

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Пурин Михаил Владимирович

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ЗАЖИГАНИИ И ГОРЕНИИ ЧАСТИЦ,
ПЕЛЛЕТ И КАПЕЛЬ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ТОПЛИВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Научный руководитель: **Сыродой Семен Владимирович**

доктор технических наук, профессор научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Официальные оппоненты: **Моисеева Ксения Михайловна**

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математической физики физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Левин Анатолий Алексеевич

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела теплосиловых систем федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «09» декабря 2025 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.04 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, д. 43, уч. корпус 3, ауд. 122.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан « » _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.04
кандидат технических наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'G' followed by a horizontal line and a small flourish.

Д.В. Гвоздяков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Стабильная и независимая энергетика считается гарантией безопасности для любого государства. Анализ ситуации на энергетическом рынке показывает, что попытки запустить в массовое производство так называемые нетрадиционные возобновляемые источники энергии (НВИЭ) – ветряные турбины, солнечные батареи, приливные электростанции и т.д., оказались неудачными. Это объясняется несколькими причинами. Наиболее значимые из последних – существенная зависимость работы НВИЭ от погодных условий и времени года, а также высокая стоимость обслуживания. При этом следует отметить, что такие проекты окупаются достаточно долго (десятилетиями).

По этой причине традиционные источники энергии, такие как уголь и древесина, остаются актуальными. Электростанции, работающие на таких топливах, обеспечивают стабильную выработку электроэнергии в течение года и не зависят от погоды.

Доля угля в энергетике России остается высокой и наблюдается тенденция к ее увеличению. Уголь играет значительную роль в генерации тепла и электроэнергии, и Россия обладает крупными угольными месторождениями для обеспечения своих нужд.

Однако использование угля приводит к негативным последствиям для окружающей среды, так как сжигание угля ведёт к образованию вредных антропогенных веществ (в первую очередь – оксидов азота и серы) и выбросу их в атмосферу. Добыча угля, его обработка и транспортировка также могут приводить к разрушению экосистем.

Древесная биомасса играет важную роль в энергетике благодаря тому, что это единственное топливо, которое является возобновляемым в относительно короткий период (примерно 40-60 лет) времени. Также по оценкам специалистов древесина является так называемым углеродно-нейтральным топливом. При сжигании древесины выделяется значительно меньше по сравнению с углём вредных газообразных продуктов горения (например, оксидов азота (NO_x) и серы (SO_x)). При этом надо заметить, что в России ежегодно накапливаются значительные объёмы отходов деревообрабатывающей промышленности. В то же время нет технологий их повторного использования с целью получения вторичных продуктов с высокой добавленной стоимостью. Создание и внедрение таких технологий в реальный сектор экономики позволит существенно сократить негативное влияние объектов теплоэнергетики на атмосферу, значительно увеличить эффективность потребления природных ресурсов, расширить и диверсифицировать сырьевую базу для тепловых электростанций.

Таким образом, создание новых и энергоэффективных технологий сжигания угля и древесной биомассы, в первую очередь отходов деревообрабатывающих предприятий, является значимым шагом к обеспечению энергетической безопасности отечественной промышленности, а также уменьшению негативного воздействия энергетики на окружающую среду.

В качестве объектов исследования в работе рассматривались угольные pellets, также изучены процессы нагрева и зажигания частиц древесины в условиях сложного радиационно-конвективно-микроволнового воздействия и капли водоугольного топлива при высоких давлениях окислителя.

Научно-техническая проблема. Отсутствие математических моделей и методов решения соответствующих задач тепломассопереноса при зажигании и горении группы перспективных композитных топлив в условиях, соответствующих топочным устройствам котельных агрегатов ТЭС. Также на настоящее время в мировой научной периодике отсутствуют примеры публикаций с результатами теоретических исследований процессов зажигания топливных частиц (угля, биомассы и др.) в условиях сложного радиационно-конвективного и микроволнового нагрева.

Цель работы. Разработка математического аппарата, позволяющего с высокой достоверностью прогнозировать процессы тепломассопереноса, протекающие в период, предшествующий зажиганию частиц топливных композиций, выполненных на основе угля и биомассы, и описывающего процессы тепло- и массопереноса, протекающие при интенсивных термохимических и фазовых трансформациях во внутриспоровой структуре топлива и в

пристенной газовой области в условиях сложного радиационно-конвективно-микроволнового теплового воздействия.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка физической и математической моделей, описывающих с высокой степенью достоверности процессы тепло- и массопереноса, протекающие в период индукции в угольных пеллетах, с учётом комплекса термохимических процессов во внутрипоровой структуре топлива (пеллеты) и во внешней газовой среде;
2. Разработка математической модели, описывающей процессы тепломассопереноса, протекающие при термической подготовке и воспламенении насыщенных влагой частиц древесной биомассы, в условиях сложного конвективно-радиационно-микроволнового нагрева, а также разработка аналитического решения соответствующей задачи;
3. Обоснование по результатам теоретических и экспериментальных исследований возможности использования коксового остатка в качестве базовой компоненты водоугольного топлива. Разработка математической модели процесса тепломассопереноса при зажигании капли водоугольного топлива, выполненного на основе коксового остатка;
4. Разработка математической модели процессов тепло- и массопереноса, протекающих при термической подготовке и зажигании капли (в начальный период нагрева), а затем частицы (после испарения приповерхностного слоя влаги) водоугольного топлива в условиях высоких температур и давлений;
5. Разработка алгоритмов решения поставленных задач и их программная реализация на языке высокого уровня.

Научная новизна. Существенно расширена математическая база, необходимая для описания процессов термической подготовки и воспламенения частиц перспективных композитных топлив (впервые рассмотрена возможность) при существенном варьировании режимов нагрева, в том числе при использовании дополнительного микроволнового воздействия на частицы топлива. Также впервые разработана модель процессов тепломассопереноса при воспламенении капли водоугольного топлива в условиях высоких давлений и температур.

Практическая значимость работы. Созданы несколько математических моделей, которые могут быть использованы для определения конструктивных параметров камер сгорания котельных агрегатов и газотурбинных установок, работающих на перспективных композитных топливах. Эти модели также находят применение при опытно-конструкторских работах по разработке новых энерго- и экологически эффективных технологий сжигания топлива.

Достоверность. Определяется проведением сравнительного анализа теоретических и экспериментальных данных, полученных в ходе выполнения экспериментальных исследований, проводившихся с целью проверки математических моделей. Для проведения экспериментальных исследований были использованы современные стенды с минимальными методическими погрешностями. Также достоверность результатов исследований обеспечивается проверкой консервативности используемых разностных схем, и сопоставлением результатов решения группы тестовых задач на менее сложных постановках задач тепломассопереноса с известными данными.

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту.

1. Зажигание угольных пеллет в результате внутрипорового реагирования кислорода, выделяющегося при термическом разложении органической части угля, с твёрдыми (углерод коксового остатка) и газообразными (летучие) продуктами пиролиза угля невозможно в условиях нагрева, соответствующих топочным устройствам (температуры внутрикотловой среды $T_g = 873-1273$ К) котельных агрегатов ТЭС;
2. Аналитическое решение задачи зажигания частиц влагонасыщенной древесной биомассы применительно к низкотемпературным (в диапазоне температур окислителя $T_g = 650-850$ К) топкам котлов в условиях комбинированного радиационно-конвективного и микроволнового нагрева;
3. Обоснована возможность использования коксового остатка каменного угля в качестве базовой горючей компоненты водоугольного топлива;

4. Увеличение давления окислителя в диапазоне от 0,1 МПа до 3 МПа приводит к росту значений времени задержки зажигания (t_{ign}) типичных капель водоугольного топлива (на основе угля марки Д) на 72%, при этом дальнейшее увеличение давления внешней среды с 3 МПа до 20 МПа ведёт к уменьшению значений t_{ign} на 63%.

Личный вклад. Автор произвёл программную реализацию разработанных математических моделей, занимался написанием статей, готовил доклады и выступал на конференциях.

Связь работы с научными программами и грантами. Исследования проводились в рамках выполнения работ по проектам:

1. Гос. задания "Наука" проект № 8.13264.2018/8.9 ВИУ-НРИР-161/2020 «Разработка математической модели процесса воспламенения частиц древесно-угольного смесового топлива в потоке окислителя», 2020 г;

2. Грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук № МК-89.2021.4 («Разработка основных элементов теории воспламенения капель существенно неоднородных водоугольных композитов в условиях высоких температур и давлений», 2021 г.);

3. Грант РФФИ 18-79-10015 («Разработка основных элементов теории процессов термической подготовки, воспламенения и горения смесовых топлив на основе угля и древесины применительно к камерам сгорания котельных агрегатов», 2021 г.).

Апробация работы. Основные положения, приведённые в диссертационной работе, были представлены на следующих научных конференциях:

1. IX Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (28-30 октября 2020 г., Томск, Россия);

2. X Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (26-28 октября 2021 г., Томск, Россия);

3. XI Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (09-12 ноября 2021 г., Новосибирск, Россия);

4. XVII Всероссийский симпозиум по горению и взрыву (16-20 сентября 2022 г., Суздаль, Россия);

5. II Всероссийская с международным участием молодежная конференция «Бутаковские чтения» (13-15 декабря 2022 г., Томск, Россия);

6. XXXVI Сибирский теплофизический семинар (5-7 октября 2020 г., Новосибирск, Россия);

7. XXXVII Сибирский теплофизический семинар (14-16 сентября 2021 г., Новосибирск, Россия);

8. XXXVIII Сибирский теплофизический семинар (29-31 августа 2022 г., Новосибирск, Россия);

9. XXXIX Сибирский теплофизический семинар (28-31 августа 2023 г., Новосибирск, Россия);

10. XIII Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике (12-14 октября 2023 г., Нижний Новгород, Россия);

11. VII Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации (2-5 октября 2023 г., Минск, Беларусь);

12. XVII Минский международный форум по тепломассообмену (20-24 мая 2024 г., Минск, Беларусь).

Публикации. Научные результаты, приведённые в диссертации, представлены в 4 статьях, опубликованных в международных журналах, индексируемых базами «Scopus» и «Web of Science», и входящих в 1-й и 2-й квартили: «Energy», «Combustion and Flame», «Combustion Science and Technology». Также опубликована 1 статья в журнале, включённом Высшей аттестационной комиссией России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук: «Химическая физика». Получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 2 приложений; изложена на 131 странице, содержит 31 рисунок и 3 таблицы. Список литературы состоит из 151 источника.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана практическая и научная значимости полученных в результате исследований результатов.

В первой главе даётся краткий анализ современного состояния теории и практики процессов воспламенения частиц перспективных топлив, выполненных на основе угля и древесной биомассы. Приведен обзор научной литературы, в которой собраны данные об экспериментальных и теоретических исследованиях процессов горения таких топлив. Показано, что на настоящее время в мировой научной периодике опубликована немногочисленная группа статей, описывающих результаты математического моделирования процессов зажигания и горения отдельных частиц топлива на основе древесной биомассы и угля. Установлено, что на настоящее время нет публикаций с описанием результатов теоретических исследований процессов внутрипорового зажигания угольного топлива в результате термохимического реагирования газообразных и твердых продуктов пиролиза с кислородом, выделяющимся в результате термического разложения. Также не разработано математических моделей, описывающих процесс воспламенения частиц топлива в результате комбинированного радиационно-конвективного и микроволнового теплового воздействия.

Во второй главе приведены физическая и математические модели процессов зажигания топливных пеллет в условиях сложного нагрева. Математические модели сформулированы в виде систем нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, записанных в безразмерных переменных. Система состоит из уравнений энергии, движения для газовой среды (сформулированной в переменных «функция тока – вектор завихренности»), переноса энергии теплового излучения, пьезопроводности, диффузии компонентов газовой смеси. Для описания процесса нагрева угольной пеллеты посредством микроволнового излучения математическая постановка задачи зажигания дополнялась системой уравнений Максвелла.

Физическая постановка задачи зажигания угольной пеллеты (рисунок 1): топливная пеллета, выполненная из угля, в начальный момент времени попадает в высокотемпературную окислительную среду и нагревается в результате интенсивного радиационно-конвективного теплового воздействия.

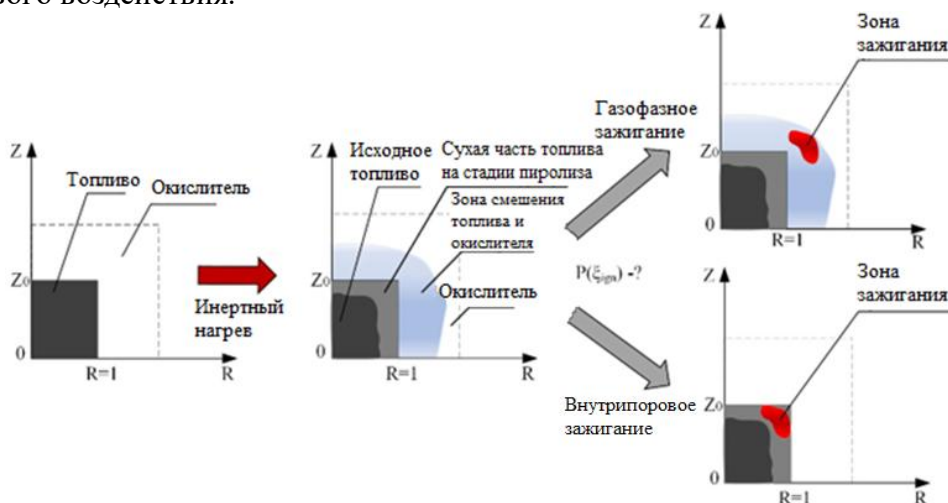


Рисунок 1 – Физическая постановка задачи прогрева и зажигания угольной пеллеты в условиях радиационно-конвективного нагрева

Такие условия соответствуют типичным топочным устройствам котельных агрегатов. Вследствие интенсивного нагрева инициируется испарение внутрипоровой и адсорбционно-

связанной влаги, при этом фронт фазового перехода движется от поверхности pellets вглубь. Дальнейший нагрев приводит к термической декомпозиции органической части топлива, вследствие чего формируются газообразные (летучие) и твёрдые (коксовый остаток) продукты термического разложения. Образовавшиеся летучие фильтруются сквозь угольный каркас к поверхностным слоям топлива и вдуваются в пограничный слой частицы. Принято, что газообразные продукты пиролиза состоят из смеси газов: метана (CH_4), водорода (H_2), окиси углерода (CO), углекислого газа (CO_2) и кислорода (O_2). При разработке математической модели учитывалось, что в период движения парогазовой смеси во внутрипоровом пространстве возможно термохимическое реагирование газообразных и твёрдых продуктов пиролиза с кислородом, выделяющимся в результате термического разложения угля. При достижении критических значений температуры и соотношения концентраций компонентов в системе «горючее – окислитель» происходит зажигание.

Математическая постановка задачи, соответствующая сформулированным выше физической модели, включает систему дифференциальных уравнений в частных производных, записанных в переменных Франк-Каменецкого. С учётом сделанных допущений математическая модель процессов тепломассопереноса в рассматриваемой системе «топливная pellets – внешняя окислительная среда» представляет собой систему уравнений математической физики:

Уравнение энергии для топливной pellets:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Ho \left(\frac{\partial U_g \theta}{\partial R} + \frac{\partial V_g \theta}{\partial Z} \right) + \frac{A_c}{M_c^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2} = \frac{K_R^2}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R A_c \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(A_c \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) + Po, \quad (1)$$

$$R \in 0 \dots 1; Z \in 0 \dots Z_0,$$

$$\text{где } Po = \sum K_{get} Y_i \exp \left(\frac{\theta \gamma}{1 + \beta \theta} \right) + \sum K_{gf} \exp \left(\frac{\theta \gamma}{1 + \beta \theta} \right) \prod Y_i + \sum K_{td} (1 - \eta) \exp \left(\frac{\theta \gamma}{1 + \beta \theta} \right).$$

Распределение температур в слое газа, прилегающем к поверхности топливной pellets, описывается аналогичным (1) уравнением энергии:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Ho \left(\frac{\partial U_g \theta}{\partial R} + \frac{\partial V_g \theta}{\partial Z} \right) + \frac{A_g}{M_g^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2} = \frac{K_R^2}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R A_g \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(A_g \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) + Po + \nabla \Gamma, \quad (2)$$

$$R \in 0 \dots R_g; Z \in 0 \dots Z_g,$$

$$\text{где } Po = \sum K_{gf} \exp \left(\frac{\theta \gamma}{1 + \beta \theta} \right) \prod Y_i;$$

$$\Gamma = \frac{I_R}{\sigma T^4}.$$

Скорости движения смеси воздуха с продуктами пиролиза в пограничном слое топлива вычислялись из решения системы уравнений движений и неразрывности, записанных в переменных «функция тока-вихрь»:

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Xi}{\partial \tau} + \frac{\partial U_g \Xi}{\partial R} + \frac{\partial V_g \Xi}{\partial Z} = \frac{1}{Re} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \Xi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Xi}{\partial Z^2} - \frac{\Xi}{R^2} \right] + \frac{K_R Ri}{\theta_g - \theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial R}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \Psi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} - \frac{2}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} = -\Xi R, \quad (4)$$

$$R \in 0 \dots R_g; Z \in 0 \dots Z_g,$$

$$U_g = \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial Z}, \quad V_g = -\frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R}, \quad \Xi = \frac{\partial V_g}{\partial R} - \frac{\partial U_g}{\partial Z}.$$

Интенсивности теплового излучения в малой окрестности pellets композитного топлива рассчитывалась из решения уравнения переноса энергии излучения:

$$\Phi \frac{d\Gamma}{dS} = -Bu\Gamma + \frac{Bu\Gamma}{\pi}. \quad (5)$$

Распределение давления (Н) в топливных pellets рассчитывалось из решения уравнения пьезопроводности:

$$\frac{\partial PH}{\partial \tau} + \frac{P}{M_g^2} \frac{\partial^2 H}{\partial \tau^2} = \frac{K_R^2}{Le^H} \left[\frac{\partial}{\partial R} \left(R A_g \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(A_g \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \right] + Po, \quad (6)$$

$$R \in 0 \dots 1; Z \in 0 \dots Z_0,$$

где $Po = \sum \frac{Da}{B_{get}^H} Y_i \exp\left(\frac{\theta\gamma}{1+\beta\theta}\right) + \sum \frac{Da}{B_{td}^H} (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta\gamma}{1+\beta\theta}\right).$

Скорости газовой смеси в порах определялись из дифференциального выражения закона Дарси:

$$U_g = -\frac{1}{Da} \frac{\partial H}{\partial R}, \quad (7)$$

$$V_g = -\frac{1}{Da} \frac{\partial H}{\partial Z}. \quad (8)$$

Процесс термического разложения органической части угля описывался уравнением химической кинетики:

$$\frac{d\eta}{d\tau} = (1-\eta)Y \exp\left(\frac{\theta\gamma}{1+\beta\theta}\right). \quad (9)$$

С целью определения концентраций основных компонентов газовой смеси в пограничном слое топлива решена задача диффузии:

$$\frac{\partial PY_i}{\partial \tau} + Ho \left(\frac{\partial U_g PY_i}{\partial R} + \frac{\partial V_g PY_i}{\partial Z} \right) + \frac{D_i}{M_g^2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial \tau^2} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R D_i \frac{\partial PY_i}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(D_i \frac{\partial PY_i}{\partial Z} \right) + Po, \quad (10)$$

$R \in 0 \dots R_g; Z \in 0 \dots Z_g,$

где $Po = \sum P_i \exp\left(\frac{\theta\gamma}{1+\beta\theta}\right) \prod Y_i.$

Для определения концентрации i -го компонента газовой смеси во внутривпоровом пространстве решалась аналогичная задача диффузии:

$$\frac{\partial PY_i}{\partial \tau} + Ho \left(\frac{\partial U_g PY_i}{\partial R} + \frac{\partial V_g PY_i}{\partial Z} \right) + \frac{D_i}{M_g^2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial \tau^2} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R D_i \frac{\partial PY_i}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(D_i \frac{\partial PY_i}{\partial Z} \right) + Po, \quad (11)$$

$R \in 0 \dots R_g; Z \in 0 \dots Z_g,$

где $Po = \sum Y_i \exp\left(\frac{\theta\gamma}{1+\beta\theta}\right) + \sum P_i \exp\left(\frac{\theta\gamma}{1+\beta\theta}\right) \prod Y_i + \sum (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta\gamma}{1+\beta\theta}\right).$

Система уравнений (1)-(11) решалась при следующих начальных:

$$t = 0 \rightarrow \begin{cases} \theta = \theta_0^c, R \in 0 \dots 1, Z \in 0 \dots Z_0 \\ \theta = \theta_0^g = 1, R \in 1 \dots R_g, Z \in 0 \dots Z_g \\ \theta = \theta_0^g = 1, R \in 0 \dots R_g, Z \in 0 \dots Z_g \\ Y_i = \Psi = \Omega = 0, R \in 0 \dots R_g, Z \in 0 \dots Z_g \end{cases}, \quad (12)$$

и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=0, Z \in 0 \dots Z_g} = \left. \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right|_{R \in 0 \dots R_g, Z=0} = \left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} \right|_{R=R_g, Z \in 0 \dots Z_0} = \left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right|_{Z=Z_g, R \in 0 \dots R_g} = \left. \frac{\partial Y}{\partial R} \right|_{R=0, Z \in 0 \dots Z_0} = \left. \frac{\partial Y}{\partial Z} \right|_{R \in 0 \dots R_g, Z=0} = 0, \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial^2 Y}{\partial R^2} \right|_{R=R_g, Z \in 0 \dots Z_0} = \left. \frac{\partial^2 Y}{\partial Z^2} \right|_{Z=Z_g, R \in 0 \dots R_g} = \left. \frac{\partial H}{\partial R} \right|_{R=0, Z \in 0 \dots Z_0} = \left. \frac{\partial H}{\partial Z} \right|_{R \in 0 \dots R_g, Z=0} = H|_{\partial I} = 0. \quad (14)$$

На границе раздела системы «топливная пеллета – внешняя среда» приняты граничные условия сопряжения для уравнений теплопроводности и диффузии:

$$\left. \frac{\partial \theta_g}{\partial n} \right|_{\partial I} = K_\lambda^g \left. \frac{\partial \theta_g}{\partial n} \right|_{\partial I} + Ki(\tau), \quad (15)$$

$\theta|_{\partial I+0} = \theta|_{\partial I-0},$

$$P \left. \frac{\partial Y_i}{\partial n} \right|_{\partial I} = K_D^g P \left. \frac{\partial Y_i}{\partial n} \right|_{\partial I}, \quad (16)$$

$Y|_{\partial I+0} = Y|_{\partial I-0},$

$$Ki(\tau) = Sk \left. \frac{d\Gamma}{dn} \right|_{\partial I}, \quad (17)$$

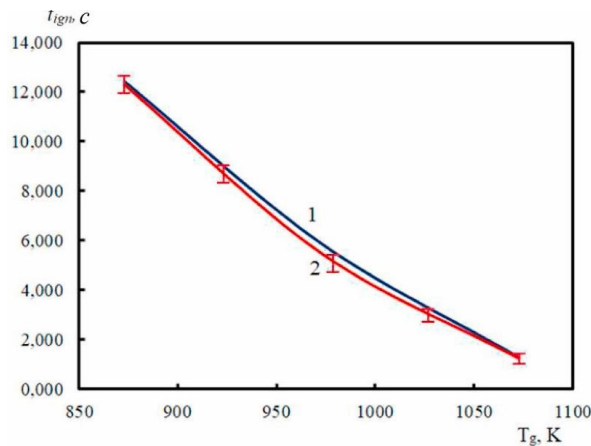
$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial Z} \right|_{X \in 0 \dots Z_g, R=1} = RU_g, \quad (18)$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial R} \right|_{X \in 0 \dots Z_g, R=1} = -RV_g, \quad (19)$$

$\Omega|_{\partial I} = \frac{\partial V_g}{\partial R} - \frac{\partial U_g}{\partial Z}. \quad (20)$

В разделах 2.1 и 2.2 диссертации представлены результаты теоретических исследований процесса зажигания пеллеты угольного топлива в условиях сложного конвективно-радиационного и конвективно-радиационного-микроволнового нагревов. По результатам

проведённых экспериментальных и теоретических исследований показано, что во всех случаях зажигание происходит в газовой среде. На рисунке 2 представлено сравнение теоретической (кривая 1) и экспериментальной (кривая 2) зависимостей времён задержки зажигания угольной пеллеты от температуры внешней среды. Сравнительный анализ показывает хорошую сходимость результатов исследований, что свидетельствует о высоком прогностическом потенциале предложенной математической модели. На рисунке 3 показаны результаты математического моделирования процесса воспламенения угольной пеллеты (температурные поля, линии тока), а также кадр видеогаммы процесса в момент зажигания при температуре среды $T_g = 1073$ К. Отчётливо видна зона зажигания как максимум температур, расположенный в газовой фазе.



1 – результаты математического моделирования;
2 – результаты экспериментальных исследований

Рисунок 2 – Зависимость времен задержки зажигания угольной пеллеты

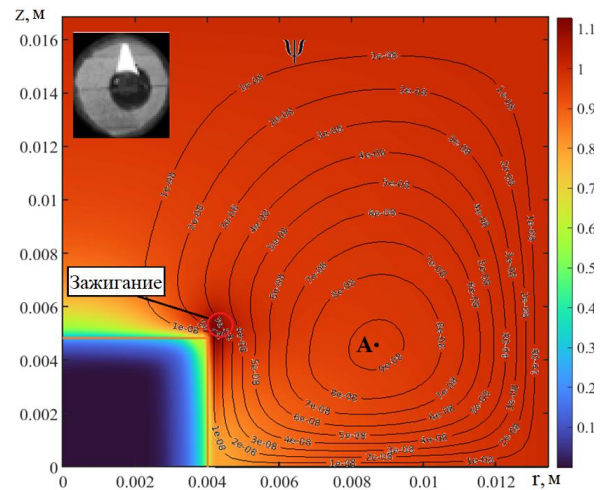
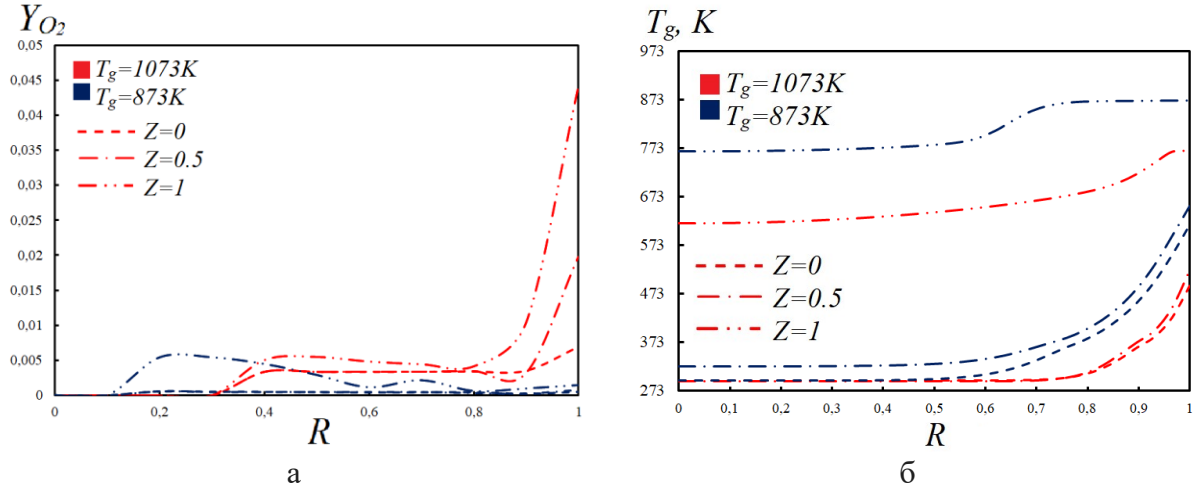


Рисунок 3 – Температурные поля и линии тока в малой окрестности угольной пеллеты в момент воспламенения при температурах окислительной среды $T_g = 1073$ К

Анализ рисунка 3 показывает, что зона зажигания локализуется у верхнего торца пеллеты, что может быть объяснено движениями масс смеси горючего (газообразные продукты термического разложения) и окислителя (кислород воздуха), возникающими при нагреве топлива. В результате перемещения нисходящих потоков воздуха вблизи относительно холодной поверхности частицы и восходящих потоков воздуха на удалении от неё происходит интенсивное перемешивание окислителя и летучих, выделяющихся при термическом разложении угля. Горючая газовая смесь движется к застойной области над пеллетой, где происходит ее аккумуляция. При прогреве смеси горючих газообразных продуктов пиролиза и окислителя до критических температур происходит зажигание. При этом скорость притока теплоты в локальную зону за счет термохимической реакции превышает скорость притока тепла от внешнего источника нагрева (высокотемпературная окислительная среда). Проведенный сравнительный анализ полученных по результатам численного моделирования температурных полей и кадров типичной видеогаммы процесса зажигания показывают хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов. Последнее свидетельствует о высоком прогностическом потенциале разработанной математической модели.

На рисунке 4 приведены массовые концентрации кислорода в структуре (Y_{O_2}) и температуры (T) в момент зажигания (при температурах окружающей среды $T_g = 873$ К и $T_g = 1073$ К) в трёх различных сечениях по высоте топливной пеллеты Z ($Z = z/h_z$, где z – координата, h_z – высота пеллеты). Можно отметить достаточно неравномерное распределение концентрации O_2 в слое топлива. Последнее обусловлено, прежде всего, неравномерным прогревом топливной пеллеты, а также комплексом фильтрационных и тепломассообменных процессов, протекающих во внутрипоровом пространстве в период термической подготовки топлива. Можно отметить, что на некотором удалении от поверхности топлива концентрация кислорода равна нулю. Последнее обусловлено тем, что зона пиролиза

локализована в приповерхностных (наиболее прогретых) областях. Проведённые теоретические и экспериментальные исследования показали, что зажигание твёрдого топлива всегда протекает в газовой фазе. При этом формирующегося в период термического разложения кислорода (в результате выхода из угля адсорбционно-связанного O_2) не хватает для стабильного внутрипорового зажигания, обусловленного реагированием кислорода, выделяющегося в результате термического разложения, с углеродом коксового остатка и летучими. Анализ полей концентрации O_2 (рисунок 4 а) во внутрипоровой структуре показал, что максимальное содержание кислорода не превышает 4,5%.



Z – координата поперечного сечения ($Z = z/h_z$, где z – размерная координата, мм, h_z – высота pellets)

Рисунок 4 – Концентрация кислорода (O_2) и температура (T) во внутрипоровой структуре топлива в момент воспламенения

На настоящее время одним из перспективных способов интенсификации процесса горения частиц твёрдого топлива считается технология сжигания в условиях дополнительного микроволнового излучения. При этом в мировой научной периодике практически нет статей с описанием математических моделей процессов зажигания и горения топливных частиц при микроволновом воздействии. Можно обоснованно предположить, что при сложном радиационно-конвективно-микроволновом нагреве возможно внутрипоровое зажигание частиц твёрдого топлива. Физическая постановка такой задачи приведена на рисунке 5. При этом для описания распространения электромагнитных волн в малой окрестности pellets и, соответственно, нагрева угольного слоя за счёт электромагнитной энергии вся система уравнений (1) – (11) дополнялась системой уравнений Максвелла:

$$\frac{\partial D_e}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\mu_e^0 \epsilon_e^0}} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R H_e) + \frac{\partial H_e}{\partial Z} \right), \quad (21) \quad \frac{\partial H_e}{\partial t} = \frac{-1}{\sqrt{\mu_e^0 \epsilon_e^0}} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R E_e) + \frac{\partial E_e}{\partial Z} \right), \quad (22)$$

$$\epsilon_e \frac{\partial E_e}{\partial t} = - \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R H_e) + \frac{\partial H_e}{\partial Z} \right). \quad (23)$$

Граничные условия и замыкающие соотношения для системы:

$$n \times D_e|_{R=1} = n \times E_e|_{R=0} = n \times H_e|_{R=1} = 0, \quad (24)$$

$$E_e|_{R=1} = E \sin(i\omega t). \quad (25)$$

При этом в уравнении энергии для угольной pellets учитывается внутреннее тепловыделение за счёт поглощения микроволновой энергии:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + H_o \left(\frac{\partial U_g \theta}{\partial R} + \frac{\partial V_g \theta}{\partial Z} \right) + \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{A_c}{M_c^2} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) = \frac{K_R^2}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R A_c \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(A_c \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) + P_o + P_{o_e}, \quad (26)$$

где $P_o = \sum K_{get} Y_i \exp\left(\frac{\theta \gamma}{1 + \beta \theta}\right) + \sum K_{td} (1 - \eta) \exp\left(\frac{\theta \gamma}{1 + \beta \theta}\right) + P_{o_e};$

$$Po_e = \frac{\text{div}(\bar{S})E_0\tau_a}{C_0\rho_0R\dot{T}^2};$$

$$\bar{S} = [E_e \times H_e].$$

На рисунке 6 приведены результаты математического моделирования процессов зажигания топливной пеллеты в условиях сложного радиационно-конвективного и микроволнового нагрева. Можно отметить, что с увеличением напряжённости электрического поля в диапазоне от 0 до 15 кВ/м и, соответственно, интенсивности тепловыделения за счёт поглощения электромагнитной энергии слоем топлива, существенно снижаются времена задержки воспламенения.

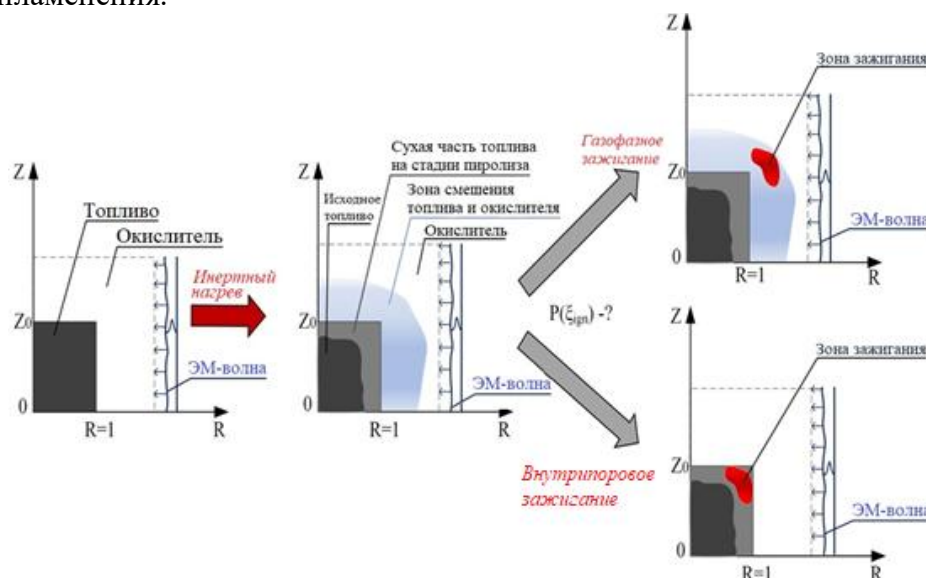


Рисунок 5 – Схема решения задачи прогрева и зажигания угольной пеллеты в условиях сложного конвективно-радиационно-микроволнового нагрева

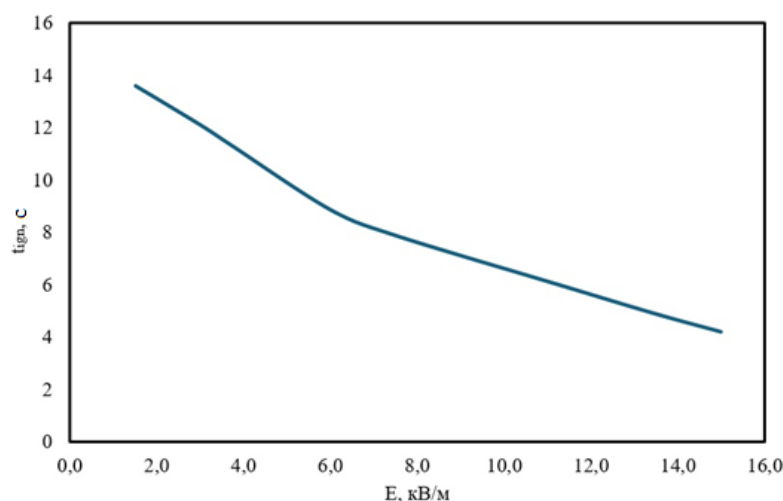


Рисунок 6 – Зависимость времени задержки зажигания древесно-угольной пеллеты (t_{ign}) от напряжённости электрического поля (E)

При этом можно отметить небольшую нелинейность $t_{ign}(E)$. Последнее обусловлено тем, что микроволновая энергия поглощается в основном молекулами воды, содержащейся в порах топлива. При этом скорость испарения влаги определяется температурой на границе раздела системы «вода – пар» и парциальным давлением водяного пара над поверхностью испарения.

В главе 3 диссертации приведена математическая модель процесса нагрева и зажигания частицы влажной древесной биомассы в условиях сложного радиационно-конвективного нагрева при дополнительном микроволновом воздействии. Физическая постановка задачи приведена на

рисунке 7. Предполагается, что древесная частица вводится в высокотемпературную окислительную среду (воздух) и нагревается за счёт сложного конвективно-радиационно-микроволнового теплового воздействия. Микроволновое воздействие приводит к объёмному нагреву всего слоя биомассы. Последнее интенсифицирует весь комплекс процессов термической подготовки топлива к сжиганию: инертный нагрев, испарение влаги, термическое разложение основных компонентов древесины, воспламенение. При разработке математической модели принято, что весь сложный комплекс процессов термической подготовки и зажигания рассматривается как цепь последовательных и взаимосвязанных стадий (инертный нагрев, испарение влаги, термическое разложение и зажигание). Математическая постановка, соответствующая сформулированной физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений энергии. Область решения задачи (частица древесной биомассы) можно условно разделить на две части (рисунок 7).

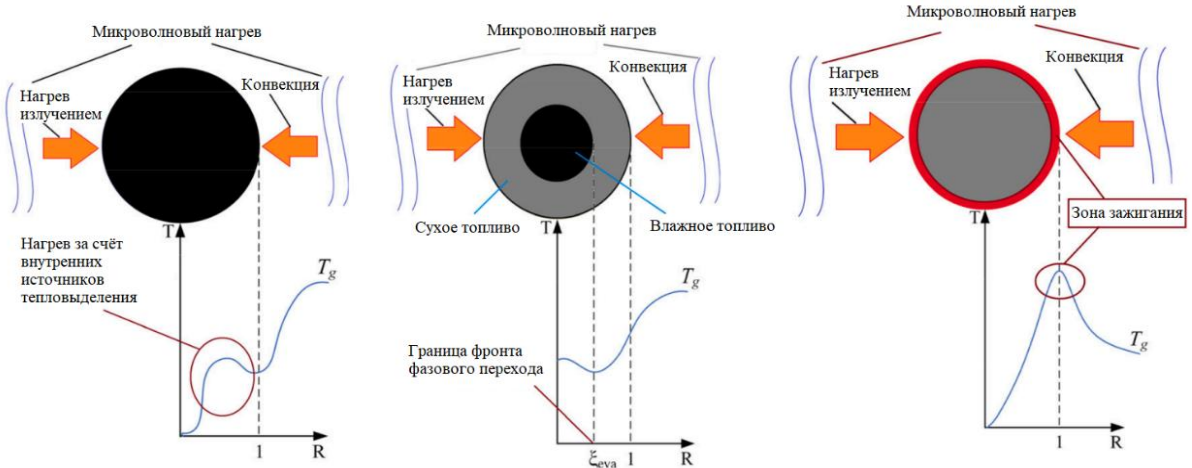


Рисунок 7 – Схема решения задачи нагрева и зажигания частицы влажной древесной биомассы в условиях радиационно-конвективного и микроволнового нагрева

1) На первом этапе термической подготовки происходит инертный нагрев частицы влажной древесины до начала стадии интенсивного испарения воды. Это процесс описывается уравнением энергии с учётом нелинейного источникового члена, описывающего тепловое воздействие СВЧ-излучения:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial Fo} = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial R} \right) + P_{o1} e^{-Bu\gamma}, \quad (27)$$

$$R \in 0 \dots R_0; Fo < Fo_{se}; \theta_1 < \theta_{se}.$$

2) На втором этапе происходит удаление влаги из слоя топлива (стадия сушки). Это процесс описывается системой уравнений по аналогии с известной задачей Стефана:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial Fo} = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial R} \right) + P_{o1} e^{-Bu\gamma}, \quad (28)$$

$$R \in 0 \dots \xi_{eva}; Fo_{se} < Fo < Fo_{fwe}; \theta_1 < \theta_{se},$$

$$K_a \frac{\partial \theta_2}{\partial Fo} = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \theta_2}{\partial R} \right) + P_{o2} e^{-Bu\gamma}, \quad (29)$$

$$R \in \xi_{eva} \dots R_0; Fo_{se} < Fo < Fo_{fwe}; \theta_{se} < \theta_1 < \theta_g,$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial R} \Big|_{R=\xi_{eva}-0} - K_\lambda \frac{\partial \theta_2}{\partial R} \Big|_{R=\xi_{eva}+0} = -Ku \frac{dR_{eva}}{dFo}. \quad (30)$$

3) На третьем этапе происходит зажигание основного слоя топлива. Процесс воспламенения описывается уравнением энергии с двумя нелинейными источниковыми членами в правой части, определяющими тепловыделение за счет термохимического взаимодействия горючего с окислителем и поглощения микроволновой энергии слоем топлива. Уравнение записано в безразмерных переменных Франк-Каменецкого:

$$\frac{\partial \Xi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Xi}{\partial \zeta^2} + \exp\left(\frac{\Xi}{1 + \beta \Xi}\right) + K_q e^{-Bu\gamma}. \quad (31)$$

Начальные условия:

$$\theta(X \in 0 \dots 1) = \theta_0. \quad (32)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=1} = Bi(1 - \theta) + Sk(1 - \theta^4) \equiv Ki(Fo), \quad (33)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=0} = 0. \quad (34)$$

По результатам выполнения работ в рамках диссертационного исследования разработана математическая модель, описывающая сложный комплекс теплофизических процессов, протекающих совместно в условиях микроволнового нагрева и интенсивных фазовых превращений. С использованием метода «квазистационарного теплового приближения» разработано аналитическое решение системы уравнений (27) – (31). Время инертного нагрева (t_{hwb}) частицы древесины рассчитывается из решения трансцендентного уравнения:

$$\theta(X, Fo) = Ki(Fo) \left[(1 + X) \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{1 + R}{2\sqrt{Fo}} \right) - 1 \right) - 2 \left(e^{\frac{(R-1)^2}{4Fo}} + e^{\frac{-(R-1)^2}{4Fo}} \right) \sqrt{\frac{Fo}{\pi}} \right] + \\ + FoPo \cdot e^{-Bu \cdot R} + \theta_0 - BuPo \left(e^{\frac{-R^2}{4Fo}} \sqrt{Fo} (4Fo + R^2) (9\pi)^{\frac{-1}{2}} - \frac{1}{6} (6FoR + R^3) \operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{Fo}} \right) \right). \quad (35)$$

Время полного удаления влаги (t_{fwe}) рассчитывается приближением $R_{eva}=0$:

$$\tilde{m}Fo = I_L + \sum_{j=1}^2 I_j + \sum_{k=1}^3 P_k, \quad (36)$$

где

$$I_L = \frac{1 - Ru^3}{3} \left[\frac{1}{Bi_1} - \frac{A(R_{eva})}{2} \right]; \quad I_1(Ru) = \frac{\tilde{m}Ka}{30} D(R_{eva}) \Phi(R_{eva}); \quad I_2(Ru) = \frac{\tilde{m}Ka}{30} \int_1^{Ru} \frac{B(R_{eva})}{1 - R^3} \Phi(R_{eva}) dR; \\ P_1(Ru) = \frac{\tilde{m}KaK_\lambda}{30} [\beta(R_{eva}) - \alpha(Ru)E(R_{eva})] q_2(Fo); \quad \tilde{m} = \frac{c}{M}; \\ P_2(Ru) = \frac{\tilde{m}KaK_\lambda}{10} \int_0^{Ru} q_2(R) \frac{B(R_{eva})}{1 - R^3} [\beta(R_{eva}) - \alpha(R_{eva})E(R_{eva})] dR; \\ P_3(R_{eva}) = \tilde{m}K_\lambda \int_0^{Fo} q_2(Fo) D(R_{eva}) [E(R_{eva}) + R_{eva}^2] dFo; \\ \Phi(Ru) = \frac{\alpha(R_{eva})}{D(R_{eva})} + [\beta(R_{eva}) - \alpha(R_{eva})E(R_{eva})] W(R_{eva}); \quad W = V(Fo) - \frac{Po_1 Fo}{(E(R_{eva}) + R_{eva}) D(R_{eva})}.$$

Время задержки зажигания после влагоудаления рассчитывается по формуле:

$$t_{ign}^{awe} = t_h + t_{ind}, \quad (37)$$

где: t_h – время прогрева, которое рассчитывалось по формуле:

$$t_h = \left\{ \sqrt[3]{-A + \sqrt{B^3 + C^2}} + \sqrt[3]{-A - \sqrt{B^3 + C^2}} - \frac{b}{3a} \right\}^2, \quad (38)$$

где

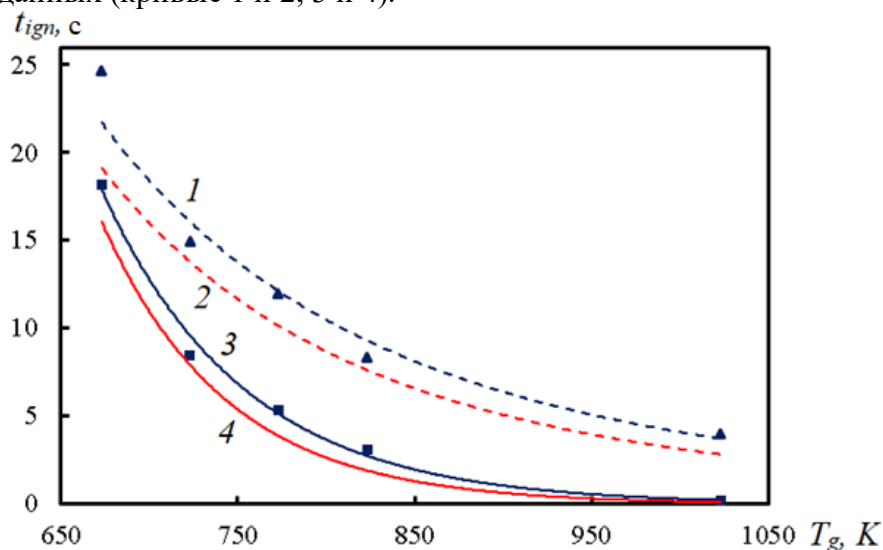
$$a = \frac{4e^{-Bu}}{3}; \quad b = K_q \sqrt{\pi}; \quad c = 2(Bi\theta_g + Ki); \quad d = \theta_0 \sqrt{\pi}; \\ A = \frac{27a^2 d - 9abc + 2b^3}{54a^3}; \quad B = \frac{3ac - b^2}{9a^2}; \quad C = \frac{27a^2 d - 9abc + 2b^3}{54a^3}. \\ t_{ind} - \text{время индукции:}$$

$$t_{ind} = 1 + 2\beta. \quad (39)$$

Время зажигания определяется из следующего соотношения:

$$t_{ign} = \sum_{i=1}^m t_i = t_{hwb} + t_{fwe} + t_{ign}^{awe}. \quad (40)$$

На рисунке 8 приведены зависимости теоретических и экспериментальных значений времён задержки зажигания влагонасыщенных и сухих частиц древесной биомассы в условиях радиационно-конвективного и радиационно-конвективно-микроволнового нагрева. Зависимости 1 и 3 представляют экспериментальные данные, кривые 2 и 4 – данные, полученные по результатам математического моделирования (решение (35) – (40)). Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных показал хорошее соответствие теории и эксперимента. Последнее говорит о высоком уровне прогностического потенциала полученного решения системы (27) – (31). Анализ приведённых зависимостей показывает, что в условиях относительно низких температур окружающей среды ($T_g < 700$ K) времена задержки зажигания сухих и влажных частиц различаются незначительно (не более 25%), при этом с ростом температуры окружающей среды времена задержки зажигания сухих и влагонасыщенных частиц отличаются более значительно. Также видна хорошая сходимость экспериментальных и теоретических данных (кривые 1 и 2, 3 и 4).



1, 2 – зажигание влагонасыщенных частиц древесной биомассы; 3, 4 – зажигание сухих частиц древесной биомассы; 1, 3 – эксперимент; 2, 4 – теоретические значения

Рисунок 8 – Зависимости времен задержки зажигания частицы древесной биомассы от температуры внешней среды в условиях радиационно-конвективно-микроволнового нагрева

В главе 4 диссертации приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса зажигания капли водоугольного топлива, выполненной из угля и коксового остатка каменного угля, а также капли ВУТ в условиях высоких температуры и давлений окислителя. По результатам проведённых экспериментальных и теоретических исследований установлено (раздел диссертации 4.1), что использование в качестве компонента топлива для производства водоугольного топлива коксового остатка каменного угля является перспективным направлением вследствие того, что в этом случае существенно (в 2-3 раза) снижается интенсивность образования антропогенных продуктов сгорания (оксиды азота NO_x и серы SO_x) по сравнению с процессом сжигания водоугольного топлива, выполненного из природного угля. Также по результатам проведённых исследований установлено, что использование в качестве твердой топливной компоненты для ВУТ каменноугольного коксового остатка приводит к значительной трансформации режима зажигания топливной частицы: с газофазного в гетерогенный. Последнее позволило разработать «упрощенную» математическую модель процесса прогрева и воспламенения капли ВУТ. Последняя по своей структуре, системе уравнений и граничным условиям соответствует модели (27) – (31). Отличие заключается в том, что в уравнении энергии для частицы топлива не учитывается внутренний нагрев за счет поглощения микроволнового излучения ($P_o = P_{o1} = P_{o2} = K_q = 0$).

В разделе 4.1 представлены результаты изучения процессов воспламенения капель водоугольного топлива, выполненного из угля и коксового остатка этого угля. По аналогии с

решением системы уравнений (27) – (31) с использованием метода «квазистационарного теплового приближения» разработано аналитическое решение. Время задержки зажигания находится по формуле (40). При этом время инертного нагрева (t_{hwe}) капли ВУТ рассчитывается из решения трансцендентного уравнения:

$$3SkFo = f_2[\tilde{\theta}(Fo)] - f_2[\theta_0]. \quad (41)$$

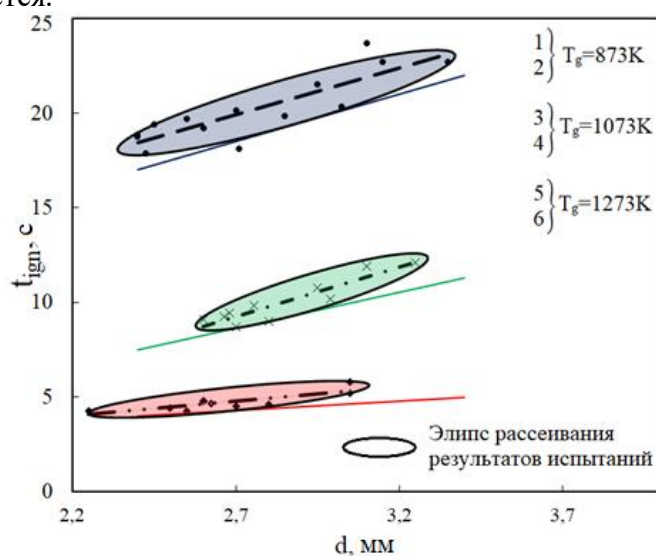
Методика расчета передаточных функций f_2 приведена в диссертации. Время полного влагоудаления (t_{fwe}) рассчитывается из решения следующего уравнения в приближении $R_{eva} = 0$:

$$\tilde{m}Fo \cong \frac{(1 - R_{eva}^2)}{2} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{Bi} - 1 \right) (1 - R_{eva}^3) + \frac{\tilde{m}}{10} \left[1 - 5R_{eva}^2 \left(1 - \frac{6}{5} R_{eva} \frac{1 - R_{eva}^2}{1 - R_{eva}^3} \right) \right]. \quad (42)$$

Время задержки зажигания после влагоудаления рассчитывается по формуле (39), где время прогрева рассчитывалось по формуле:

$$t_h = \frac{\pi \theta_0^2}{4(Bi \cdot \theta_g + Ki)^2}. \quad (43)$$

На рисунке 9 приведены теоретические и экспериментальные зависимости времён задержки воспламенения капель водоугольного топлива, выполненных на основе коксового остатка бурого угля. Сравнительный анализ значений t_{ign} , полученных по результатам математического моделирования и эксперимента, показал достаточно хорошее соотношение теории и эксперимента. Также можно отметить линейный характер зависимости времени задержки зажигания от характерных размеров частиц ВУТ в заданном диапазоне значений $d = 2.2 \dots 3.4$ мм. При этом угол наклона зависимости $t_{ign}(d)$ к оси абсцисс с увеличением температуры уменьшается.



1, 3, 5 – экспериментальные значения;

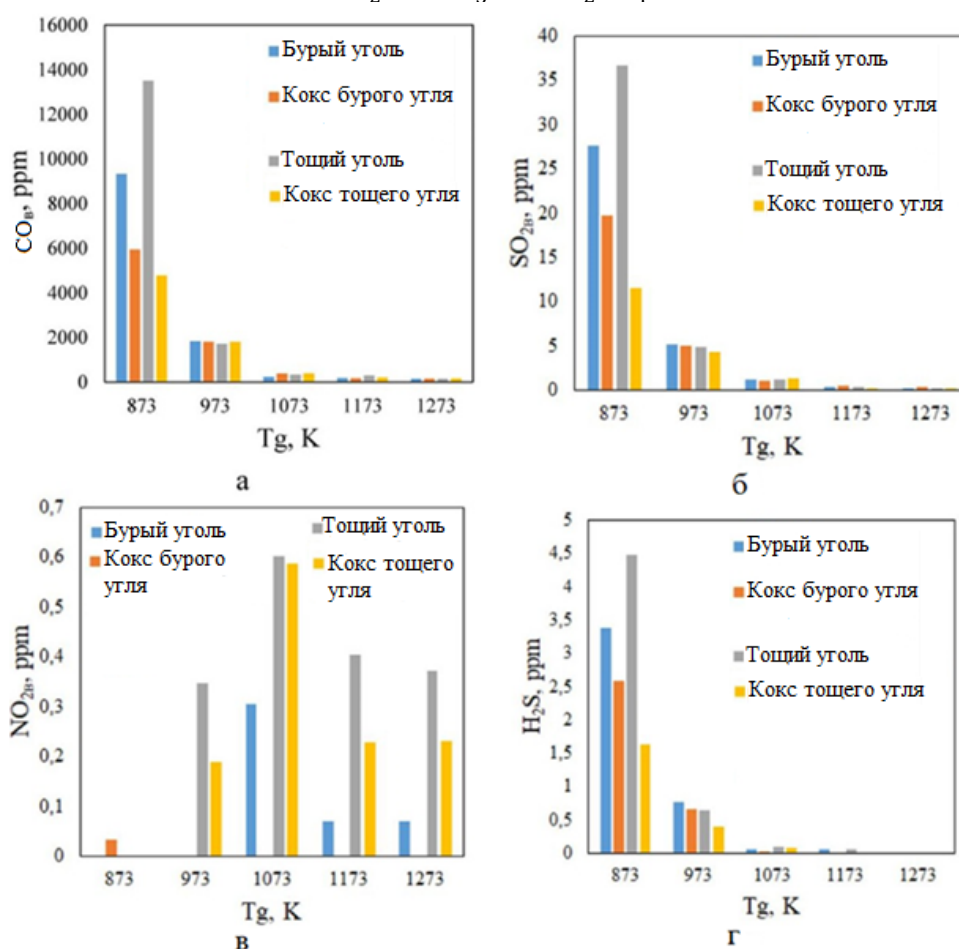
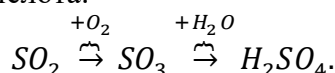
2, 4, 6 – расчетные значения времен задержки зажигания

Рисунок 9 – Зависимости теоретических и экспериментальных значений времен задержки воспламенения частиц водоугольного топлива, выполненного на основе коксового остатка бурого угля

Также по результатам газового анализа установлены основные антропогенные продукты сгорания водоугольного топлива, выполненного на основе природного угля и каменноугольного коксового остатка. На рисунке 10 приведены зависимости, характеризующие среднее (по периоду горения) значение концентрации основных антропогенных продуктов горения одиночной частицы водоугольного топлива, выполненного на основе природного угля и коксового остатка каменного угля:

$$\bar{Y} = \frac{1}{t_{fc}} \int_0^{t_{fc}} Y_i dt. \quad (44)$$

Анализ приведённых на рисунке 10 зависимостей показывает влияние нескольких значимых факторов. На значение $\bar{Y}$ существенное влияние оказывает вид исходного топлива, из которого приготовлено ВУТ. При сжигании ВУТ на основе тощего угля формируется много меньше оксидов серы по сравнению с буроугольным ВУТ. Это, как следует из анализа рисунка 10 г, скорее всего, обусловлено тем, что в тощем угле содержится меньше органической (или колчеданной) серы по сравнению с бурым углём (хорошо видно, что при термическом разложении формируется значительно меньше сероводорода). При этом можно отметить, что с увеличением температуры внешней среды концентрация сероводорода в продуктах сгорания уменьшается. Последнее, очевидно, связано с тем, что в условиях высокотемпературного воздействия H_2S вступает в интенсивное термохимическое взаимодействие с кислородом воздуха с образованием SO . Можно отметить на первый взгляд парадоксальный результат – с увеличением температуры окислителя также уменьшается концентрация диоксида серы в продуктах сгорания. Это можно объяснить следующим: с ростом температуры окислителя SO_2 начинает вступать в активное термохимическое взаимодействие с кислородом воздуха с образованием SO_3 при этом трёхокись серы вступает во взаимодействие с водяным паром (образующимся на этапе термической подготовки топлива при испарении внутриспоровой влаги), в результате формируется серная кислота:



а – окись углерода; б – диоксид серы; в – диоксид азота; г – сероводород

Рисунок 10 – Средние по времени концентрации антропогенных газообразных продуктов горения в малой окрестности частиц ВУТ, выполненных из природных углей и коксового остатка на их основе

В разделе 4.2 диссертационной работы приведено описание математической и физической моделей процесса воспламенения водоугольной капли, протекающего в условиях высоких давления и температур окислительной среды. Такие модели имеют большое значение для прогнозирования процессов сжигания водоугольного топлива в камерах сгорания тепловых двигателей (например, ГТУ, ДВС). Физическая модель процесса воспламенения приведена на рисунке 11. Предполагается, что в период нагрева капли водоугольного топлива в высокотемпературной среде окислителя её условно можно разделить на две зоны: исходное насыщенное влагой топливо и сухой углеродный каркас. Фронт испарения влаги с течением времени смещается к центру частицы, при этом образуется сухой высокопористый угольный каркас. В результате продолжающегося нагрева инициируются процессы термического разложения органической части угля с выделением летучих. Последние фильтруются совместно с водяными парами к приповерхностным слоям топлива и вдуваются в пограничный слой частицы, при этом вступают в термохимическое взаимодействие с углеродом коксового остатка. Газообразные продукты пиролиза в пограничном слое частицы ВУТ перемешиваются с окислителем, формируя стехиометрическую смесь, которая воспламеняется при прогреве до критических температур. Процесс воспламенения капли водоугольного топлива в условиях высоких температур и давлений окислителя описываются системой уравнений, которая по своей структуре, граничным условиям и замыкающим соотношениям соответствует приведённой выше системе (1) – (20), записанной при этом в сферической системе координат.

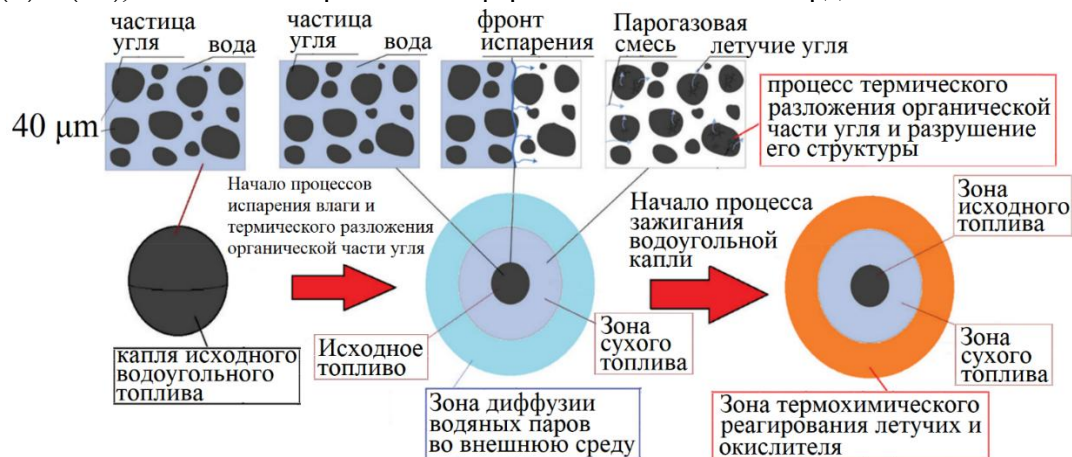
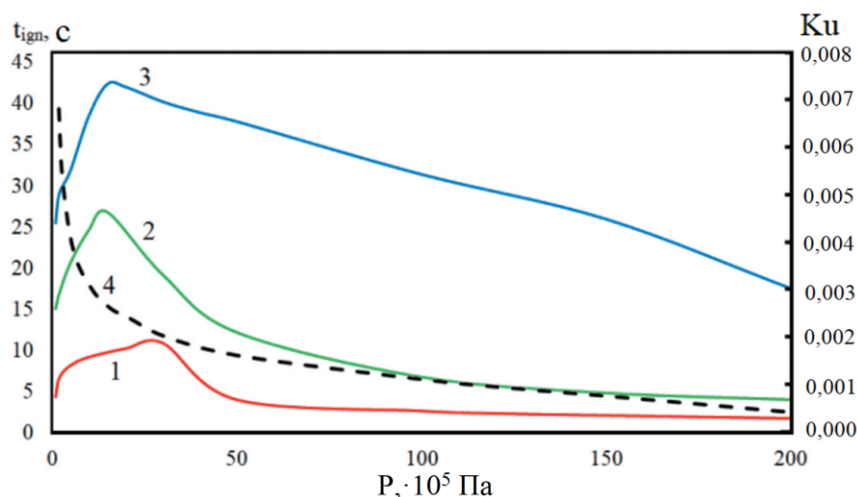


Рисунок 11 – Физическая постановка задачи прогрева и воспламенения водоугольной капли при избыточном давлении

В разделе 4.2 приведены результаты анализа влияния давления внешней среды на характеристики и условия зажигания водоугольных капель. На рисунке 12 показаны зависимости времени задержки воспламенения капель водоугольного топлива от давления топочной среды при температурах источника нагрева $T_g = 873 \text{ K}$, 1073 K и 1273 K . Анализ зависимостей показывает их существенно нелинейный и немонотонный характер. Можно отметить, что рост давления топочной среды на первоначальном этапе приводит к возрастанию времён задержки зажигания (на 72 % при увеличении давления внешней среды до значения $P = 3 \text{ МПа}$). Но дальнейшее увеличение давления ведёт к уменьшению значений времени задержки зажигания (на 63 % при $P > 3 \text{ МПа}$). Такой нетривиальный результат обусловлен влиянием комплекса взаимосвязанных процессов на динамику термической подготовки и зажигания типичных капель ВУТ. Надо сказать, что рост давления среды ведет к росту температуры насыщения для воды. Последнее, в свою очередь, приводит к растягиванию периода инертного нагрева капли водоугольного топлива. В тоже время рост давления внешней среды приводит к снижению теплоты испарения воды. В результате существенно снижаются затраты энергии внешней среды на испарение внутрипористой влаги. Это, в свою очередь, приводит к значительному уменьшению периода протекания процесса обезвоживания частицы водоугольного топлива (другими словами, сушки).



1 – $T_g = 1273$ К; 2 – $T_g = 1073$ К; 3 – $T_g = 873$ К; 4 – критерий Кутателадзе Ku
 Рисунок 12 – Зависимости времён задержки воспламенения водоугольных капель от давления окислительной среды при разных температурах топочной среды

Приведённые на рисунке зависимости значения критерия Кутателадзе (формула (45)), показывает отношение величины теплоты испарения воды к теплоте, затраченной на нагрев воды до фазового перехода) от давления внешней среды также свидетельствует о существенном снижении энергозатрат на процесс влагоудаления. Также необходимо отметить, что рост давления среды приводит к ускорению химического реагирования газообразных компонентов смеси с окислителем.

$$Ku = \frac{Q_{\text{исп}}}{\Delta T C_p}. \quad (45)$$

В разделе «Основные результаты и выводы» подведены основные выводы по теме диссертационного исследования. В приложении диссертации приводятся подробное описание использованных численных методов решения задач математической физики, а также приведён подробный вывод приближенно-аналитических решений существенно нелинейных задач теплового переноса.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Ниже перечислены наиболее значимые результаты исследований, обсуждаемые в диссертации:

1. Впервые создана высокоточная математическая модель, описывающая совокупность теплофизических и физико-химических процессов при воспламенении и горении твердого топлива на основе угля (в виде пеллет), включающая интенсивные термохимические преобразования;

2. Установлено, что зажигание угольных пеллет в условиях, соответствующих типичным котельным агрегатам ($T_g = 873$ - 1273 К), происходит в газовой фазе. При этом показано, что концентрация кислорода, выделяющегося при термическом разложении органической части угля, недостаточна для возникновения внутрипорового горения в результате взаимодействия кислорода с летучими угля. Содержание кислорода во внутрипоровой структуре угля не превышает 4,5%;

3. Математическое моделирование процесса воспламенения твёрдого пеллетезированного топлива показало, что применение дополнительно микроволнового воздействия при низкотемпературном ($T_g < 870$ К) нагреве топлива ведёт к существенному снижению времен задержки зажигания (до 7 раз);

4. Создана математическая модель, которая описывает совокупность основных теплофизических процессов, происходящих при нагреве и зажигании влажных древесных частиц биомассы в условиях сложного радиационно-конвективного и микроволнового нагрева. Кроме

того, разработано приближенно-аналитическое решение этой сложной задачи. Сравнение времён задержки зажигания, полученных теоретически и экспериментально, продемонстрировало их хорошее совпадение;

5. Показано, что применение микроволнового излучения при низкотемпературном ($T_g = 650-850$ К) нагреве в окислительной среде влажной древесной биомассы приводит к значительному сокращению времени задержки зажигания. По результатам математического моделирования установлено, что при температурах внешней среды $T_g < 700$ К использование СВЧ-излучения снижает время задержки зажигания более чем на 50%;

6. Показано различие механизмов горения частиц ВУТ из угля и коксового остатка: у первых зажигание происходит в газовой фазе, у вторых – на поверхности частицы (гетерогенное горение). При этом горение ВУТ из коксового остатка сопровождается меньшим выделением оксидов азота и серы;

7. Создана математическая модель тепломассопереноса при воспламенении капель водоугольного топлива из коксового остатка; разработано приближенно-аналитическое решение задачи зажигания. Сравнение теоретических расчётов с экспериментальными данными показало их высокое совпадение;

8. Показан немонотонный характер зависимости времени задержки зажигания капель ВУТ от давления внешней среды. При относительно низких давлениях среды ($P_g < 3$ МПа) увеличение давления вызывает рост времени задержки зажигания на 72%, при этом зажигание происходит в газовой фазе. В то время как при давлениях выше 3 МПа ($P_g > 3$ МПа) увеличение давления приводит к сокращению времени задержки зажигания на 63%, а воспламенение происходит преимущественно на поверхности частицы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Kuznetsov, G.V. Analysis of the possibility of solid-phase ignition of coal fuel / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, M.V. Purin, V.A. Karelin, N.A. Nigay, S.A. Yankovsky, S.A. Isaev // *Energy*. – 2024. – Vol. 288. – Art. no. 129579;

2. Kuznetsov, G.V. Ignition and combustion characteristics of coal-water fuels based on coal & semi-coke / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, D.Y. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.V. Purin, S.A. Yankovsky // *Combustion and Flame*. – 2022. – Vol. 246. – Art. no. 112430;

3. Kuznetsov, G.V. Analysis of the influence of the type of heat transfer on the dynamics of the ignition processes of wood biomass particles under complex heating conditions / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, Zh.A. Kostoreva, N.A. Nigay, M.V. Purin, V.A. Karelin, V.V. Salomatov // *Combustion and Flame*. – 2024. – Vol. 262. – Art. no. 113353;

4. Kuznetsov, G.V. Mathematical modeling of water-coal fuel droplets ignition under high pressure medium / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, D.Yu. Malyshev, M.V. Purin, V.V. Salomatov, N.A. Nigay // *Combustion Science and Technology*. – 2023. – Vol. 196(16). – P. 3815-3844.

5. Кузнецов, Г.В. Математическое моделирование зажигания древесноугольной пеллеты при комбинированном нагреве / Г.В. Кузнецов, С.В. Сыродой, М.В. Пурин, Ж.А. Косторева // *Химическая физика*. – 2025. – Том 44, № 8 – С. 35-50.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021662566 Российская Федерация. Программа по расчету времени задержки зажигания частиц многокомпонентных топлив/ С.В Сыродой, М.В. Пурин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2021661635; заявл. 26.07.2021; опубл. 02.08.2021. – 1 с.