (рис. 7), который, кроме теплоотдачи в торф, теряет энергию вследствие излучения и конвективного теплообмена с приземным слоем воздуха, показал, что торф, влагосодержание которого более 45%, не зажигается. На рисунке кроме зависимости температуры приведена зависимость среднего теплового потока от влагосодержания.

Минимальная энергия источника зажигания сильно зависит от его тепловых потерь во внешнюю среду. На рис.8. показано влияние степени черноты ε_0 и конвективного теплообмена источника тепла с окружающей его воздушной средой на средний тепловой поток.



Рис.8. Зависимость среднего теплового потока источника зажигания от его конвективного а) и радиационного б) теплообмена с окружающей воздушной средой при $\alpha = 14,5$ Bt/(m²·K), W = 15%, $\varphi_{1H} = 0,043$; a) $\varepsilon_0 = 0,1$, б) $\alpha_0 = 4,2$ Bt/(m²·K).

Из рис. 8 видно, что существует довольно сильная зависимость среднего теплового потока q_c от ε_0 и α_0 . В частности, при изменении ε_0 от 0 до 0,9 средний тепловой поток источника возрастает при прочих одинаковых условиях более чем в тридцать раз.

Во второй главе изложена математическая модель тепломассопереноса при возникновении и распространении очага горения в слое растительного горючего материала (РГМ). Численные исследования проводились с использованием математической модели (1)–(7), за исключением уравнения движения, в котором использовался квадратичный закон фильтрации, уравнения сохранения энергии, в которое вошли слагаемые, учитывающие теплообмен излучением между факелом пламени и слоем РГМ – $(1 - \varphi_5)(\varphi_f \varepsilon_f \sigma T_f^4 - \varepsilon_w \sigma T^4)/H$. Здесь φ_f – угловой коэффициент, который определяет долю лучистого теплового потока факела, попадающего в точку слоя опада с координатой \overline{x} , $\overline{x} = x - x_f$ – расстояние от основания факела пламени до нагреваемой точки поверхности опада; $\varphi_f(\bar{x}) = 0.5 \left(1 + (L_f \cos \gamma - \bar{x})/\sqrt{\bar{x}^2 - 2\bar{x}L_f \cos \gamma + L_f^2}\right), L_f - длина факела пламени, м; <math>\varepsilon_f$ – излучательная способность факела, $\varepsilon_f = \varepsilon_0 \left[1 - exp(-A_f \Delta_f)\right], \varepsilon_0$ и A_f – эмпирические константы, значения которых для ряда углеводородных топлив известны, 1/M; Δ_f – толщина факела пламени, м; $L_f = B\sqrt{m_3 u_g}$, В – эмпирическая константа, m_3 – запас горючей массы, кг/м², u_g – скорость горения, м/с; γ – угол между факелом пламени и горизонтальной плоскостью, рад; $tg\gamma = \left(g\Delta/(4u_e^2)\right)^{0.25}$, g – ускорение свободного падения, м/с², Δ – ширина факела пламени, м, u_e – скорость ветра в приземном слое воздуха. Вертикальная составляющая скорости потока на верхней границе слоя РГМ определялась из эмпирической зависимости $v = 1.1\sqrt{g \varphi_5(\rho_e - \rho)H/\rho_e} \times exp\left(-11.5(x - x_0)^2/H^2\right)$, где x_0 – координата максимума температуры, м; ρ_e – плотность газовой фазы в приземном слое воздуха, кг/м³, H – высота слоя горючего материала, м, ρ – плотность газа в слое РГМ.

Выделены определяющие параметры процесса, найдены критические условия зажигания РГМ при низовых пожарах, распространяющихся по подстилке или слою опада хвои. На рис.9а приведены зависимости нормальной скорости горения от влагосодержания при разных условиях теплообмена горючего материала с внешней средой (кривая 1 α_0 =3,5 Вт/м²К, 2 – 5,5 Вт/м²К, 3 – 7,5 Вт/м²К, 4 – 9,5 Вт/м²К, 5 – 11,5 Вт/м²К) и коэффициента теплоотдачи (рис. 96) при разном влагосодержании хвои (кривая 1 – W = 0%, 2 – W = 4%, 3 – W = 8%, 4 – W = 12%). Анализируя рис. 9, можно сделать вывод, что существует минимальная предельная скорость горения очага горения. Из рисунков следует, что нормальная скорость горения опада хвои сосны не может быть меньше 0,55·10⁻³ м/с и горение не распространяется по хвое, влагосодержание которой выше 16%.



Рис.9. Зависимости скорости горения от влагосодержания и условий теплообмена с внешней средой

Результаты исследований по зажиганию опада хвои обугленной веточкой представлены на рис.10, из которого следует, что при попадании из зоны лесного пожара горячей обугленной веточки в слой опада хвои, влагосодержание которого не превышает 11%, может возникнуть новый очаг низового пожара. Диаметр веточки, способной инициировать очаг горения, в зависимости от влагосодержания и условий тепломассообмена слоя горючего материала с внешней средой должен быть равен (0,0045 – 0,0108) м.



Рис.10. Минимальный радиус обугленной веточки, способной инициировать очаг низового пожара, при разном влагосодержании а) и условиях теплообмена б). Кривые 1 – с учетом, 2 – без учета внутренней структуры очага зажигания.

В третьей главе приведены результаты исследований тепломассопереноса при зажигании конденсированных веществ нагретыми инертными телами; проволочкой, нагреваемой импульсом тока, на поверхности которой может протекать гетерогенная экзотермическая реакция, и сделана оценка влияния пористости на процессы зажигания.

В первом параграфе приведено исследование зажигания нагретым инертным телом простой формы конденсированного реагирующего вещества. При отсутствии выгорания реагента получено аналитическое решение, используя которое, найдена аналитическая зависимость для минимального размера нагретого тела, способного зажечь конденсированное реагирующее вещество.

$$x_{0*} = 0.82 \pi_{c\rho} (n+1) \theta_{H}^{2} \left\{ 1 - \frac{1}{\theta_{H}} \left[4 - \frac{5n}{3\pi_{c\rho} (n+1)} \right] \right\}$$
(20)

Здесь $x_{0*} = r_{0*}/r_*$ – безразмерный радиус сферической частицы (*n*=2), радиус цилиндра (*n*=1), толщина пластины (*n*=0), r_* – масштаб длины,

$$r_* = \sqrt{\frac{\lambda R T_*^2}{q k_0 \rho E c_H^{\vee}}} \exp{\frac{E}{RT_*}}$$
, м; $\theta_H = \frac{(T_* - T_H)E}{RT_*^2}$ – безразмерная начальная темпера-

тура реагента; k_0 – предэкспоненциальный множитель; v – порядок реакции; λ , c, ρ – коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность реагента, Bт/(м·K), Дж/(кг·K), кг/м³; R – универсальная газовая постоянная Дж/(моль·K); E – энергия активации, Дж/моль; c_H – начальная массовая концентрация реагента; q– тепловой эффект реакции, Дж/кг, $T_* = T_{0H}$ – характерная температура, K; T_{0H} – начальная температура источника зажигания, K; $\pi_{c\rho} = c \rho/c_0\rho_0$ – безразмерная объемная теплоемкость реагента; c_0 , ρ_0 , r_0 – теплоемкость, плотность и характерный размер нагретого тела, Дж/(кг·K), кг/м³, м;

Во втором параграфе приведено решение задачи зажигания конденсированного реагента нагретым телом простой формы с учетом гетерогенной реакции на поверхности источника зажигания, выгорания и распределения температуры по телу. После проведения численных расчетов уточнена зависимость (20), в результате получена зависимость для определения критического размера нагретого тела, способного воспламенить высокоэнергетическое вещество, вида

$$x_{o*} = b_1 \pi_{c\rho} (n+1) \theta_{\mu}^2 \left[1 + \theta_{\mu}^{-1} \left(\frac{5n}{3\pi_{c\rho} (n+1)} - 4 \right) \right] (1 + b_2 \beta \theta_{\mu}) \times (1 + b_3 \gamma \theta_{\mu}) (1 + 4\pi_{\lambda}) , \qquad (21)$$

где $\pi_{\lambda} = \lambda/\lambda_0$ отношение теплопроводностей реагента и нагретого тела, константы $b_1 = 0.5$, $b_2 = 0.41$, $b_3 = 0.44$, $\gamma = c RT_*^2/(q E c_H^{\nu})$, $\beta = RT_*/E$ – безразмерные параметры. В диапазоне изменения параметров $5 \le \theta_{\mu} \le 30$, $0.1 \le \pi_{c\rho} \le 1$, $\beta \le 0.05$, $0 \le \gamma \le 0.012$, $\pi_{\lambda} \le 0.1$ погрешность зависимости (21) для x_{o*} , как и в предыдущей, не превышает 10% для n=2 и составляет не более 20% для остальных значений n(n = 0, 1).

В третьем параграфе решена аналитически задача теплообмена конденсированного реагента с проволочкой, через которую пропущен импульсный разряд. При аналитическом решении были сделаны предположения: до момента зажигания выгорание незначительно, сопротивление проволочки постоянно, распределение температуры в проволочке отсутствует. Тогда уравнения, описывающие тепловую и электрическую части, можно решать раздельно. В результате получена аналитическая зависимость для минимального напряжения конденсаторной батареи, при разрядке которой произойдет зажигание конденсированного реагирующего вещества

$$V_{H\min} = \sqrt{(3\theta_H - 2x_{0*}^2)(\pi_{c\rho} + 1)\theta_H^2/(4\pi_{c\rho}(\theta_H - 1)\cdot\overline{Q_j}\cdot\overline{\Delta})}.$$
 (22)

Здесь *j*=1 при $S_H < 2$, *j*=2 при $S_H = 2$, *j*=3 при $S_H > 2$,

$$\begin{split} \overline{Q}_{1} &= \frac{R_{n}}{2\,\overline{g}\,S_{H}} \Bigg[1 - \Bigg(1 + \frac{2}{r_{1}} \sin^{2}\frac{g\,S_{H}\,\sqrt{r_{1}}}{2} \tau_{p} + \frac{1}{\sqrt{r_{1}}} \sin g\,S_{H}\,\sqrt{r_{1}}\,\tau_{p} \Bigg) e^{-g\,S_{H}\,\tau_{p}} \Bigg], \\ \overline{Q}_{2} &= \frac{R_{n}}{4\,\overline{g}} \Big[1 - \Big(1 + 2\,g\,\tau_{p} + 2\,g^{2}\,\tau_{p}^{2} \Big) e^{-2g\,\tau_{p}} \Big], \\ \overline{Q}_{3} &= \frac{R_{n}}{2\,\overline{g}\,S_{H}} \Bigg[1 - \Bigg(1 + \frac{2}{r_{2}}\,sh^{2}\frac{g\,S_{H}\,\sqrt{r_{2}}}{2}\,\tau_{p} + \frac{1}{\sqrt{r_{2}}}\,sh\,g\,S_{H}\,\sqrt{r_{2}}\,\tau_{p} \Bigg) e^{-g\,S_{H}\,\tau_{p}} \Bigg], \end{split}$$

S_H, \overline{g} – безразмерные параметры, $S_H = R_H (C_H / L_H)^{0.5}$, R_H , L_H – начальные сопротивление и индуктивность электрической цепи, Ом, Гн/м; C_H – емкость конденсаторной батареи, Φ ; $\overline{g} = t_* / t_{_{37}}$, t_* – характерное химическое время, $t_* = \frac{c R T_*^2}{q k_0 E c_H^{\,v}} \exp \frac{E}{RT_*}$, $t_{_{37}} = (L_H C_H)^{0.5}$ – характерное время разрядной цепи, с; $\tau_p = t_p / t_*$ – безразмерное время прогрева, $\tau_p = 2\delta (\pi_{cp} + 1) / \pi_{cp} (3 - 2\delta e^{-\theta_H})$; $\delta = x_0^2$, $x_0 = r_0 / r_*$, r_0 – радиус проволочки, м; $R_n = R_{H.np} / R_H$ – безразмерное начальное сопротивление проволочки, $R_{H.np} = \overline{\rho}_0 L_0 / \pi r_0^2$ – начальное сопротивление проволочки, $R_{H.np} = \overline{\rho}_0 L_0 / \pi r_0^2$ – начальное сопротивление проволочки, м; $\overline{\Delta} = C_H R_H E / (2 \pi L_H \lambda R T_*^2 L_0)$, $1/B^2$. Остальные обозначения те же, что и введенные выше.

Численные расчеты позволили уточнить приближенную зависимость (22) для критического напряжения конденсатора

$$V_{H\min} = \sqrt{(3\theta_H - 2x_{0*}^2)(\pi_{c\rho} + 1)\theta_H^2 / (4\pi_{c\rho}(\theta_H - 1) \cdot \overline{Q_j} \cdot \overline{\Delta})} \times (1 - B_2^{0.25} / 6)(0.65 + 2.6\gamma\theta_H)(0.5 + \beta\theta_H)(1 + bS_H / \theta_H^2).$$
(23)

Здесь $b = ART_*^2/E$ – безразмерный параметр, учитывающий изменение сопротивления проволочки с изменением ее температуры; A – температурный коэффициент сопротивления проволочки, 1/К; B_2 – безразмерный параметр, учитывающий гетерогенную реакцию на поверхности проволочки; $B_2 = q_s k_{0s} c_H^{v_1-v} \exp(-(E_s - E)/RT_*)/(qk_0)$.

В пятом параграфе третьей главы проведен анализ влияния газообразования, пористости, давления и величины лучистого потока на время зажигания высокоэнергетического твердого топлива.

Установлено, что определяющими параметрами, влияющими на время зажигания, являются – лучистый тепловой поток, массообмен пористого реагента с внешней средой (рис.11), а также давление внутри и вне пористого реагента (рис.12).



Рис.11. Зависимость времени зажигания от мощности излучения при разных условий массообмена с внешней средой: $1 - \pi_g = 0$, $2 - \pi_g = 5.8 \cdot 10^{-6}$, $3 - \pi_g = 1.3 \cdot 10^{-4}$, $4 - \pi_g = 5.8 \cdot 10^{-3}$



Рис.12. Зависимость времени зажигания от мощности излучения при разных значениях внешнего и внутреннего давления: 1 – $P_H = P_e = 2 \cdot 10^7 \text{ Па}, 2 - P_H = P_e = 10^6 \text{ Па}, 3 - P_H = 10^6 \text{ Па}, P_e = 1,5 \cdot 10^7 \text{ Па}$

Здесь $\pi_g = \alpha_m P_* L_* c_{p1} / \lambda_1$ – безразмерный параметр, c_{p1} , λ_1 – удельная теплоемкость и теплопроводность твердого реагента, L_* , P_* – характерные величины (размер и давление), м, Па; α_m – параметр массообмена, с/м.

В четвертой главе приведены результаты исследований тепломассопереноса при зажигании газообразного реагента нагретой частицей и искрой. Получены зависимости для минимальной энергии зажигания искрой и нагретой частицей, сделана оценка влияния диффузии в многокомпонентной горючей смеси на процессы зажигания и горения.

В результате численных расчетов было показано, что имеют место низкотемпературный (индукционный, нормальный) и высокотемпературный (вырожденный) режимы зажигания газообразного реагента частицей. Первый режим реализуется при $T_{0H} < T_g$, а второй – $T_{0H} \ge T_g$, где T_g – адиабатическая температура горения, T_{0H} – начальная температура частицы, К. Для низкотемпературного режима зажигания газообразных реагирующих веществ нагретыми сферическими частицами по результатам численных расчетов получена приближенная зависимость для предела зажигания

$$x_{0*} = 0.333 \cdot \pi_{co}^{0.125} \,\theta_{H}^{1.8}, \tag{24}$$

погрешность которой при $5 \le \theta_H \le 30$, $0.001 \ge \pi_{cp} \ge 0.0001$ не превосходит 20%. Здесь $\theta_H = (T_* - T_H)E/(RT_*^2)$ – безразмерный параметр, $T_* = T_{0H}$ – характерная температура, К; T_{0H} – начальная температура источника зажигания, К; T_H – начальная температура реагента, К; E – энергия активации, Дж/моль; $\pi_{cp} = c \rho/(c_0 \rho_0)$ – безразмерная объемная теплоемкость реагента; c_0, ρ_0, r_0 – теплоемкость, плотность и характерный размер нагретого тела, Дж/(кг-К), кг/м³, м; $x_{0*} = r_0/r_*$ – безразмерный радиус сферической частицы, r_* – масштаб длины, м. Другие параметры не входят в зависимость (24), т.к. в количественном отношении их влияние на величину предела зажигания x_{0*} меньше, чем погрешность, с которой она получена.

Во втором параграфе приведено решение задачи об искровом зажигании реагирующего газа. Определена минимальная энергия искры, способной зажечь реагирующий газ, в зависимости от определяющих параметров задачи. По результатам численных расчетов получена интерполяционная зависимость для безразмерной минимальной энергии искры Q_*

$$Q_* = 890.54 \frac{\nu^{2.725} \left(1 - k\right)^{1.3} e^{\theta_H}}{L^{3.9} \theta_H^{0.5}},$$
(25)

погрешность которой при $4 \le \theta_H \le 8$, $0.8 \le L \le 1.2$, $0.1 \le k \le 0.2$, $1 \le v \le 2$ не превышает 20%. Здесь $k = T_H / T_g$ – безразмерный параметр, v – порядок реакции, $L = \rho c_p D / \lambda$ – число Льюиса, T_g – адиабатическая температура горения, К.

В четвертом параграфе этой главы представлены результаты исследований по влиянию диффузии в многокомпонентной смеси на процессы зажигания и горения. Рассмотрено зажигание и горение оксида углерода в кислороде и во влажном воздухе и изооктано-воздушной смеси (трех- и пятикомпонентная газовая смесь). Для расчета коэффициентов переноса использовались зависимости, полученные в кинетической теории газов.

Рассмотрен случай, когда компоненты можно было объединить в две группы по молекулярным массам так, что в каждой из групп молекулярные массы компонентов различались незначительно. С этой целью решена задача зажигания оксида углерода в воздухе нагретой пластиной. Установлено, что процессы горения такой горючей смеси можно рассчитывать в упрошенной постановке с погрешностью, не превышающей 15%. Показано на примере изооктано-воздушной смеси, что при математическом моделировании зажигания и горения горючих смесей с сильно различающимися молекулярными массами и диффузными свойствами, погрешность в определении характеристик воспламенения может достигать в отдельных случаях величины превышающей 100%. Сделан вывод о необходимости расчета коэффициентов переноса с использованием соотношений, полученных в кинетической теории газов, если ставится задача получения решения с высокой точностью.

В пятой главе представлены результаты исследований по разработке математической модели процессов тепломассопереноса при подземной газификации угля. Рассмотрен угольный пласт глубиной H, в котором пробурена скважина и введена двойная труба. По внутренней трубе к нижнему основанию угольного пласта (z<h) подается подогретый до температуры T_0 сухой или влажный воздух. По истечении некоторого времени угольный пласт прогревается до температуры начала пиролиза. Через отверстия на боковой поверхности наружной трубы (z > h) образовавшиеся газы проникают в наружную трубу и выводятся из угольного пласта на поверхность (рис. 13).



Рис.13. Схема подачи воздуха и отвода образующегося газа при ПГУ

В предлагаемой постановке принималось, что рассматриваемый процесс газификации сопровождается реакциями:

$$\nu_2 M_2 \rightarrow \nu'_2 M'_2,$$

$$\nu_1 M_1 \to \nu'_3 M_3 + \nu'_4 M_4 + \sum_{i=2}^{6} \nu'_{5\alpha} M_{5\alpha},$$
 (26)

 $C + O_2 = CO_2 + 395$ КДж/моль, 2 $C + CO_2 = 2CO - 175,5$ КДж/моль, C $2CO + O_2 = 2CO_2 + 571$ КДж/моль, 2 $CH_4 + O_2 = CO + H_2 + H_2O + 491$ КДж/моль.

 $2C + O_2 = 2CO + 219$ КДж/моль, $C + H_2O = CO + H_2 - 130,5$ КДж/моль, $2H_2 + O_2 = 2H_2O + 231$ КДж/моль,

Первое выражение (26) описывает процесс испарения воды, второе – процесс пиролиза твердого топлива. Твердое топливо (уголь) разлагается на конденсированные $v'_3 M_3$ (кокс), $v'_4 M_4$ (шлак) и газообразные $v'_{5\alpha} M_{5\alpha}$ продукты пиролиза.

При математическом моделировании ПГУ принимается, что в угольном пласте отсутствуют неоднородности, а условия тепло – и массообмена вдоль верхней и нижней поверхности пласта не изменяются. Задача решена в цилиндрической системе координат. Система координат выбиралась так, как показано на рис.13. С учетом процессов испарения влаги, разложения угля (26), гетерогенных и гомогенных реакций система уравнений, моделирующая процесс ПГУ, будет иметь вид (8)–(13). Исключение составляют уравнения (10), (11), в которых присутствуют члены, учитывающие добавленные реакции. Система уравнений (8)–(13) решалась при краевых условиях

$$t = 0: \qquad \varphi_{j} = \varphi_{jH}, \ j = 1,4, \ c_{\alpha} = c_{\alpha H}, \ \alpha = 1,6, \ \rho_{5} = \rho_{5H}, \ T|_{z \le h} = T_{0}, T|_{z > h} = T_{H}, \ T|_{r > R_{0}} = T_{H}; \qquad (27)$$
$$r = R_{0}, \ z > h: \qquad \frac{\partial^{2} c_{\alpha}}{\partial r^{2}} = 0, \ \frac{\partial^{2} p}{\partial r^{2}} = 0, \ \frac{\partial^{2} T}{\partial r^{2}} = 0; r = R_{0}, \ z \le h: \qquad c_{\alpha} = c_{\alpha 0}, \qquad \lambda_{s} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{0} (T - T_{0}), \qquad p = p_{0}; r = L: \qquad c_{\alpha} = c_{\alpha H}, \qquad T = T_{H}, \qquad p = p_{H}; \qquad (28)$$
$$z = 0: \qquad \frac{\partial p}{\partial z} = \rho_{5}g, \qquad \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial z} = 0; \qquad \lambda_{s} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{1} (T - T_{1}) z = H: \qquad \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_{5}g, \qquad \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial z} = 0, \qquad \lambda_{s} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{2} (T - T_{2}). \qquad (29)$$

На рис.14 приведены типичные результаты численных исследований при перепаде давления в зоне зажигания равном $\Delta P = P_0 - P_H = 10^3$ Па, влагосодержании угольного пласта W = 5%. Параметры вдуваемой в угольный пласт паровоздушной смеси: температура $T_0 = 800$ К, концентрация кислорода $c_{10} = 0,1$, концентрация водяного пара $c_{70} = 0,1$.

Типичные поля температуры и объемной доли кокса при подаче паровоздушной смеси к нижнему основанию угольного пласта показаны на рис. 14. Здесь в области 1 рис. 14б остался шлак, процесс окисления кокса полностью завершился; 2 – кокс; 3 – уголь (реакция разложения еще не идет); 4 – область окисления кокса, на правой границе которой начинается окисление, на левой границе окисление кокса полностью завершилось; 5 – область пиролиза угля, на правой границе которой начинается пиролиз угля, на левой границе процесс разложения угля полностью завершился.

Анализируя векторное поле скорости фильтрации (рис.15) и рис.14б можно сделать вывод, что газообразные продукты, находящиеся у нижнего основания угольного пласта, движутся по направлению r, а остальные, перемещаясь по частично или полностью прококсованной области, разворачиваются вдоль границы пиролиза, попадают во внешнюю трубу и выводятся наружу.



Рис.14. Распределение температуры (а) и объемной доли кокса (b) в угольном пласте (t=14 156 c)



Рис. 15. Векторное поле скорости фильтрации газообразных компонентов в угольном пласте при подземной газификации

На рис.16 приведены профили массовой концентрации оксида углерода при подаче паровоздушной смеси с разной массовой концентрацией кислорода (рис. 16а, c_{10} =0,1; рис. 16б, c_{10} =0,15). Таким образом, увеличение на 50% концентрации кислорода привело к увеличению на 50% концентрации горючего газа – оксида углерода в продуктах газификации. Были проведены расчеты с увеличенным в два раза перепадом давления в зоне зажигания, которые показали, что в результате этого на выходе увеличивается концентрация горючего газа на 23%.



Рис.16. Распределение массовой концентрации оксида углерода в угольном пласте при ПГУ

Разработана математическая модель процессов тепломассопереноса и физико-химических превращений при подземной газификации углей с использованием уравнений математической физики; предложен новый подход к анализу процессов подземной газификации углей на базе математического моделирования тепломассопереноса и физико-химических превращений, протекающих при локальном нагреве угольных пластов и подводе окислителя; впервые численно решена задача тепломассопереноса при подземной газификации угля в рамках плоской нестационарной нелинейной постановки с учетом всех основных процессов, протекающих в условиях ПГУ.

В шестой главе представлен разработанный для решения задач диссертации математический аппарата в виде разностных схем. Данные схемы являются оригинальными, получены с использованием итерационно-интерполяционного метода.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель тепломассопереноса при зажигании и горении торфа. Полученные в результате численного анализа теоретические следствия позволяют определить значения влагосодержания и параметров тепломассообмена, при которых возможно горение торфа.

2. Для решения сформулированных в диссертационной работе задач создан математический аппарата в виде разностных схем, отличающихся от известных ранее тем, что с их помощью можно решать уравнения гиперболического и параболического типа с переменными коэффициентами и существенно нелинейными источниками.

3. Установлены основные закономерности распространения очага горения вдоль торфяного пласта в зависимости от условий тепломасоообмена с подстилающей поверхностью и приземным слоем воздуха.

4. Определены критические условия зажигания торфа – найдены минимальная температура источника и средний тепловой поток от источника, при которых возможно зажигание.

5. Разработана математическая модель тепломассопереноса при зажигании и горении растительных горючих материалов (РГМ) при низовом пожаре, отличающаяся от известных тем, что впервые учтена структурная неоднородность растительного горючего материала.

6. Получены критические условия зажигания РГМ обугленной веточкой и зависимость времени зажигания от мощности источника. Установлены пределы распространения по влагосодержанию и теплообмену (коэффициенту теплоотдачи).

7. Проведен аналитический и численный анализ зажигания конденсированного реагирующего вещества нагретым телом простой формы (пластина, цилиндр, шар) и нагретой импульсным током проволочкой. Получены имеющие большое практическое значение приближенные аналитические зависимости для времени прогрева, температуры воспламенения и предела зажигания (минимальной энергии нагретого тела, способного воспламенить конденсированное вещество).

8. Проведен анализ влияния пористости, массообмена на поверхности, давления внутри пор, внешнего давления и величины лучистого потока на время зажигания структурно неоднородного конденсированного вещества.

9. Установлены зависимости для минимальной энергии зажигания нагретой сферической частицей и искрой. Показано, что при зажигании газа нагретой частицей число Нуссельта сильно зависит от кинетики тепловыделения и является заранее неизвестной функцией времени и может быть даже отрицательным. Процесс теплообмена между твердым телом и газообразным горючим в данных условиях нельзя считать квазистационарным, т.к. тепловой поток меняет знак. Сделан вывод о нецелесообразности использования понятия коэффициента теплоотдачи для задач данного класса.

10. По результатам выполненных численных исследований установлено влияние многокомпонентной диффузии на нестационарную скорость горения и время выхода на режим нормального горения. Определены условия моделирования стационарного горения, использования упрощенных зависимостей для вычисления коэффициентов диффузии и условия необходимого расчета диффузных свойств горючей газовой смеси по формулам кинетической теории газов.

11. Сформулирована не имеющая аналогов математическая модель, описывающая процессы тепломассопереноса при подземной газификации угля. Результаты проведенного теоретического анализа дают основание утверждать, что, задавая температуру и состав паровоздушной смеси, подаваемой в угольный пласт, можно регулировать состав газов, поля температуры, давления и скорости фильтрации газообразных продуктов в области газификации угольного пласта. Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

- Гришин А.М., Субботин А.Н. О сопряженном теплообмене между нагретыми инертными телами и реакционноспособной средой // Тепло- и массоперенос: Труды Минской международной конференции. – Минск : Изд-во ИТМО АН БССР, 1972. – Т. 2, ч. 2. – С. 286–294.
- 2. Гришин А.М., Субботин А.Н. Выход на режим нормального горения в многокомпонентной горючей смеси // Физика горения и взрыва. – 1974. – № 6. – С. 826–835.
- 3. Субботин А.Н. Теоретическое исследование зажигания конденсированных реагирующих веществ проволочкой, нагреваемой электрическим током / Тепло- и массообмен в инертных и реагирующих средах. Томск : Изд-во ТГУ, 1977. С. 116–126.
- 4. Субботин А.Н. Математическое моделирование распространения фронта пожара на торфяниках / Механика реагирующих сред и ее приложения. Сборник статей. – Новосибирск : Наука, 1989. – С. 57–63.
- Субботин А.Н. Влияние диффузии на воспламенение и горение многокомпонентной горючей смеси / Физическое и математическое моделирование тепловых и гидродинамических процессов. Межвузовский научный сборник. – Томск : Изд-во ТПИ, 1990. – С. 79–85.
- Субботин А.Н. Влияние тепломассообмена на критические условия зажигания и горения торфяника // Сибирский физико-технический журнал. – 1992. – № 6. – С. 133–137.
- 7. Звягильская А.И., Субботин А.Н. Влияние влагосодержания и тепло- и массообмена с окружающей средой на критические условия возникновения очага низового пожара // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 5. – С. 99–106.
- Субботин А.Н., Евсеев С.В. О заглублении очага пожара на торфянике / Математическое и физическое моделирование лесных пожаров и их экологических последствий. Материалы международной конференции. – Томск – Иркутск : Изд-во ТГУ, 1997. – С. 79–83.
- 9. Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П., Крючков Д.А., Рейно В.В., Субботин А.Н., Цвык Р.Ш. Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 6. С. 14–22.
- 10. Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Моделирование физико-химических превращений в пористых почвенных структурах // Динамика сплошных сред / Математические проблемы механики сплошных сред. Сборник научных трудов. Новосибирск : Изд-во Института теплофизики СО РАН, 1999. Вып. 114. С. 39–45.
- 11.Субботин А.Н. Влияние радиационного и комбинированного теплообмена на скорость распространения низового пожара / Тепломассообмен ММФ 2000.
 Минск : Изд-во ИТМО НАНБ, 2000. Т. 2. С. 51–55.
- 12. Субботин А.Н. Закономерности развития подземного пожара при разных условиях тепло- и массообмена с внешней средой / Тепломассообмен ММФ 2000. Тепломассообмен в химически реагирующих системах. IV Минский Международный форум. Минск : Изд-во ИТМО НАНБ, 2000. Т. 4. С. 224–231.
- 13. Исаков Г.Н., Сандрыкина Т.С., Субботин А.Н. Теплообмен и критические ус-

ловия воспламенения ВЭВ нагретыми телами конечных размеров / Всероссийская научная конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики". Материалы докладов. – Томск : Изд-во ТГУ, 2002. – С. 259–261.

- 14.Субботин А.Н. О некоторых особенностях распространения подземного пожара // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 5. – С. 159–165.
- 15.Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Воспламенение и горение древесной массы в продуваемом пористом слое / Всероссийская научная конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики". Материалы докладов. – Томск : Изд-во ТГУ, 2004. – С. 397–399.
- 16.Субботин А.Н. Зажигание пористого горючего нагретым телом ограниченных размеров / Всероссийская научная конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики". Материалы докладов. – Томск : Изд-во ТГУ, 2006. – С. 548–550.
- 17.Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Анализ режимов воспламенения и горения в продуваемом пористом слое твердого горючего / Всероссийская научная конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики". Материалы докладов. – Томск : Изд-во ТГУ, 2006. – С. 551–553.
- 18.Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Воспламенение и горение пористого продуваемого слоя отходов деревообработки при различных условиях тепломассообмена // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 5. – С. 130–135.
- 19. Субботин А.Н. Распространение торфяного пожара при разных условиях тепломассообмена с внешней средой // Пожаровзрывобезопасность. 2007. Т. 16, № 5. С. 42–49.
- 20.Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Зажигание высокоэнергетических веществ нагретыми телами // Пожарная безопасность. 2007. № 3. С. 22–28.
- 21.Субботин А.Н. Зажигание световым излучением пористых высокоэнергетических веществ // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311, № 4. – С. 31–35.
- 22.Субботин А.Н. Аналитическое решение задачи зажигания высокоэнергетических веществ проволочкой, нагреваемой электрическим током // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. –Т. 17, № 4. – С. 22–27.
- 23.Субботин А.Н. Зажигание искрой реагирующего газа // Пожарная безопасность. – 2008. – № 4. – С. 66–71.
- 24.Субботин А.Н. Моделирование высокотемпературных процессов тепломассопереноса при физико-химических превращениях в пористых коксующихся материалах // Пожарная безопасность. – 2008. – № 3. – С. 67–73.
- 25.Субботин А.Н. Влияние диффузии на воспламенение и горение многокомпонентных газовых смесей // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17, № 3. – С. 33–40.
- 26.Субботин А.Н. Исследование режимов горения при утилизации в цилиндрическом реакторе коксующихся промышленных отходов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 4. – с. 23–27.
- 27.Субботин А.Н. Численное исследование зажигания конденсированных ве-

ществ проволочкой, нагреваемой электрическим током // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17, № 5. – С. 29–34.

- 28.Субботин А.Н. Математическая модель распространения низового лесного пожара // Пожарная безопасность. 2008. № 1. С. 109–116.
- 29.Субботин А.Н., Кулеш Р.Н. Исследование механизма и минимальной энергии зажигания торфа источником тепла // Пожарная безопасность. 2009. № 4. С. 77–83.
- 30.Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Зажигание торфа внешним локальным источником тепла // Пожаровзрывобезопасность. 2009. Т. 18, № 4. С. 13–18.
- 31.Субботин А.Н., Кулеш Р.Н. Воспламенение и горение торфяного пласта / Горение твердого топлива. // Сборник докладов VI Всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск : Изд-во ИТФ СО РАН, 2009. Ч. 3. С. 198–204.
- 32.Кузнецов Г.В., Субботин А.Н. Тепломассоперенос в условиях подземной газификации угля // Тепловые процессы в технике. – 2010. – № 9. – С. 422–426.