

На правах рукописи



СЫРОДОЙ СЕМЁН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ВОСПЛАМЕНЕНИИ ЧАСТИЦ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ
УГЛЯ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2022

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

Научный консультант:

Кузнецов Гений Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, профессор.

Официальные оппоненты:

Исаев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», лаборатория фундаментальных исследований, заведующий, г. Санкт-Петербург;

Чернов Андрей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория синтеза новых материалов, главный научный сотрудник, г. Новосибирск;

Ненарокомов Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», аэрокосмический институт, кафедра космических систем и ракетостроения, профессор, г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Защита диссертации состоится «03» июня 2022 г. в 10–00 часов на заседании диссертационного совета Д212.173.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «___» марта 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, доктор
технических наук, доцент



Олеся Владимировна Боруш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Анализ последних событий (аномальные похолодание и выпадения снега много больше нормы), происходивших в США и Канаде, приведшие к полному коллапсу энергетических систем, показывает, что попытки некоторых стран полностью отказаться от тепловых электрических станций в пользу использования возобновляемых источников энергии (например, ветроэлектростанции или фотоэлектрических преобразователей) потерпели (к сожалению) фиаско. Можно обосновано предположить, что в этих условиях угольная энергетика получит новый импульс развития. Скорее всего энергетические системы будущего будут базироваться на глубокой интеграции в единую сеть как традиционных (тепловые и атомные электрические станции), так и нетрадиционных (ВИЭ) источников тепловой и электрической энергии, систем ее транспортировки (на базе сверхпроводников), накопления (электрохимические или гравитационно–механические накопители, гидроаккумулирующие ГЭС, супермаховики и т.д) и распределения (на основе генетических алгоритмов самообучения высокого уровня). Однако высокая антропогенность (выбросы в атмосферу продуктов горения топлива: оксиды азота (NO_x) и серы (SO_x), а также диоксида углерода (CO_2)) угольных тепловых электрических станций существенно тормозит их развитие и расширение их доли в общем балансе электрогенерации. Экологические требования современности создают предпосылки для разработки новых экологически эффективных, так называемых «чистых угольных технологий» [1]. К последним относятся технологии сжигания угля в составе топливных композитов: водоугольные, нефте–водоугольные (органоводоугольные), био–водоугольные, древесно–угольные топлива. Но по состоянию на 2020 год в мире насчитывается не более 15 ТЭС, сжигающих композиционные топлива на основе угля. Причина достаточно очевидна – по оптимистичным ожиданиям апологетов ВИЭ угольные ТЭС к 2025 г. должны были прекратить свое существование. Поэтому и не проводилось опытно–конструкторских работ по модернизации угольных ТЭС с целью перевода их на вышеупомянутые топливные композиты. Даже в настоящее время, несмотря на не всегда (к всеобщему сожалению) успешный опыт эксплуатации ветроустановок и солнечных батарей в Европе, США и Канаде, в умах экспертов царит смятение, т.к. нет ясности в стратегии развития энергетики даже на ближайшие 20 лет. По этой причине на настоящее время не разработаны теоретические основы процессов зажигания и горения смесевых композиционных топлив (водоугольные, нефте–водоугольные, био–водоугольные, древесно–угольные) на основе угля.

Степень разработанности. Основы теории твердо–фазного зажигания конденсированных сред были разработаны еще в середине 40–х Я.Б. Зельдовичем [2], Д.А. Франк–Каменецким [3] и Н.Н. Семеновым [4]. Однако применение моделей [2–4] при рассмотрении процессов воспламенения частиц или капель композиционных топлив не обосновано. Последнее обусловлено

влиянием группы значимых факторов (процессы испарения внутрислойной влаги, термического разложения органической части угля, фильтрационный тепло- и массоперенос и др.), которые не учитываются в математических моделях [2–4]. Первые попытки теоретического описания процессов зажигания и горения водоугольных топлив проведены в Институте горючих ископаемых АН СССР под руководством профессора Г.Н. Делягина [5]. Но модель [5] базируется на решении обыкновенных дифференциальных уравнений. Такой подход позволил получить простые аналитические зависимости для расчет основных характеристик процессов зажигания и горения топлив. Оригинальная математическая модель процесса зажигания и горения капель ВУТ разработана совместно профессорами Ю.В. Овчинниковом и П.А. Щинниковом [6]. Более подробные математические модели разработаны В.В. Саломатовым, К.Ж. Matthews, S.F. Miller в рамках гипотезы о стадийности протекания основных процессов термической подготовки и зажигания. Аналогичные математические модели, описывающие процессы воспламенения влажной древесной биомассы разработаны Y.Levindis [7]. В настоящее время область применения таких моделей достаточно ограничена. Применение на практике математических моделей, базирующихся на гипотезе этапности протекания физико-химических процессов, протекающих при воспламенении, для прогнозирования характеристик и условий зажигания капель, например, водоугольных топлив, может привести к существенным ошибкам при расчетах времен задержки зажигания. Теоретических исследований процессов зажигания капель и частиц био-водоугольных (смесь уголь/биомасса/вода), нефте-водоугольных (или органико-водоугольное – смесь уголь/нефтепродукты/вода) или древесно-угольных смесей (система «уголь-древесина») до настоящего времени в рамках моделей, описывающих физико-химические процессы в каплях и частицах таких топлив не проведено.

Разработка наиболее эколого- и энергоэффективных составов топливных композиций на основе угля по результатам экспериментальных исследований процессов зажигания и горения существенно затруднена вследствие большого объема возможных вариаций соотношений основных горючих и негорючих компонент топлива, условий теплообмена и характерных размеров топливных частиц. В этой связи перспективным для существенного расширения современных представлений о процессах зажигания и горения высокообводнённых топливных композитов на основе угля и создания объективных предпосылок к проведению опытно-конструкторских работ по проектированию камер сгорания котельных агрегатов, сжигающих такие топлива, является разработка нового подхода к моделированию комплекса процессов термической подготовки, зажигания и горения в рамках моделей механики сплошных сред при математическом описании физико-химических процессов, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений в период высокотемпературного радиационно-конвективного нагрева капель и частиц.

Цель диссертационного исследования – разработка основных элементов теории процессов зажигания и горения существенно–неоднородных композиционных топлив на основе угля в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов ТЭС, в рамках моделей механики сплошной среды, отличающихся от известных детальным описанием физико–химических, теплофизических и аэромеханических процессов, протекающих совместно в индукционный период времени при высокотемпературном нагреве капли и частиц топливных композиций на основе угля.

Достижения сформулированной цели диссертации предполагало решение следующих задач:

1. Разработка физической теории процессов воспламенения и горения частиц существенно неоднородных и высокообводнённых топливных смесей на основе угля в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов ТЭС, отличающиеся от известных детальным описанием комплекса физико – химических и теплофизических процессов, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы, взаимодействие газообразных и твердых продуктов пиролиза между собой и с окислителем) превращений.

2. Разработка математического аппарата, детально описывающего процессы зажигания и горения частиц неоднородных композиционных топлив на основе угля, в условиях высокотемпературного радиационно–конвективного нагрева в рамках моделей механики сплошной среды, описывающих: радиационно–конвективно–кондуктивный теплоперенос, фильтрацию газообразных продуктов пиролиза и водяных паров сквозь пористую структуру топлива, фазовые переходы (испарение воды и жидкого горючего), термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы (в условиях сложноразветвлённой кинетики), диффузию летучих в малой окрестности топливных частиц, газофазное воспламенение парогазовой смеси (с учетом сложности кинетической схемы реагирования), гетерогенное окисление углерода кокса.

3. Адаптация методов численного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных с малым параметром у старшей производной к программной реализации на ЭВМ.

4. Разработка алгоритмов решения поставленных краевых существенно нелинейных задач.

5. Установление предельных условий инициирования горения структурно – неоднородных высокообводнённых топливных систем в условиях высокотемпературного радиационно–конвективного нагрева, а также выявление характерных режимов зажигания.

6. Проведение анализа влияния группы значимых факторов (температуры внешней среды; характерных размеров и формы частицы топлива; теплофизических и термохимических характеристик угля; условий теплообмена; фильтрационного охлаждения; зависимость теплофизических

характеристик угля от температуры; кинетические схемы термического разложения и газофазного горения основных компонентов летучих; диспергирования приповерхностного слоя биомассы; разрушения пористой структуры угля) на прогностические характеристики периодов термической подготовки, зажигания и горения топливных композиций.

7. Оценка влияния влагосодержания топлива на секвестрование оксидов серы и азота в процессе горения смесевых топлив (водугольного и уголь/биомасса).

Научная новизна состоит в следующем:

- Предложен новый подход к прогностическому моделированию физико– химических процессов, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение воды и жидкого горючего) и термохимических (термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы, взаимодействие газообразных и твердых продуктов пиролиза между собой и с окислителем) превращений при воспламенении частиц композиционных топлив на основе угля.

- Впервые сформулирована и решена группа задач зажигания частиц существенно неоднородных водугольных топлив при интенсивном радиационно–конвективном нагреве (внутрипочное пространство) в условиях совместного протекания основных процессов термической подготовки. Показано, что такой подход позволяет достичь высокого уровня достоверности прогностических оценок основных характеристик процесса горения.

- Разработан математический аппарат, описывающий процесс воспламенения структурно – неоднородных частиц многокомпонентных топлив (органоводугольного и био–водугольного). Учитывалось совместное протекание комплекса процессов термической подготовки в условиях фазовых (одновременное испарение воды и жидкого горючего) и термохимических (термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы; воспламенение основных компонентов парогазовой смеси в рамках сложносоставной кинетики) превращений в индукционный период времени.

- Впервые сформулирована и решена задача зажигания частицы влажной древесной биомассы в условиях фрагментации приповерхностного слоя. Показано, что увеличение площади поверхности частицы на 30% приводит к существенному уменьшению (на 40%) значений времени задержки зажигания.

- Впервые решена задача совместного зажигания частиц биомассы и угля в условиях интенсивного высокотемпературного нагрева. При постановке задачи учтены структурная неоднородность по пространству в системе «уголь – биомасса – высокотемпературный окислитель»; фазовые переходы, протекающие при испарении влаги (как в частице угля, так и в частице древесины); термическое разложение обоих компонент топливной смеси; радиационный теплопереноса в газовой среде; термохимическое

взаимодействие продуктов пиролиза (твердых и газообразных) с окислителем и между собой, с учетом существенно разветвлённой кинетической схемы реагирования. Показано, что в идентичных условиях нагрева частицы биомассы воспламеняются всегда быстрее (на 50%) угольных.

- По результатам проведенных исследований установлена степень влияния на условия и характеристики зажигания частиц композиционных топлив группы значимых факторов: гетерогенность структуры вещества, температура внешней среды, размеры и форма частиц, влагосодержание, степень метаморфизма угля, вид биомассы, степень диспергации приповерхностного слоя топлива, радиационный теплоперенос, кинетика термического разложения древесины и термохимического реагирования летучих с окислителем, фильтрационное охлаждения каркаса топлива, приповерхностная водяная пленка.

- По результатам прогностического моделирования установлено, что для стабильного воспламенения частиц водоугольных топлив температура внешней среды должна быть не менее 750К.

- По результатам прогностического моделирования впервые обоснован механизм секвестрования оксидов серы и азота в период термической подготовки зажигания и горения частиц древесно – угольной смеси в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов. Показано, что в условиях совместного сжигания угля и биомассы при влажности последней $\geq 5\%$ интенсивность формирования оксидов серы и азота снижается в 6 раз и в 3 раза соответственно, по сравнению с процессами горения однородного угля.

- Впервые по результатам сравнительного анализа результатов численного моделирования процессов теплопереноса в системе «внутритопочная среда – трубная стенка – внутритрубный теплоноситель» установлено, что эффективность теплопередачи в топочном устройстве при сжигании водоугольного топлива в 2 раза выше, чем при горении однородного угля.

- По результатам проведенных исследований разработаны теоретические основы процессов воспламенения существенно неоднородных топливных композиций. Совокупность, полученных результатов можно квалифицировать как научное достижение в области исследований процессов горения существенно неоднородных топлив на основе угля в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов ТЭС.

Практическая значимость. Разработанные математические модели и алгоритмы решения задач зажигания структурно–неоднородных топливных композиций на основе угля применимы при проведении опытно–конструкторских работ по разработке новых высокоэффективных и экологоперспективных котельных установок. Для проведения прогностического моделирования условий и характеристик зажигания существенно неоднородных топливных смесей разработаны программные

коды для ЭВМ (получено 11 свидетельств о государственной регистрации программ).

Теоретическая значимость. Впервые разработаны основные элементы теории зажигания структурно–неоднородных топливных смесей на основе угля в условиях высокотемпературного радиационно–конвективного нагрева и пространственно–временной неоднородности теплофизических и физико–химических процессов. Новый подход к теоретическому описанию комплекса процессов, протекающих при инициировании горения топливных частиц, отличается от известных детальным описанием группы существенно влияющих на динамику воспламенения факторов: конвективный и радиационный нагрев, термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы в рамках существенно–разветвленной кинетической схемы реагирования, диффузия газообразных продуктов пиролиза, вдув последних в пристенную область частицы, движение газовой смеси в малой окрестности частицы топлива, гетеро– и газофазное термохимическое реагирование продуктов пиролиза с окислителем, с учетом цепного характера протекания реакций.

Разработаны математические модели, описывающие процессы термической подготовки, воспламенения и горения структурно–неоднородных топливных композиций на базе угля с учетом образования антропогенных оксидов, а также соответствующие алгоритмы решения существенно нелинейных сингулярно–возмущенных краевых задач. Впервые установлены предельные режимы зажигания частиц композиционных топлив на основе угля. Теоретически проанализировано влияние группы значимых факторов на характеристики и условия зажигания: характерный размер и форма частиц топлива, теплофизические и термохимические характеристики угля, фильтрационное охлаждение угольного каркаса, диспергация приповерхностного слоя топлива, радиационный теплоперенос, кинетическая схема термического разложения древесины, а также кинетика термохимического реагирования летучих с окислителем, приповерхностная пленка воды. По результатам численного моделирования обоснован механизм секвестирования оксидов серы и азота в период зажигания и горения частиц древесно–угольного топлива.

Методы исследования. При проведении процедуры моделирования процессов тепло– и массопереноса с учетом фазовых и термохимических превращений, а также интенсивного химического реагирования горючего с окислителем использован метод конечных разностей решения дифференциальных уравнений в частных производных. Решение нелинейных задач проводилось с применением метода простой итерации. Аппроксимация уравнений в частных производных с разрывными коэффициентами проводилась в соответствии с монотонной консервативной разностной схемой Самарского–Тихонова с использованием неявного четырехточечного разностного шаблона. Дискретизация многомерных уравнений математической физики проводилась в соответствии с изотропной локально–

одномерной схемой Самарского и схемой дробных шагов Яненко. Решение уравнения переноса энергии излучения проводилось S_n -методом.

Необходимо отметить, что асимптотики процессов воспламенения и испарения существенно отличаются: испарение – медленно протекающий процесс; зажигание – быстрый. При этом, так как скорость движения фронта фазового перехода (ФФП) существенно зависит от температуры его поверхности, то в многомерной постановке форма ФФП существенно нелинейна (не поддается полиномиальной аппроксимации) и зависит от распределения тепловых потоков внутри топливной частицы. Поэтому для решения задачи зажигания топлива в условиях продолжающегося испарения разработан специальный алгоритм на основе квазинявного выделения фронта испарения в сочетании с экономичной разностной схемой «сквозного» счета Самарского–Моисеенко.

Для решения задачи определения положения фронта фазового перехода было разработано два алгоритма: первый основан на методе накопления шага по времени; второй алгоритм базируется на основных элементах теории перколяции в сочетании с численным методом Монте–Карло, кластеризация ячеек проводилась в соответствии с алгоритмом Хошена–Копельмана.

Программная реализация алгоритмов численного решения сформулированных краевых задач выполнена в пакете прикладных программ MATLAB с использованием разработанных оригинальных программных кодов.

Для разработки приближенно–аналитического решения задачи зажигания применен разработанный профессором В.В. Саломатовым метод «теплового квазистационарного» приближения с асимптотической оценкой.

Экспериментальные исследования комплекса быстропротекающих физико–химических и теплофизических процессов выполнены с использованием высокоскоростных и высокоточных средств видеорегистрации, включающих в себя высокоскоростную монохроматическую камеру Photron FASTCAM SA4, программное обеспечение Photron FASTCAM Viewer (PFV).

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый подход к математическому моделированию процессов тепло – и массопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение воды и жидкого горючего) и термохимических (пиролиз, взаимодействие газообразных и твердых продуктов пиролиза между собой, газофазное и гетерогенное воспламенение) превращений в период термической подготовки, воспламенения и горения частиц структурно – неоднородных топливных композиций на основе угля.
2. Прогностические модели процессов термической подготовки и зажигания капель (в начальной стадии нагрева), а затем частиц (после подсушивания приповерхностного слоя) водоугольного топлива, отличающиеся от известных детальным описанием взаимосвязанных процессов сопряженного радиационно–конвективно–кондуктивного теплопереноса, фазовых переходов (испарение воды и жидкого

горючего), фильтрационного теплопереноса в пористой структуре топлива, диффузии газообразных продуктов пиролиза, смешанной конвекции парогазовой смеси в малой окрестности частицы топлива, газофазного и гетерогенного зажигания газообразных и твердых продуктов пиролиза (с учетом цепного характера термохимических реакций).

3. Новая прогностическая модель процесса воспламенения частиц влажной древесной биомассы различных форм и конфигураций приповерхностного слоя в условиях их высокотемпературного нагрева.
4. Прогностическая модель процессов термической подготовки и зажигания частиц многокомпонентных топлив на основе угля: органо – водоугольное (смесей угля, жидких углеводородов и воды) и био – водоугольное (смесь угля, биомассы и воды) топлива.
5. Автономная модель прогнозирования процессов совместного зажигания и горения частиц древесины и угля в условиях их высокотемпературного нагрева с учетом формирования оксидов азота и серы.
6. Результаты моделирования процессов секвестрования оксидов серы и азота в периоды индукции и горения частиц древесно – угольного топлива.
7. Обоснование, по результатам численного моделирования, преимуществ сжигания водоугольного топлива по сравнению с однородным углем.

Достоверность результатов исследования. Степень достоверности результатов численного моделирования подтверждается использованием хорошо апробированных (в том числе и другими исследователями) численных методов решения задач тепло–и массопереноса и химической кинетики, использованием консервативных и абсолютно устойчивых разностных схем, выполнением принципов верификации физических и математических моделей, тестированием вычислительных технологий, проверкой консервативности разностных схем путем проведения сравнительного анализа экспериментальных и полученных по результатам численного моделирования характеристик.

Личный вклад автора. При выполнении работ по теме диссертации автор разработал математические модели процессов теплопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых трансформаций и термохимических превращений в период термической подготовки, зажигания и горения структурно–неоднородных топливных композиций в преобразованных переменных, проводил планирование, подготовку и непосредственно экспериментальные исследования, статистическую обработку экспериментальных данных, анализ теоретических и экспериментальных результатов. Диссертант осуществил численную реализацию математических моделей, проанализировал и обобщил все основные результаты, сформулировал выводы.

Представление изложенных в диссертационной работе и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Связь работы с научными программами и грантами.

Диссертационная работа проводилась в рамках стратегического плана развития Национального исследовательского Томского политехнического университета как одного из ведущих университетов мира. Установленные в результате выполнения диссертационной работы теоретические следствия, а также разработанные алгоритмы решения задач термической подготовки, зажигания и горения топливных композитов используются в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке магистров техники и технологии по направлениям: «Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей», «Тепловые и атомные электрические станции», а также кандидатов наук по специальностям: «01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника», «01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества», «05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты», «05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика», «05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента РФ № 899 от 7 июля 2011 г.): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика». А также критическим технологиям Российской Федерации: «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе».

Исследования проведены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проекты 16–38–00217 мол_а, 18–29–24099 мк, 17–58–44020 Монг_а), Российского научного фонда (РНФ) (проекты 15–19–10003, 18–79–10015 и 18–79–10015–П), Совета по грантам Президента Российской Федерации (гранты НШ–7538.2016.8 и МК–89.2021.4), Государственных заданий (Гос. задания "Наука" проекты № FSWW–2020–0022 и № 8.13264.2018/8.9).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на XXXIII, XXXIV, XXXV и XXXVI Сибирском Теплофизическом Семинаре (Новосибирск, 2017, 2018, 2019, 2020); на IX и X Всероссийских конференциях с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015, 2018); на II и III Международных конференциях «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва 2019, 2020); на XV и XVI Минском международном форуме по тепло–массообмену (Минск 2016, 2020); на 9–ом Международном семинаре по структуре пламени (Новосибирск, 2017); на II, III, IV Всероссийских научных конференциях «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2017, 2018, 2019); на V Минском международном коллоквиуме по физике ударных волн, горению и детонации (Минск, 2017); на The International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion and Atmospheric Phenomena (Sochi 2018); на 7–ой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ–7) (Москва, 2018); на XXII Школе–

семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Москва, 2018); на Всероссийской научной конференции с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (Санкт–Петербург, 2019); на XV Всероссийском симпозиуме по горению и взрыву (Москва, 2020); на 21–й Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам, (Алушта, 2019); на XXI Международной научной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2019); на VI Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2016); на XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXVI конференциях «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019); на III, IV и V Международных молодежных форумах «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2015, 2016, 2017); на XXI и XXII Российской научно–технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2016, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 70 работ, в том числе 14 статей в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискании ученой степени доктора наук: Физика горения и взрыва (переводная версия Combustion, Explosion and Shock Waves); Теплофизика и Аэромеханика (переводная версия Thermophysics and Aeromechanics); Химия твердого топлива (переводная версия Solid Fuel Chemistry); Теплоэнергетика (переводная версия Thermal Engineering); 11 свидетельств о регистрации программы для электронных вычислительных машин; 26 статей в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и/или Web of Science (Combustion and Flame; Energy; Fuel; Applied Thermal Engineering; Renewable Energy; Fuel Processing Technology; Journal of Environmental Chemical Engineering; Energy Reports; Journal of the Energy Institute; Energy & Fuels; Combustion Science and Technology); 19 статей в прочих журналах, материалах всероссийских и международных конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 535 наименований и шести приложений; содержит 403 страницы, 186 рисунков, 33 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, методы их решения, отражены проблемы и основные результаты изучения процессов зажигания и горения частиц композиционных топлив, полученные ранее при изучении процессов тепло– и массопереноса, протекающих в период термической подготовки, зажигания и горения таких топлив в условиях, соответствующих топочному

пространству котельных агрегатов. Приведены предпосылки к разработке нового подхода к теоретическому описанию физико–химических процессов, протекающих в период термической подготовки и зажигания существенно неоднородных высокообводненных топливных композитов на основе угля в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Перечислены научные мероприятия и публикации, в рамках которых апробированы результаты диссертационных исследований.

В главе 1 приведено описание современного состояния теории и практики процессов термической подготовки и зажигания частиц структурнонеоднородных и существенно обводненных топливных композитов на основе угля в условиях высокотемпературного нагрева в окислительной среде. Показано, что при теоретическом описании процессов зажигания водоугольных топлив и влажной древесины, как правило, применяется метод дискретизации процесса воспламенения на ряд отдельных рекуррентно связанных стадий (инертный нагрев, испарение внутривлажной влаги, термическое разложение топлива, газофазное воспламенение последнего). Такой подход позволяет получить решение задачи зажигания в виде ряда аналитических зависимостей, описывающих динамику одного доминирующего процесса. Но такой подход может приводить к существенно завышенным (относительно эксперимента) расчетным значениям времен задержки зажигания. Поэтому представляется перспективным разработка нового подхода к прогностическому моделированию основных характеристик процессов термической подготовки, зажигания и горения смесевых топлив на основе угля в рамках математического аппарата механики сплошной среды на базе систем уравнений Навье–Стокса, тепломассопереноса и химической кинетики, отличающегося от известных, детальным описанием физико–химических процессов, протекающих в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений.

В главе 2 приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов зажигания капли водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов. На Рисунке 1 приведены типичные кадры процесса зажигания частицы водоугольного топлива.

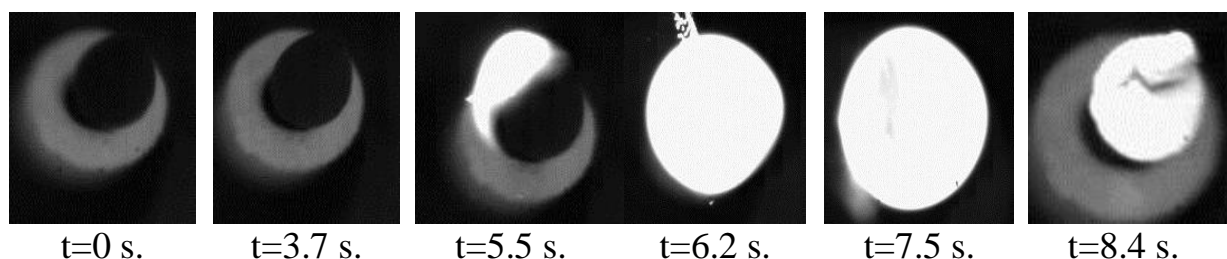


Рисунок 1 – Типичные кадры процесса воспламенения частиц водоугольного топлива в условиях высокотемпературного нагрева

Сформулирована новая математическая модель воспламенения частиц ВУТ, учитывающая совместное протекание основных процессов термической подготовки (инертный прогрев, испарение воды, термохимическое взаимодействие фильтрующихся паров воды с углеродом кокса, термическое разложение органической части угля, воспламенение частицы ВУТ) в индукционный период времени. При постановке группы задач зажигания предполагалось, что в начальный момент времени капля ВУТ попадает в высокотемпературную окислительную среду и нагревается за счет конвекции и излучения. Последнее инициирует процесс испарения внутрисферической влаги. Фронт испарения движется от поверхностных слоев в глубинные. В результате капля трансформируется в существенно неоднородную по пространству частицу, состоящую из жидкого (в исходном состоянии) ядра, и твердого угольного остатка. С ростом температуры инициируется процесс термического разложения органической части угля, сопровождающийся формированием газообразных (летучие – в основном водород – H_2 , окись углерода – CO , метан – CH_4 , диоксид углерода – CO_2) и твердых (кокс – углерод C) продуктов пиролиза. Водяные пары, формирующиеся в результате испарения воды, фильтруются сквозь углеродистый каркас, охлаждая его, и вступают в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса с образованием горючих (водород – H_2 ; окись углерода – CO) и негорючих (диоксид углерода – CO_2) компонентов. Формирующийся в результате термического разложения углекислый газ вступает во взаимодействие с углеродом, в результате формируется монооксид углерода ($C+CO_2=2CO$). Последние совместно с летучими и водяными парами вдуваются в пристенную малую по объему область вокруг частицы ВУТ. В результате вблизи поверхности последней формируется высокорреакционная парогазовая смесь, которая воспламеняется при достижении критических (по условиям зажигания) значений температуры и концентраций. Условия зажигания соответствуют классическим критериям В. Н. Вилюнова, Я. Б. Зельдовича, А. А. Ковальского, Д. А. Франк–Каменецкого:

1. Скорость притока теплоты в термодинамической системе «частица ВУТ – окислитель» (Рисунок 2) за счет экзотермической реакции превышает скорость подводы теплоты от внешнего источника (высокотемпературный окислитель).

2. Температура в зоне реакций окисления превышает температуру внешней среды.

3. Экспоненциальный рост температуры в системе «частица ВУТ – окислитель».

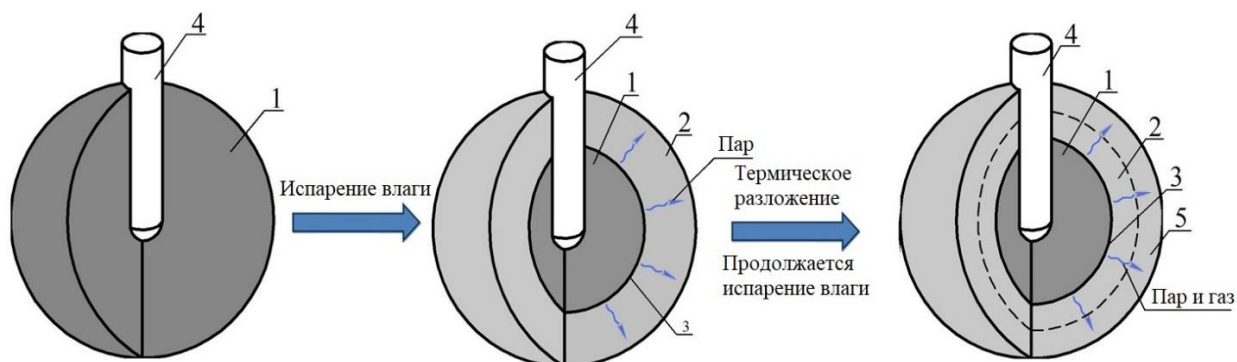


Рисунок 2 – Схема решения задачи

1 — исходное топливо; 2 — подсушенный слой угля, температура которого меньше температуры начала пиролиза; 3 — сухой уголь в состоянии термического разложения; 4 — термопара

Область решения задачи зажигания частицы ВУТ приведена на Рисунке 2. В период термической подготовки каплю ВУТ можно условно разделить на две зоны: исходное (насыщенное влагой) топливо и сухой угольный каркас. Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии, которое учитывает теплопроводность, испарение влаги, термическую деструкцию угля, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, а также фильтрационный тепло- и массоперенос:

$$\frac{1}{Fo} \frac{\partial E}{\partial \tau} - C_{gm} P_{gm} \frac{Pe}{Dar} \left[\frac{\partial H}{\partial R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial H}{\partial \Phi} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right] O(\xi) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) - Ku \frac{\delta(\xi)}{\Omega} \frac{d\xi}{d\tau} + \sum_{i=1}^m P_{O_i} O(\xi), \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m P_{O_i} = P_{O_{id}^{coal}} (1 - \eta_{id}^{coal}) \exp(-Arr_{id}^{coal}) + \sum_{j=1}^2 P_{O_{C+H_2O}^j} \zeta_{H_2O} \exp(-Arr_{C+H_2O}^j) + P_{O_{C+CO_2}} \zeta_{CO_2} \exp(-Arr_{C+CO_2}).$$

Распределение давлений (Н) в частице описывается уравнением пьезопроводности:

$$\frac{1}{Fo_H} \frac{\partial (ПН)}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 X \frac{\partial H}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} X \frac{\partial H}{\partial \Phi} \right) + \sum_{i=1}^m P_{O_i}^H, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m P_{O_i}^H = P_{O_{id}^H} (1 - \eta_{id}) \exp(-Arr_{id}) + \sum_{j=1}^2 (P_{O_{C+H_2O}^j})_j \zeta_{H_2O} \exp(-Arr_{C+H_2O}^j) + P_{O_{C+CO_2}^H} \zeta_{CO_2} \exp(-Arr_{C+CO_2}).$$

Распределение температур в малой окрестности частицы описывается уравнением энергии:

$$\frac{K_a}{Fo} \frac{\partial E_g}{\partial \tau} + Pe \left[U_s \frac{\partial E_g}{\partial R} + \frac{V_g}{R} \frac{\partial E_g}{\partial \Phi} \right] = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) + \sum_{i=1}^{i=3} P_{O_i}, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{i=3} P_{O_i} = \left[\sum_{k=1}^n P_{O_i} \exp(-Arr_i) \prod_{i=1}^m \zeta_i \right]_{CH_4+O_2} + \left[\sum_{k=1}^n P_{O_i} \exp(-Arr_i) \prod_{i=1}^m \zeta_i \right]_{H_2+O_2} + \left[\sum_{k=1}^n P_{O_i} \exp(-Arr_i) \prod_{i=1}^m \zeta_i \right]_{CO+O_2}.$$

Скорости парогазовой смеси в пограничном слое топливной частицы рассчитывается из решения системы уравнений движения, записанной в переменных «функция тока – вихрь»:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U_s \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{V_g}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial \Phi} + U_s \frac{\partial V_g}{\partial R} = \frac{1}{Re} \left(\nabla \Omega - \frac{\Omega}{R^2 \sin^2 \Phi} - \frac{2}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial R} \right) + Ri \left(\frac{\partial \theta}{\partial \Phi} + R \sin \Phi \frac{\partial \theta}{\partial R} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \Phi^2} - \cot \Phi \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} + R^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} = \Omega R^2 \sin \Phi. \quad (5)$$

Процесс термического разложения описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = [1 - \eta] K_{td} (-Arr_{td}). \quad (6)$$

Концентрации компонентов парогазовой смеси в пограничном слое частицы рассчитывались при решении уравнений диффузии:

$$\frac{1}{Fo_{dif}} \frac{\partial P_g \zeta_i}{\partial \tau} + Pe_{dif} \left(\frac{\partial U_g P_g \zeta_i}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial V_g P_g \zeta_i}{\partial \Phi} \right) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(P_g D_i R^2 \frac{\partial \zeta_i}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{P_g D_i \sin \Phi}{R} \frac{\partial \zeta_i}{\partial \Phi} \right) + \sum_{i=1}^n \left[Pe_i^{dif} \exp(-Arr) \prod_{j=1}^m \zeta_j \right]. \quad (7)$$

Концентрации компонентов парогазовой смеси в пористой структуре топлива рассчитывались из уравнения сохранения массы:

$$\frac{K_D}{Fo_{dif}} \frac{\partial P_{gm} \zeta_i}{\partial \tau} - \frac{Pe_i^{ip}}{Dar} \left(\frac{\partial H}{\partial R} \frac{\partial HP_g \zeta_i}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial H}{\partial \Phi} \frac{\partial HP_g \zeta_i}{\partial \Phi} \right) O(\Psi) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[P_g D_i^{ip} R^2 \frac{\partial \zeta_i}{\partial R} \right] + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left[\frac{P_g D_i^{ip}}{R} \sin \Phi \frac{\partial \zeta_i}{\partial \Phi} \right] + \left\{ Po_{td}^{dif} (1 - \eta) \exp(-Arr_{td}) + \sum_{i=1}^n \left[(Po_{get}^{dif})_i \zeta_i \exp(-Arr_i) \right] + \sum_{i=1}^n \left[(Po_{gf}^{dif})_i \exp(-Arr_i) \prod_{j=1}^m \zeta_j \right] \right\} O(\Psi). \quad (8)$$

При постановке задачи учитывалось изменение плотности (ρ) и пористости (Π) топлива:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = (P - P^{end}) K_{td} (-Arr_{td}), \quad (9)$$

$$\Pi = \Pi_0 \frac{P - P_0}{P_0 - P_{etd}}. \quad (10)$$

Система уравнений (1) – (9) решалась при следующих начальных:

$$\tau = 0 \rightarrow \begin{cases} \theta(R, \Phi, 0) = \theta_0 = \frac{T(r, \varphi, 0) - T_0}{\Delta T}; \quad H(R, \Phi, 0) = H_0 = 1, \\ P(R, \Phi, 0) = P_0; \quad \eta(R, \Phi, 0) = 0; \end{cases} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0 < R < R_{out}, \quad 0 < \Phi < \pi$$

$$\begin{cases} \theta(R, \Phi, 0) = \theta_g = \frac{T_g - T_0}{\Delta T}; \quad Y_i(R, \Phi, 0) = 0; \quad R_{out} < R < R_g, \quad 0 < \Phi < \pi \end{cases}$$

и граничных условиях:

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} \Big|_{R=0} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} \Big|_{R=R_g} = \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \Big|_{\substack{0 < R < R_g \\ \Phi=0 \\ \Phi=\pi}} = 0; \quad (11) \quad \frac{\partial H}{\partial R} \Big|_{R=0} = \frac{\partial H}{\partial \Phi} \Big|_{\substack{0 < R < R_{out} \\ \Phi=0 \\ \Phi=\pi}} = 0; \quad (12) \quad H \Big|_{\substack{R=R_{out} \\ 0 < \Phi < \pi}} = 1; \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \zeta_i}{\partial R^2} \Big|_{R=R_g} = \frac{\partial \zeta_i}{\partial \Phi} \Big|_{\substack{0 < R < R_g \\ \Phi=0 \\ \Phi=\pi}} = 0; \quad (14) \quad \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} \Big|_{\substack{R_{out} < R < R_g \\ \Phi=0 \\ \Phi=\pi}} = \frac{\partial \Psi}{\partial R} \Big|_{R=R_g} = 0; \quad (15)$$

$$\Psi(R, \Phi) \Big|_{R=R_{out}} = -\frac{R^2}{Dar} \int \left(\frac{\partial H}{\partial R} \sin \Phi \right) d\Phi; \quad (16) \quad \Omega \Big|_{R=R_{out}} = \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \Phi^2} - \cot \Phi \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} + R^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} \right) \cdot (R^2 \sin \Phi)^{-1}. \quad (17)$$

На границе раздела системы «частица ВУТ – газовая среда» принято граничное условие 4-го рода:

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = K_\lambda \frac{\partial \theta}{\partial R} + Sk(\theta) \left[\left(\frac{T_g}{\Delta T} \right)^4 - \left(\theta + \frac{T_g}{\Delta T} \right)^4 \right], \quad (18)$$

$$\frac{\partial \zeta_i}{\partial R} = K_d \frac{\partial \zeta_i}{\partial R}, \quad (19)$$

$$\theta(R_{out}, \Phi, \tau) \Big|_{R=R_{out}+0} = \theta(R_{out}, \Phi, \tau) \Big|_{R=R_{out}-0}, \quad \zeta(R_{out}, \Phi, \tau) \Big|_{R=R_{out}+0} = \zeta(R_{out}, \Phi, \tau) \Big|_{R=R_{out}-0}.$$

Теплопроводность, теплоемкость, плотность влажной и «обезвоженной» частей водоугольного топлива рассчитывались с учетом объемных долей компонент:

$$\Lambda = \begin{cases} \Lambda_1, & O(\xi)=0; \\ \Lambda_2, & O(\xi)=1; \end{cases} \quad C = \begin{cases} C_1, & O(\xi)=0; \\ C_2, & O(\xi)=1; \end{cases} \quad P = \begin{cases} P_1, & O(\xi)=0; \\ P_2, & O(\xi)=1; \end{cases}$$

$$\Lambda_1 = \gamma_c \Lambda_c + \gamma_{wat} \Lambda_{wat}; \quad \Lambda_2 = \gamma_c \Lambda_c + \gamma_{gm} \Lambda_{gm}; \quad (20)$$

$$C_1 = \gamma_c C_c + \gamma_{wat} C_{wat}; \quad C_2 = \gamma_c C_c + \gamma_{gm} C_{gm}; \quad (21)$$

$$P_1 = \gamma_c P_c + \gamma_{wat} P_{wat}; \quad P_2 = \gamma_c P_c + \gamma_{gm} P_{gm}. \quad (22)$$

Теплофизические характеристики парогазовой смеси также рассчитывались с учетом объемных долей компонент:

$$\Lambda_g = \sum_{i=1}^n \gamma_i \Lambda_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \gamma_i\right) \Lambda_{oxi}, \quad (23)$$

$$C_g = \sum_{i=1}^n \gamma_i C_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \gamma_i\right) C_{oxi}, \quad (24)$$

$$P_g = \sum_{i=1}^n \gamma_i P_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \gamma_i\right) P_{oxi}. \quad (25)$$

Объемные доли компонент парогазовой смеси вычислялись по их массовым концентрациям:

$$\gamma_i = \frac{Y_i/P_i}{\sum_{i=1}^n Y_i/P_i}. \quad (26)$$

Коэффициент диффузии i -го компонента в многокомпонентной смеси рассчитывался из выражения:

$$D_i = \frac{1 - \gamma_i}{\sum_{i \neq k} \frac{\gamma_i}{D_{ik}}}. \quad (27)$$

Безразмерные комплексы:

$$Arr = \frac{E}{RT}, \quad Dar = \frac{vr^* u^*}{K_p p^*}, \quad Ku = \frac{Q_{eva}}{c^* \Delta T_{eva}}, \quad K_\lambda = \frac{\lambda_g}{\lambda_{wcf}}, \quad K_a = \frac{a_g}{a_{wcf}}, \quad K_D = \frac{d_i^{ip}}{d_i}, \quad Fo = \frac{a^* t^*}{(r^*)^2},$$

$$Fo_H = \frac{\chi^* t^*}{(r^*)^2}, \quad N_{rc} = \frac{13.5 \sigma T^3 s}{\varepsilon \lambda^*}, \quad Pe = \frac{u^* t^*}{a^*}, \quad Pe_{dif} = \frac{u^* t^*}{d_{i-ox}^*}, \quad Po = \frac{Q_i k_i \rho_i (r^*)^2}{\lambda^* \Delta T}, \quad Po_H = \frac{k_i \rho_i (r^*)^2}{\chi^* p^* \rho_w \beta m^*}, \quad Po^{dif} = \frac{k_i \rho_i (r^*)^2}{d^* \rho_g},$$

$$Re = \frac{u^* r^*}{\omega}, \quad Ri = \frac{gr^* \beta \Delta T}{\omega^2}, \quad Sk(\theta) = \frac{\varepsilon(T) \sigma T^4}{\lambda^* \Delta T}.$$

Переход к обобщенным переменным проводился в соответствии со следующими соотношениями:

$$\theta = \frac{T - T_0}{\Delta T}, \quad \tau = t/t^*, \quad C = c/c^*, \quad P = \rho/\rho^*, \quad A = \lambda/\lambda^*, \quad U = u/u^*, \quad V = v/u^*, \quad R = r/r^*,$$

$$\xi = R_{eva}/r^*, \quad \Pi = m/m^*, \quad H = p/p^*, \quad X = \chi/\chi^*, \quad D_i = d_i/d_i^*.$$

Система уравнений математической физики с соответствующими краевыми условиями решена методом конечных разностей. При решении системы уравнений эллиптического типа применена шеститочечная неявная разностная схема, при этом аппроксимация конвективных членов проводилась

в соответствии с монотонной разностной схемой А.А. Самарского. При аппроксимации уравнений с разрывными коэффициентами применена абсолютно устойчивая разностная схема Самарского–Тихонова. Для дискретизации двумерных уравнений использовался локально–одномерный метод А.А. Самарского (или метод дробных шагов Яненко). Известно, что асимптотики процессов зажигания топлива и испарения воды существенно отличаются (зажигание быстропротекающий процесс, испарение воды – медленный). Поэтому для решения задачи воспламенения в условиях продолжающегося испарения воды разработан алгоритм на базе метода сквозного счета с применением экономичной разностной схемы Самарского – Моисеенко. Верификация математической модели и оценка достоверности результатов теоретического исследования обеспечивалась использованием абсолютно устойчивых консервативных разностных схем, а также проверкой сходимости разностной схемы методами сгущения сеточных параметров и проверкой теплового баланса в системе «частица топлива – окислитель». Погрешность выполнения закона сохранения энергии в области решения задачи зажигания не превышала 5,2 %. По результатам математического моделирования показано, что применение того или иного метода описания теплофизических характеристик неоднородных водоугольных топлив не приводит к значимым отклонениям расчетных характеристик (t_{ign}) процесса воспламенения от экспериментальных значений t_{ign} . Возможны несколько подходов к моделированию теплофизических свойств (ТФС) гетерогенных структур (Рисунок 2) водоугольных топлив. Как правило при численном моделировании применяются модели, на основе интерпретации ТФС как средневзвешенное соотношение теплофизических характеристик компонент топлива (метод Неймана–Коппа):

$$\lambda_{эф} = \lambda_1(1-m) + m\lambda_2. \quad (28)$$

В работах (J. C. Maxwell, В.И. Оделевского, К. Torkar, Чейлытко А.А., Г.Н. Дульнева, Р.С. Бернштейн, Д.Ф. Старостин, Н.W. Russel, Г.Н. Дульнев, Н.С. Burger и других) приведены формулы для расчета теплопроводности двухкомпонентных гетерогенных систем. К таким составам можно обосновано отнести водоугольные топлива:

$$\lambda_{эф} = \lambda_2 \left(\frac{\lambda_1 + 2\lambda_2 - 2m(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 + 2\lambda_2 + m(\lambda_2 - \lambda_1)} \right), \quad (29) \quad \lambda_{эф} = \lambda_1 \left[1 + \frac{m}{\frac{1-m}{3} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}} \right], \quad (30) \quad \lambda_{эф} = \frac{\lambda_2}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}(1-m) + m}, \quad (31)$$

$$\lambda_{эф} = \lambda_2 \left[\frac{4m}{1 + \lambda_2/\lambda_1} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}(1-2m) \right], \quad (32) \quad \lambda_{эф} = \lambda_2 \left[\frac{4(1-m)}{1 + \lambda_2/\lambda_1} + (2m-1) \right], \quad (33) \quad \lambda_{эф} = \lambda_2 m^{\frac{1}{3}} + \lambda_1 (1-m)^{\frac{2}{3}}, \quad (34)$$

$$\lambda_{эф} = \lambda_2 \frac{1 - \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) m^{\frac{1}{3}} \left(1 - m^{\frac{2}{3}}\right)}{1 - m^{\frac{1}{3}} \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)}, \quad (35) \quad \lambda_{эф} = \frac{m\lambda_1 + (1-m)\lambda_2 C}{m + (1-m)C}. \quad (36)$$

Где m – пористость топлива. Также возможен подход (по аналогии с работами В. А. Бабука, А.М. Липанова, О. С. Рабиновича, М. D. Webb, M.W. Beckstead, K. W. Desmond, L. Massa, Y. Shi, E. R. Weeks, Y. Zhang и других) прямого моделирования реальной гетерогенной структуры многокомпонентной системы. Но такой подход к моделированию ТФС водоугольных топлив экономически не целесообразен. Характерный размер угольных частиц составляет около 40 мкм, в тоже время размер капель ВУТ составляет 1–3,5 мм. Моделирование реальной структуры ВУТ потребует применение ультратонких сеток и, соответственно, вычислительных комплексов кластерного типа петафлопного класса.

На Рисунке 3 приведены теоретические (кривые (1)–(9)) и экспериментальные (кривая (10)) зависимости времен задержки зажигания каплей водоугольного топлива (на основе бурого угля) от температуры окислителя. Теплофизические характеристики варьировались в достаточно широком диапазоне и рассчитаны по формулам (28)–(36). Анализ зависимостей $t_{ign}(T_g)$ показывает, что наибольшие отличия

экспериментальных и вычисленных значений t_{ign} зарегистрированы в случае, когда значения λ определены по формулам (33), (32) и (31). При этом хорошее соответствие теоретических и экспериментальных значений времен задержки воспламенения наблюдается при λ , рассчитанном по формулам (34) и (36). Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали

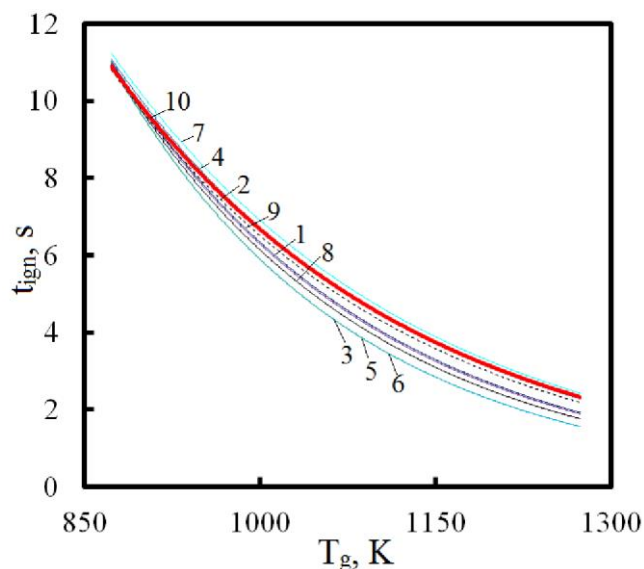


Рисунок 3 – Зависимости $t_{ign}(T_g)$ для частицы ВУТ, полученные теоретически (1) - (9) и экспериментально (10). Значения λ , рассчитаны по формулам: 1 - (29); 2 - (30); 3 - (31); 4 - (28); 5 - (32); 6 - (33); 7 - (34); 8 - (35); 9 - (36).

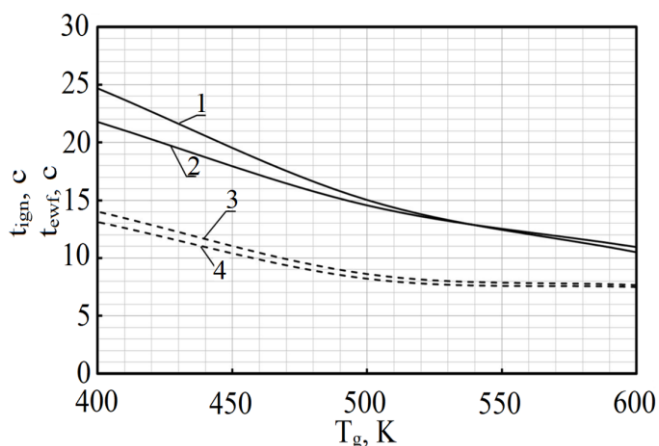


Рисунок 4 – Зависимости времен задержки зажигания (t_{ign}) и испарения водяной пленки (t_{ewf}) от температуры внешней среды. 1, 2 – время задержки зажигания; 3, 4 – время испарения водяной пленки; 1, 3 – эксперимент; 2, 4 – теоретические следствия

существенное влияние приповерхностной водяной пленки воды на характеристики и условия зажигания частиц водоугольных топлив. На Рисунке 4 представлены результаты сравнения времен задержки зажигания частиц водоугольного топлива и испарения водяной пленки, полученных экспериментально и при численном моделировании. Теоретические следствия показывают, что процесс испарения водяной пленки воды играет одну из ключевых ролей при термической подготовке и зажигании частиц ВУТ. Одновременно с испарением воды, происходит прогрев основного слоя топлива до температур, близких к температуре кипения. В результате последующее влагоудаление из глубинных слоев частицы (если не учитывать время испарения пленки) проходит значительно быстрее, чем при воспламенении таких же частиц в случае отсутствия водяного слоя на поверхности.

При распылении водоугольных топлив в топочном пространстве на каплю действуют силы аэродинамического сопротивления. Скорее всего, на характеристики и условия зажигания будет оказывать значимое влияние, набегающий на частицу поток окислителя. Для оценки влияния скорости потока окислителя разработана математическая модель зажигания каплей ВУТ, отличающаяся от приведенной выше (система (1)–(27)) тем, что скорости и направления движения окислителя в пограничном слое частицы вычислялись из аналитического решения задачи Стокса об обтекании шара:

$$H_g = 1 + \frac{3}{2} \Upsilon R_{out} U_g \frac{\cos \Phi}{R^2} \quad \text{– распределение давления в газовой области} \quad (37)$$

$$U_g = -2U_g^{\text{fl}} \cos \Phi \left(\frac{1}{2} - \frac{3R_{out}}{4R} + \frac{R_{out}^3}{4R^3} \right) \quad \text{– скорость в радиальном направлении} \quad (38)$$

$$V_g = U_g^{\text{fl}} \sin \Phi \left(1 - \frac{3R_{out}}{4R} - \frac{R_{out}^3}{4R^3} \right) \quad \text{– скорость в азимутальном направлении} \quad (39)$$

$$\text{где } \Upsilon = \frac{\nu u^*}{r^* p^*} \quad \text{– параметр торможения.} \quad (40)$$

На Рисунке 5 приведены времена задержки зажигания (t_{ign}) каплей водоугольного топлива в потоке высокотемпературного окислителя, полученные численно и экспериментально в зависимости от начального диаметра капли. Сравнительный анализ показывает, что теоретические и экспериментальные значения t_{ign} отличаются незначительно (отклонение не более 8,5%). Анализ зависимостей $t_{\text{ign}}(d)$ также показывает, что начальные размеры частицы топлива оказывают существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Такая зависимость t_{ign} от d характерна для диффузионного режима горения.

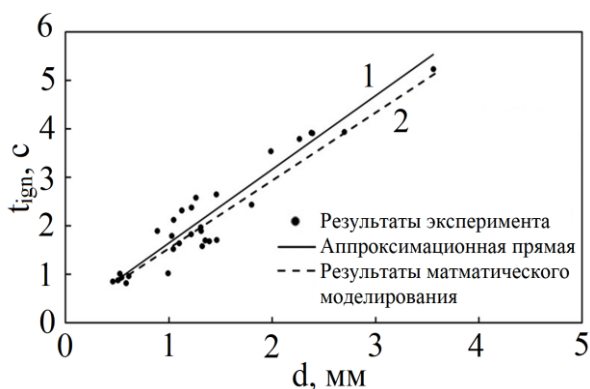


Рисунок 5 – Времена задержки зажигания капле водоугольного топлива в потоке высокотемпературного окислителя (воздуха) в зависимости от диаметра частицы. Температура воздуха $T_g = 873\text{K}$. 1 – эксперимент, 2 – теоретические следствия

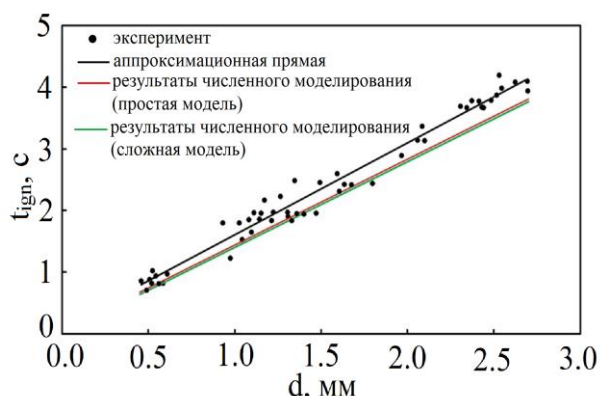


Рисунок 6 – Зависимость t_{ign} частиц ВУТ от размеров. Значения t_{ign} получены по результатам экспериментальных исследований и численного моделирования процесса зажигания с использованием моделей одностадийной и многостадийной кинетики газофазных реакций окисления летучих кислородом воздуха

На Рисунке 6 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц водоугольного топлива, полученные по результатам численного моделирования процессов воспламенения в рамках двух существенно отличающихся кинетических моделей термохимических реакций: одностадийной (с брутто-реакциями взаимодействия газообразного горючего и окислителя) и многостадийной (с цепными параллельно и последовательно протекающими реакциями горения газообразных продуктов пиролиза). Можно отметить, что отличия вычисленных значений t_{ign} , полученных при использовании двух, существенно отличающихся кинетических схем воспламенения летучих, незначительны (не более 2%). Это обусловлено прежде всего тем, что одностадийная и многостадийная модели взаимодействия водорода, метана и окиси углерода с кислородом воздуха описывают процессы окисления при идентичных тепловых эффектах совокупности реакций. Также стоит отметить, что характерное время процесса непосредственного реагирования газообразных продуктов пиролиза несравнимо мало по отношению к общему времени процесса термической подготовки (инертный нагрев, испарение внутриспоровой влаги, термическое разложение органической части топлива). Все эти процессы являются по сравнению с непосредственным зажиганием продолжительными. По этой причине в общем времени задержки воспламенения период интенсивного химического реагирования продуктов пиролиза и окислителя незначителен.

Совокупность представленных во второй главе результатов можно классифицировать как обоснование необходимости описания процессов зажигания капли (в начальной стадии термической подготовки), а затем

частицы (после подсушивания приповерхностного слоя) в рамках математических моделей, учитывающих гетерогенность структуры топлива и совместное протекание комплекса процессов термической подготовки (инертный нагрев, испарение воды, термическое разложение органической части топлива, взаимодействие водяных паров и диоксида углерода и углеродом кокса) и зажигания (газообразных и твердых продуктов пиролиза угля).

В главе 3 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов зажигания частиц перспективного для современной котельной техники топлива – древесной биомассы. На Рисунке 7 приведены типичные кадры процесса зажигания частицы влажной древесной биомассы в условиях высокотемпературного нагрева.

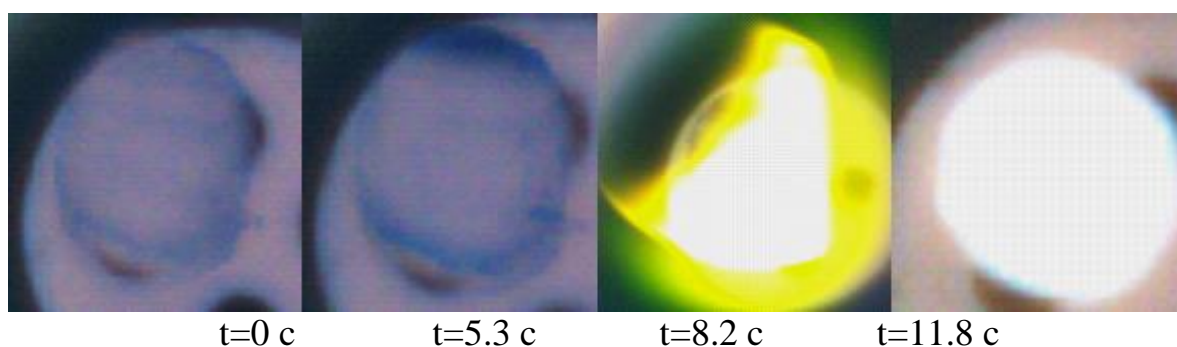


Рисунок 7 – Типичные кадры процессов зажигания частицы влажной древесной биомассы

Численное моделирование процессов зажигания выполнено для системы «частица влажной древесной биомассы – высокотемпературный окислитель». Разработанная математическая модель зажигания описывает комплекс термохимических и теплофизических взаимосвязанных процессов, протекающих совместно в условиях интенсивных термохимических (термическое разложение основных компонентов биомассы (в рамках сложноразветвленной кинетической схемы этого процесса), термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода кокса, воспламенение твердых и газообразных продуктов пиролиза) и фазовых (испарение внутриводной и адсорбционно–связанной влаги) превращений в период интенсивного радиационно–конвективного нагрева. Критерии зажигания аналогичны условиям инициирования горения капель водоугольного топлива.

Область решения задачи зажигания частицы древесины приведена на Рисунке 8. Частицу древесины в период индукции можно условно разделить на две зоны: первая представляет собой исходное насыщенное влагой топливо, вторая сухое дерево. Математическая модель физико–химических процессов, протекающих в период индукции древесины включает в себя систему нестационарных дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных переменных Франк–Камецкого.

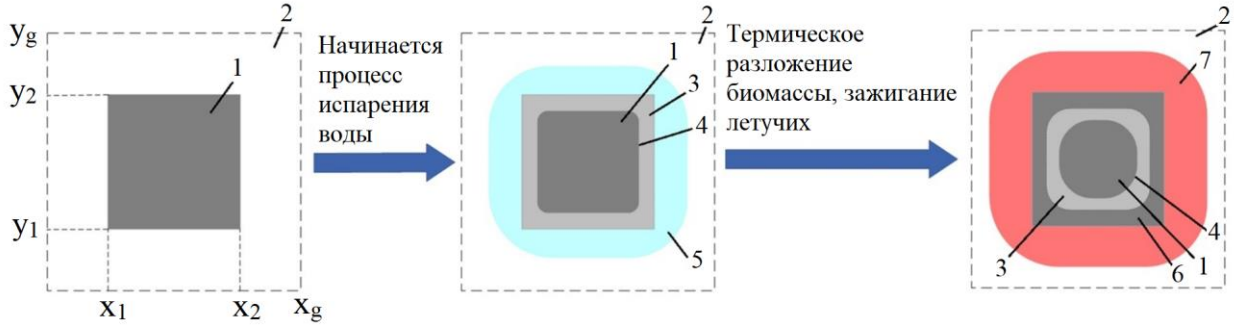


Рисунок 8 – Схема области решения задачи зажигания частицы древесной биомассы

1 – частица древесины; 2 – окислитель; 3 – слой сухой древесины при температуре $T < T_{std}$; 4 – граница раздела системы «влажная – сухая древесина»; 5 – зона диффузии водяных паров; 6 – слой сухой древесины при температуре $T > T_{std}$; 7 – зона воспламенения газообразных продуктов пиролиза.

Уравнение энергии для частицы топлива:

$$\frac{\partial \bar{C}\theta}{\partial \tau} - \frac{Re_{gm} Pr_{gm}}{Dar} \left(\frac{\partial H}{\partial \xi_x} \frac{\partial \bar{C}\theta}{\partial \xi_x} + \frac{\partial H}{\partial \xi_y} \frac{\partial \bar{C}\theta}{\partial \xi_y} \right) O(\xi_{eva}) = \frac{K_a R_K^2}{Fk} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left((\Lambda_m + N_{rc}) \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left((\Lambda_m + N_{rc}) \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] - \frac{Ku \cdot \Delta(\xi_{eva})}{\Omega^\theta} \frac{d\xi_{eva}}{d\tau} + \left\{ \sum_j^m K_j^{td} (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) + \sum_{j=1}^m \left[K_j^{get} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \right] + \sum_{j=1}^m \left[K_j^{gf} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \prod_{k=1}^g Y_j \right] \right\} O(\xi_{eva}) \quad (41)$$

Уравнение энергии для газа:

$$N_{rc} \frac{\partial \bar{C}\theta}{\partial \tau} + Bo \left(U_g \frac{\partial \bar{C}\theta}{\partial \xi_x} + V_g \frac{\partial \bar{C}\theta}{\partial \xi_y} \right) = \frac{N_{rc} K_a^2 R_K^2}{Fk} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left(\Lambda_g \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left(\Lambda_g \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] + N_{rc} \sum_{j=1}^m \left[K_j^{gf} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \prod_{k=1}^g Y_j \right] + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \xi_x} + \frac{\partial \Gamma}{\partial \xi_y} \right) \quad (42)$$

Уравнения переноса энергии излучения:

$$\frac{d\Gamma}{dN} + h_\lambda \Gamma = \frac{h_\lambda \Gamma_{eff}}{\pi} \quad (43)$$

На границе системы «частица топлива – газовая среда» принято граничное условие 4-го рода:

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = K_\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} + Ki \left(\Gamma \Big|_{\xi_x = \xi_{sur}} - \Gamma \Big|_{\xi_x = \xi_{sur} + 0} \right) \quad (44)$$

$$\theta(\bar{n}, \tau) \Big|_{sur} = \theta(\bar{n}, \tau) \Big|_g$$

$$D_{i \rightarrow air} P_g \frac{\partial \zeta_i}{\partial n} \Big|_{\xi_x = \xi_{sur}} = D_{i \rightarrow air} P_{gm} \frac{\partial \zeta_i}{\partial n} \Big|_{\xi_x = \xi_{sur} + 0} \quad (45)$$

$$\zeta_i(\bar{n}, \tau) \Big|_{sur} = \zeta_i(\bar{n}, \tau) \Big|_g$$

Уравнение пьезопроводности для частицы биомассы:

$$\frac{\partial(\text{ПН})}{\partial \tau} = \frac{K_\lambda^H}{Le^H} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left(X \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left(X \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] + \frac{Dar}{\Omega^H} \frac{d\xi}{d\tau} \Delta(\xi) + \left\{ \sum_j^{m_1} Dar B_{td}^H (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) + \sum_{j=1}^m \left[Dar B_{get}^H \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \zeta_j \right] + \sum_{j=1}^m \left[Dar B_{gf}^H \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \prod_{k=1}^g \zeta_j \right] \right\} O(\xi) \quad (46)$$

Скорость в пограничном слое частицы топлива вычислялась из решения системы уравнений движения в переменных «функция тока – вихрь»:

$$R_K^2 \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi_x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi_y^2} \right) = \Omega \quad (47)$$

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + R_K \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \xi_y} \frac{\partial \Omega}{\partial \xi_x} - \frac{\partial \Psi}{\partial \xi_x} \frac{\partial \Omega}{\partial \xi_y} \right) = \frac{R_K^2}{Re} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial \xi_x^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \xi_y^2} \right) + \frac{Ri \cdot R_K}{\theta_g - \theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \quad (48)$$

Процесс термического разложения органической части угля описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial \tau} = \Upsilon_i [1 - \eta_i] \left(\frac{\theta \gamma_i}{1 + \beta \theta} \right) \quad (49)$$

Уравнения сохранения массы для соответствующего компонента реакции в внутриспористой структуре топлива:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{gm} \zeta_i}{\partial \tau} - \frac{Re_{gm} Pr_{gm}}{Dar} \left(\frac{\partial H}{\partial \xi_x} \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_x} + \frac{\partial H}{\partial \xi_y} \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_y} \right) O(\xi_{eva}) = \frac{K_D}{Le} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left(D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left(D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] + \\ + \left\{ \sum_j^m \Upsilon_j^{td} (1 - \eta) \exp \left(\frac{\theta \gamma_j}{1 + \beta \theta} \right) + \sum_{j=1}^m \left[\Upsilon_j^{get} \exp \left(\frac{\theta \gamma_j}{1 + \beta \theta} \right) \zeta_j \right] + \sum_{j=1}^m \left[\Upsilon_j^{gf} \exp \left(\frac{\theta \gamma_j}{1 + \beta \theta} \right) \prod_{k=1}^g \zeta_k \right] \right\} O(\xi) \end{aligned} \quad (50)$$

Уравнения диффузии в газовой области для соответствующих компонентов реакций:

$$\frac{\partial P_{gm} \zeta_i}{\partial \tau} - \frac{Re_{gm}}{Pr_{gm}} \left(U_g \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_x} + V_g \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_y} \right) = Le^{-1} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left(D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left(D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] + \sum_{j=1}^m \left[\Upsilon_j^{gf} \exp \left(\frac{\theta \gamma_j}{1 + \beta \theta} \right) \prod_{k=1}^g \zeta_k \right] \quad (51)$$

Задача решена при следующих начальных:

$$t = 0 \rightarrow \begin{cases} \left. \begin{aligned} \theta(\xi_x, \xi_y, 0) = \theta_0; & H(\xi_x, \xi_y, 0) = 1 \\ \Pi(\xi_x, \xi_y, 0) = \Pi_0; & \eta(\xi_x, \xi_y, 0) = 0; \end{aligned} \right\} x_1 < x < x_2, x_3 < x < x_4, y_1 < y < y_2 \\ \left. \begin{aligned} \theta_g(\xi_x, \xi_y, 0) = 0, \\ \zeta_i(\xi_x, \xi_y, 0) = 0; \end{aligned} \right\} 0 < x < x_1, x_2 < x < x_3, x_4 < x < x_g, 0 < y < y_2; 0 < y < y_1, y_2 < y < y_g, x_1 < x < x_2. \end{cases}$$

и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi_x^2} \right|_{\substack{\xi_x=0; 0 < \xi_y < \xi_g \\ \xi_x=\xi_g; 0 < \xi_y < \xi_g}} = 0 \quad (52)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi_y^2} \right|_{\substack{\xi_y=0; 0 < \xi_x < \xi_g \\ \xi_y=\xi_g; 0 < \xi_x < \xi_g}} = 0; \quad (53)$$

$$H \Big|_{\substack{\xi_x=\xi_{sur} \\ \xi_y=\xi_{sur}}} = 1; \quad (54)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \zeta_i}{\partial \xi_y^2} \right|_{\xi_g} = 0; \quad (55)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial \xi_y} \right|_{\xi_{sur}} = - \frac{1}{Dar} \left. \frac{\partial H}{\partial \xi_x} \right|_{\xi_y} \quad (56)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial \xi_x} \right|_{\xi_{sur}} = - \frac{1}{Dar} \left. \frac{\partial H}{\partial \xi_y} \right|_{\xi_x} \quad (57)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi_x \partial \xi_y} \right|_{\xi_g} = 0 \quad (58)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi_x \partial \xi_y} \right|_{\xi_g} = 0 \quad (59)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \zeta_i}{\partial \xi_x^2} \right|_{\xi_g} = 0; \quad (60)$$

Установлены типичные значения времен задержки зажигания (Рисунок 9) частиц влажной древесной биомассы (цилиндрической формы диаметром $\delta=1.5-3$ мм). Анализ результатов экспериментов показывает, что температура внешней среды оказывает существенное влияние на динамику термической подготовки и воспламенения топлива. Так увеличение температуры на 400К (с 873К до 1273К) приводит к ускорению зажигания более чем в 4 раз. Линейные размеры частицы также оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Так изменение диаметра частицы с $\delta=3$ мм до $\delta=1,5$

мм приводит к ускорению зажигания в 3 раза (с $t_{ign}=30$ с до $t_{ign}=10$ с). Последнее свидетельствует о существенном влиянии комплекса совместно протекающих в индукционный период процессов термической подготовки (перенос тепла теплопроводностью, испарение влаги, термическое разложение органической части топлива, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода кокса, воспламенение летучих).

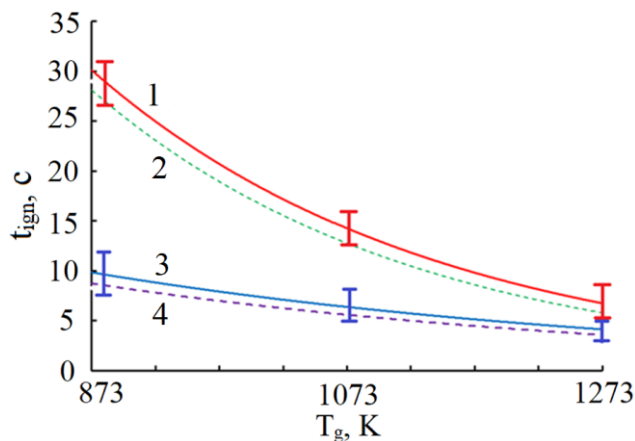


Рисунок 9 – Зависимость времени задержки воспламенения древесной частицы от температуры внешней среды. 1,2 – диаметр частицы $\delta=3,0$ мм; 3,4 - $\delta=1,5$ мм; 1,3 – эксперимент; 2,4 – численное решение

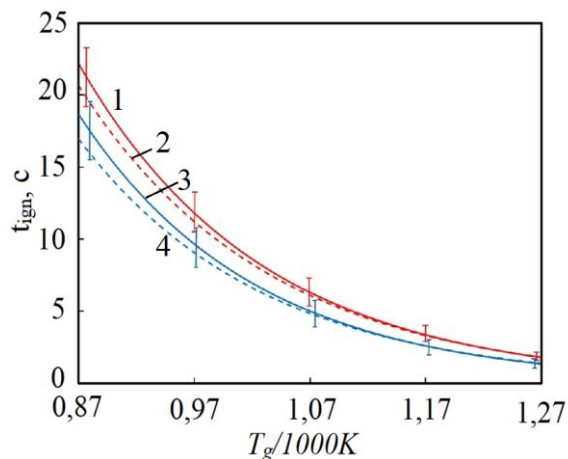


Рисунок 10 – Зависимость времени задержки воспламенения древесных частиц кубической (кривые 1, 2) и цилиндрической (3, 4) форм от температуры внешней среды. Характерный размер частиц $\delta = 3$ мм. 1, 3 - эксперимент; 2, 4 – теоретические следствия

На Рисунке 10 показаны экспериментальные и теоретические зависимости времен задержки воспламенения частицы (двух типичных форм: цилиндр и куб) влажной древесины от температуры внешней среды. Характерный размер частиц ~ 3 мм. Анализ этих зависимостей показывает, что форма частицы оказывает существенное (до 10% по времени задержки воспламенения) влияние на характеристики и условия воспламенения древесины. Можно отметить, что цилиндрические частицы древесины начинают гореть раньше кубических.

Пиролиз древесины является сложным, проходящим в несколько этапов, физико–химическим процессом. При этом до настоящего времени не проведено теоретических исследований, дающих ответ на вопрос: как влияет выбор кинетической схемы процесса термического разложения основных компонентом древесины на прогноз характеристики и условия воспламенения. На Рисунке 11 приведены времена задержки зажигания частиц древесной биомассы (с характерным размером $\delta \approx 3 \cdot 10^{-3}$ м) в зависимости от температуры внешней среды, вычисленные с использованием трех разных моделей пиролиза (одностадийные и многостадийная) и определенные в экспериментах. Проведенные теоретические исследования показали, что кинетическая схема термического разложения оказывает незначительное

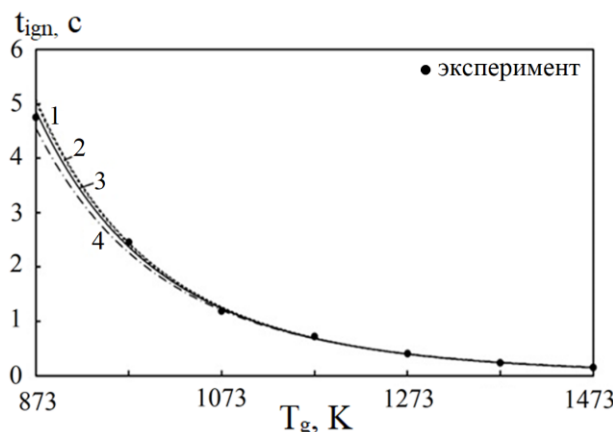


Рисунок 11 – Зависимости времени задержки воспламенения летучих частиц древесной биомассы от температуры внешней среды, полученные экспериментально (кривая 3) и теоретически (кривые 1, 2, 4), при применении различных моделей пиролиза:

- 1 – одностадийная
- 2, 4 – многостадийная

Глава 4 содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов инициирования горения суспензионных топливных композитов на основе угля (био–водоугольное – Био–ВУТ; органо–водоугольное топливо – ОВУТ). Введение в состав водоугольных суспензий ускоряющих процесс зажигания добавок (биомасса или жидкое горючие на основе углеводов) позволяет существенно снизить характерные значения времен задержки воспламенения топливных частиц по сравнению со значениями t_{ign} ВУТ. Физическая модель процесса воспламенения частицы Био–ВУТ и ОВУТ по совокупности этапов термической подготовки и зажигания соответствует физической постановке задачи зажигания капли водоугольного топлива. Отличия заключаются в том, что в период термической подготовки частицы органо–водоугольного топлива помимо процесса испарения внутрипоровой влаги также инициируется (с некоторой задержкой) процесс испарения жидкого горючего. При этом в топливной частице формируется два фронта фазовых переходов, движущихся с разной скоростью. Нагрев топлива приводит к термическому разложению органической части угля и выходу летучих. Последние совместно с парами воды и жидкого горючего вдуваются в пограничный слой частицы где формируют высокорреакционную парогазовую смесь и вступают в термохимическое взаимодействие с кислородом воздуха. При достижении критических (по условиям воспламенения) значений температур и концентрация происходит газофазное воспламенение. Физическая модель процесса зажигания частицы био–водоугольного топлива отличается описанием параллельно протекающих двух процессов термического

влияние на прогнозируемые значения времен задержки зажигания древесных частиц (не более 5%). Это обусловлено тем, что суммарный тепловой эффект процесса термического разложения древесины незначительно отличается в трех рассмотренных кинетических моделях.

Приведенные в третьей главе теоретические следствия позволяют сделать обоснованный вывод об адекватности использования разработанной математической модели для прогнозирования характеристик и условий зажигания частиц влажной древесины применительно к топочным устройствам котельных агрегатов, работающих на древесной биомассе.

разложения: первый – пиролиз угля, второй – термическая деструкция основных компонентов биомассы.

Математическая модель процессов тепло– и массопереноса, протекающих при воспламенении частицы органо–водоугольного топлива аналогична постановке (1)–(27), отличие заключается в том, что в уравнении энергии для частицы ОБУТ учитывается эндотермический эффект процесса испарения жидкого горючего:

$$\frac{1}{Fo} \frac{\partial E}{\partial \tau} - C_{gm} P_{gm} \frac{Pe}{Dar} \left[\frac{\partial H}{\partial R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial H}{\partial \Phi} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right] O(\xi) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) - \sum_{n=1}^2 Ku_n \frac{\Delta(\xi_n)}{\Omega_n^\theta} \frac{d\xi_n}{d\tau} + O(\xi) \sum_{k=1}^m P_{O_k}. \quad (61)$$

Также, при моделировании газофазного воспламенения капле ОБУТ учитывался комплекс термохимических реакций взаимодействия основных компонентов паров жидкого горючего с кислородом воздуха. Рисунок 12 иллюстрирует зависимость времен задержки газофазного и гетерогенного зажигания частицы ОБУТ от температуры ($T_g=975-1175K$). Левая граница кривых соответствует предельной температуре зажигания топлива. С увеличением T_g нелинейно возрастает скорость физико–химических процессов, в результате времена задержки зажигания экспоненциально уменьшаются.

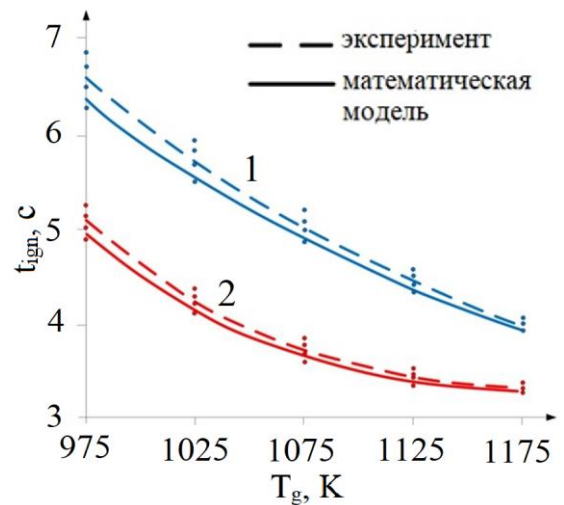


Рисунок 12 – Зависимости времен задержки газофазного (2) и гетерогенного (1) зажигания частицы ОБУТ ($d=1$ мм) от температуры окислителя

Математическая модель процесса зажигания частицы био–водоугольного топлива аналогична постановке задачи воспламенения капле ВУТ (1)–(27). Отличия заключаются в учете в уравнении энергии для частицы топлива эндотермических эффектов двух параллельно протекающих процессов термического разложения (органической части угля и основных компонентов биомассы):

$$\frac{1}{Fo} \frac{\partial E}{\partial \tau} - C_{gm} P_{gm} \frac{Pe_{gm}}{Dar} \left[\frac{\partial H}{\partial R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial H}{\partial \Phi} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right] O(\xi) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) - Ku \frac{\delta(\xi)}{\Omega} \frac{d\xi}{d\tau} + \sum_{i=1}^m P_{O_i} O(\xi), \quad (62)$$

$$\sum_{i=1}^m P_{O_i} = P_{O_{id}^{coal}} (1 - \eta_{id}^{coal}) \exp(-Arr_{id}^{coal}) + \sum_{j=1}^n P_{O_j} Y_j \exp(-Arr_j) + \sum_{n=1}^3 \left[P_{O_{id}^{wood}} (1 - \eta_{id}^{wood}) \exp(-Arr_{id}^{wood}) \right].$$

На Рисунке 13 приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных и полученных по результатам численного моделирования значений времен задержки зажигания частицы био–водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля и листьев березы. Анализ теоретических и экспериментальных значений t_{ign} показал их хорошее соответствие. Можно отметить, что период времени (Δt_{ign}) между моментами зажигания летучих и углерода кокса незначителен. В условиях высоких температур $\Delta t_{ign} \rightarrow 0$. Это скорее всего обусловлено тем, что при $T_g \geq 1073$ существенную роль играет тепловое излучение внешней среды. В период термической подготовки капля Био–ВУТ происходит прогрев основного слоя топлива, после воспламенения летучих существенно интенсифицируется нагрев поверхности капли Био–ВУТ и, соответственно, инициируется горение кокса.

Глава 5 содержит описание результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов зажигания частиц сухих

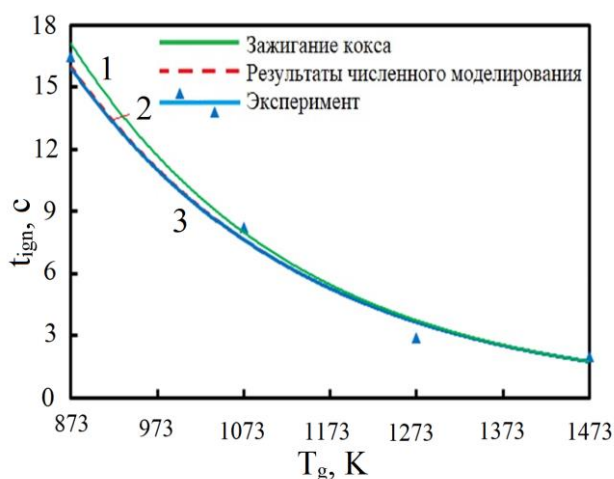


Рисунок 13 – Зависимость времен задержки зажигания капель Био–ВУТ от T_g

1 – t_{ign} кокса; 2, 3 – t_{ign} летучих. 2 – теоретические следствия; 3 – эксперимент.

древесно–угольных смесей в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов.

На Рисунке 14 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц угля (Рисунок 14а) и биомассы (Рисунок 14б) от расстояния между частицами (L) при различных температурах внешней среды. Анализ зависимостей показывает, что в условиях относительных низких температур значение L оказывает существенное влияние на t_{ign} . Можно отметить, что при $T_g=873K$ зависимость $t_{ign}(d)$ параболическая. Другими

словами, существует некоторое оптимальное (по условиям зажигания) расстояние между частицами топлива. Эта тенденция характерна при зажигании как угольной, так и древесной частиц. С увеличением температуры внешней среды влияние расстояния между частицами на характеристики их зажигания существенно уменьшается. Математическая модель процесса зажигания представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процессы термической подготовки и зажигания, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений в период индукции. По своей структуре уравнений математической физики и методам их решения модель аналогична постановке (41) – (60). Отличие заключается в том, что описывается зажигание одновременно двух частиц топлива (древесины и угля). С целью верификации математических моделей

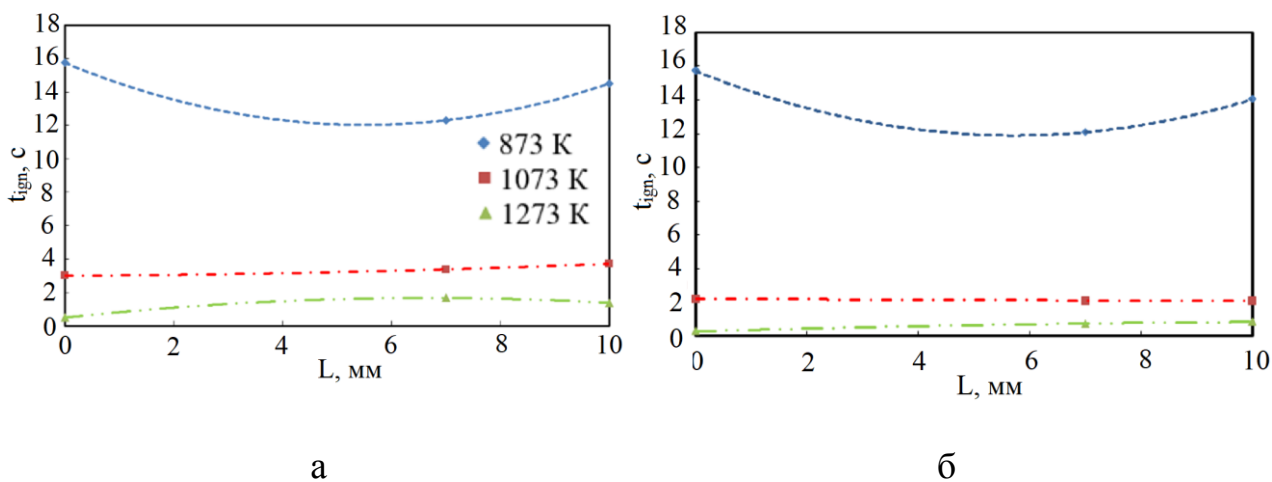


Рисунок 14 – Зависимости времён задержки зажигания частицы угля (а) и древесины (б) от среднего расстояния между ними при разных температурах окружающей среды

воспламенения частиц древесно–угольного смесевое топлива проведен сравнительный анализ характерных времен задержки зажигания, полученных теоретически и экспериментально. На Рисунке 15 приведены зависимости времен задержки воспламенения частиц древесно–угольной смеси в условиях высокотемпературного нагрева. Сравнительный анализ экспериментальных и полученных по результатам численного моделирования значений t_{ign} показал их хорошее соответствие. Отличие теоретических и экспериментальных значений времен задержки зажигания не превышает 8,5%.

В главе 6 приведены результаты теоретических исследований физико–химических процессов приводящих к секвестрованию оксидов азота (NO_x) и серы (SO_x) в индукционный период времени при воспламенении частиц композиционных топлив: древесно–угольного и водоугольного. Разработана гипотеза, описывающая эффект снижения концентрации NO_x и SO_x в продуктах сгорания ДУТ и ВУТ. Древесная биомасса и водоугольная суспензия являются существенно обводненными топливами. Соответственно,

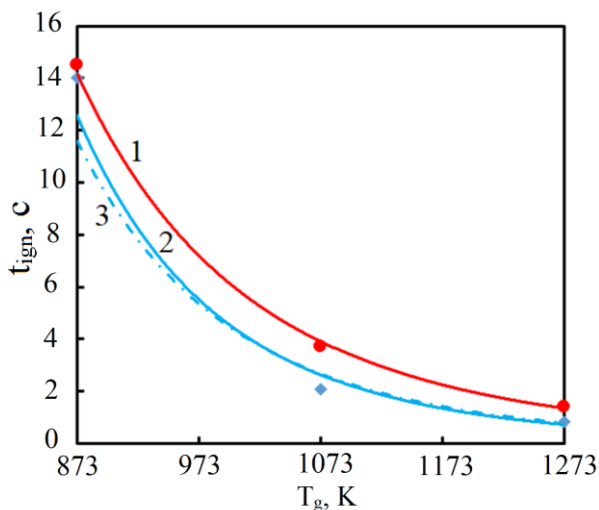


Рисунок 15 – Зависимости времен t_{ign} от T_g

при горении водяные пары, образующиеся при испарении свободной и связанной влаги, могут играть существенную роль в процессах подавления выбросов SO_x и NO_x . Предполагается, что в условиях высокотемпературного нагрева в пограничном слое частиц древесины и угля водяной пар вступает во взаимодействие с диоксидами серы и азота, образуя серную (H_2SO_4) и азотную (HNO_3) кислоты. При этом пары кислоты в период горения топлива вступают в термохимическое взаимодействие с

оксидом железа, содержащимся в минеральной части угля. В результате образуются сульфаты железа, которые улавливаются вместе со шлаком или золой. Математическая модель физико–химических процессов, протекающих в период индукции древесно–угольных топливных смесей по структуре уравнений соответствует постановке задачи зажигания (41) – (60). На Рисунке 16 приведены зависимости среднеобъемной массовой концентрации (Y_i) компонентов газовой смеси (NO , NO_2 , пары воды (H_2O) и азотной кислоты (HNO_3) – Рисунок 16а; SO , SO_3 , а также водяных (H_2O) и сернокислотных (H_2SO_4) паров – Рисунок 27б) от влагосодержания в топливной композиции в малой окрестности частиц.

$$\bar{Y} = \frac{1}{V} \iiint_V Y_i dV$$

V – объем газовой области вблизи поверхности частиц древесно–угольного топлива, м^3 ($\approx 0.7 \cdot 10^{-6} \text{м}^3$). Хорошо видно, что увеличение влажности приводит к снижению концентрации диоксида азота и трехоксида серы, при этом увеличивается концентрация азотной и серной кислот в малой окрестности топливных частиц. Это обусловлено тем, что водяные пары, формирующиеся при испарении внутрипоровой влаги, вступают в термохимическое взаимодействие с NO_2 и SO_3 , что приводит к образованию паров азотной и серной кислот. При этом можно отметить, что увеличение влагосодержания ϕ больше 20 % не приводит к существенному уменьшению \bar{Y}_{SO_3} и \bar{Y}_{NO_2} . Последнее, скорее всего, обусловлено тем, что в этих условиях достигается максимально возможная скорость термохимического взаимодействия диоксида азота с водяным паром.

Но существенное увеличение содержания влаги в древесине приводит и к повышению концентрации окиси азота (NO) и серы (SO) в малой окрестности частиц. Это объясняется тем, что при высоком влагосодержании существенно возрастает период индукции. В этих условиях интенсивность образования NO и SO также увеличивается. Анализ зависимостей на Рисунке 16а,б показывает, что увеличение ϕ приводит к повышению концентраций H_2O , H_2SO_4 (Рисунок 16б) и HNO_3 (Рисунок 16а) в продуктах сгорания смесевоего топлива. В этих условиях можно сказать, что водяной пар выступает в качестве абсорбирующего агента для триоксида серы и диоксида азота. Формирующаяся при термохимическом взаимодействии H_2O , NO_2 и SO_3 серная и азотная кислоты могут быть удалены посредством конденсации в специальных коррозионностойких теплообменниках, а также за счет взаимодействия с оксидами металлами (в частности с Fe_2O_3), содержащимися в минеральной части угля.

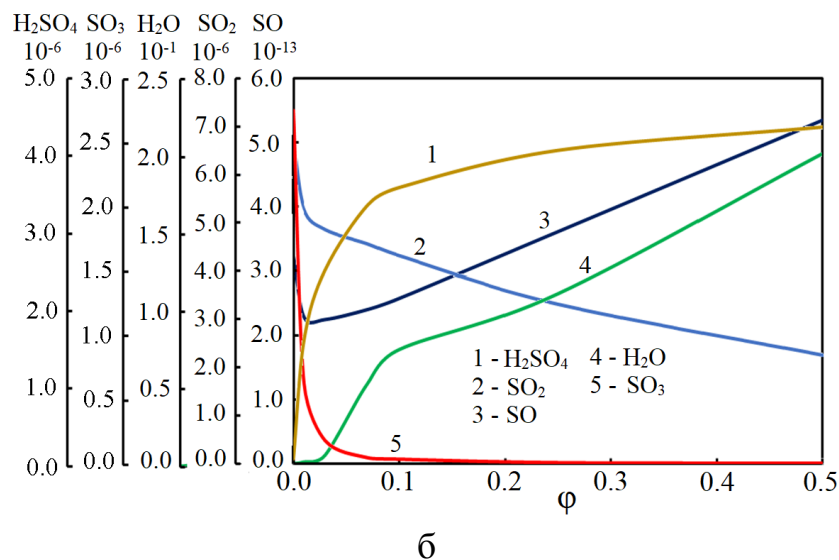
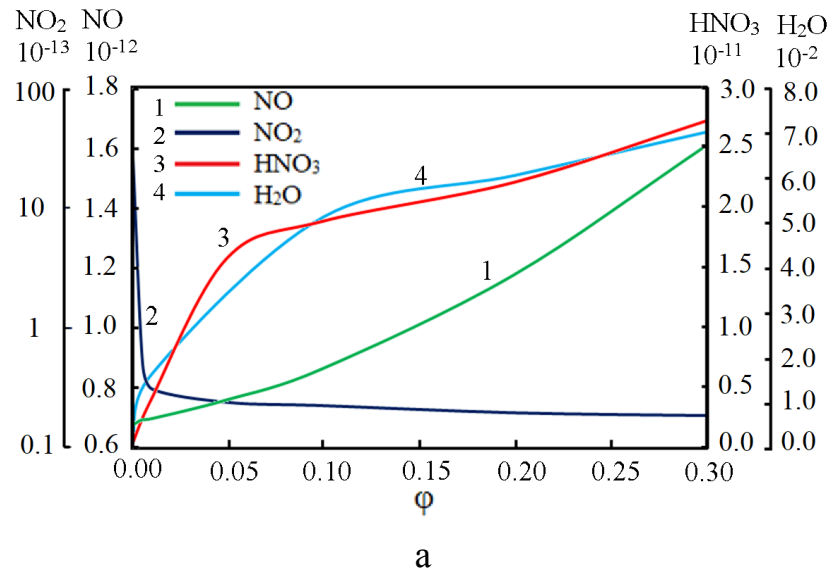


Рисунок 16 – Зависимость среднеобъемной концентрации компонента газовой смеси в момент воспламенения частиц композиционного топлива

В главе 7 приведено обоснование использования водоугольного топлива в качестве основного для паровых и водогрейных котлов. По результатам численного моделирования установлено, что при сжигании ВУТ в топочном пространстве существенно снижается интенсивность формирования золовых и шлаковых отложений на поверхностях нагрева по сравнению с процессами горения угольного топлива. Это приводит существенному снижению потерь тепла при передачи его от внутритопочной среды к внутритрубному теплоносителю, также существенно снижаются потери тепла с уходящими газами.

Предполагается, что в начальный момент времени ($\tau = 0$ с) трубная поверхность теплообмена пароперегревателя нагревается за счет конвекции и излучении топочных газов. С момента времени $\tau = \tau_{ssa}$ начинается процесс

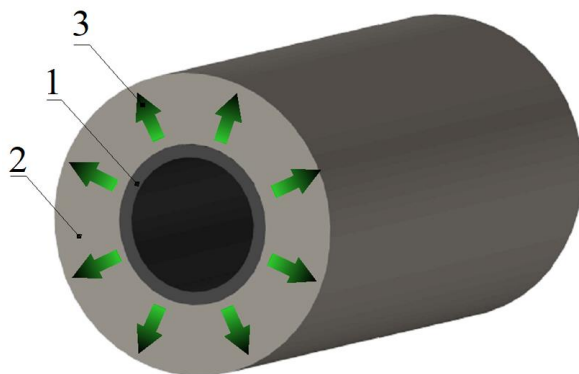


Рисунок 17 – Схема области решения задачи:

1 – стенка стальной трубы; 2 – слой золы; 3 – движение границы слоя золы

формирования золовых отложений. При этом на поверхности трубы формируется слой золы с низким

и коэффициентами теплопроводности (Рисунок 17). Предполагается, что температура золы, оседающей на трубу равна температуре точной среды. Для определения эффективности теплопередачи в системе «внутритрубная среда – стенка трубы – слой золы – внешняя среда» решалась задача теплопроводности.

Математическая модель, соответствующая вышеприведенной физической постановке задачи, включает следующую систему дифференциальных уравнений теплопроводности в частных производных:

– металлическая труба

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_1 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (63)$$

– слой золовых отложений

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_2 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]. \quad (64)$$

Изменение внешнего радиуса трубы (с учетом слоя отложений) рассчитывалось с использованием выражения:

$$r_{oda} = \int_0^{\tau} V_{rs} d\tau, \quad (65)$$

где $V_{rs} = W_{rs}/\rho_s$ – линейная скорость образования отложений, $W_{rs} = f(T)$ – массовая скорость осаждения золы кг/м²с. Система уравнений решалась при следующих краевых условиях. Начальные условия:

$$\tau = 0; \quad r_{idp} < r < r_{odp}; \quad 0 < \varphi < 2\pi; \quad 0 < z < L_z; \quad T(r, \varphi, z, 0) = T_0;$$

$$\tau = \tau_{ssa}; \quad r_{odp} < r < r_{oda}(\tau); \quad 0 < \varphi < 2\pi; \quad 0 < z < L_z;$$

$$T(r, \varphi, z, 0) = T_a.$$

На границе раздела системы «водяной пар – стенка трубы» учитывался конвективный теплообмен:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{id}} = \alpha [T_w - T(r_{id}, \varphi, z, \tau)]. \quad (66)$$

На границе раздела системы «поверхность трубы – топочная среда» при $\tau=0$ задавался закон теплообмена:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{sp}} = \alpha_{sp} [T_g - T(r_{sp}, \varphi, z, \tau)] + \varepsilon_{sp} \sigma [T_g^4 - T^4(r_{sp}, \varphi, z, \tau)]. \quad (67)$$

Аналогичные условия сформулированы и на границе системы «золотые отложения – газовая среда» при $\tau > \tau_{ssa}$:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = \alpha_i [T_g - T(r_i, \varphi, z, \tau)] + \varepsilon_i \sigma [T_g^4 - T^4(r_i, \varphi, z, \tau)] + Q_m \rho_{slag} \frac{d\xi_{mf}}{dt}, \quad (68)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} = 0, \quad (69)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}^{z=L_z} = 0. \quad (70)$$

На границе раздела системы «стенка трубы – золотые отложения» принято граничное условие 4–го рода:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (71)$$

$$T(r_{op}, \varphi, z) \Big|_{\substack{r=r_{op}-0 \\ 0 < \varphi < 2\pi \\ 0 < z < L}} = T(r_{op}, \varphi, z) \Big|_{\substack{r=r_{op}+0 \\ 0 < \varphi < 2\pi \\ 0 < z < L}}$$

Задача, решалась в три этапа. На первом, рассчитывался теплообмен в системе «дымовые газы – труба – теплоноситель». В момент времени $\tau = \tau_{ssa}$ начинался расчет процесса теплопередачи, протекающий в условиях осаждения золы. Учитывался процесс формирования слоя золы с высоким термическим сопротивлением. При этом температура золы принималось равной температуре внешней среды. В дальнейшем тепло от газовой среды к теплоносителю передается через трубную стенку и постоянно увеличивающийся слой золотых отложений. При решении задачи предполагалось, что процесс отложений заканчивается, когда температура поверхности золотых отложений становится равной T_{liquid} ($T_{liquid} = 1375$ К – температура плавления золы). Последнее обуславливается тем, что в жидком состоянии слой отложений перестает расти и жидкая зола стекает в холодную воронку котла. Тепловой баланс системы «дымовые газы – трубная поверхность – зола – теплоноситель» рассчитывался по следующей схеме. Для анализа эффективности теплопередачи через золотые отложения рассчитывалась теплота, отведенная внутритрубным теплоносителем:

$$Q_{hw} = \sum_{t=0}^t \sum_{\varphi=0}^{2\pi} \sum_{z=0}^{L_z} \left[a_t (T_w - T|_{r=r_{idp}}) r_{idp} h_{\varphi} h_z t \right]$$

Суммарное количество теплоты за счет конвекции и излучения от внешней среды к трубной поверхности:

$$Q_{h-rg} = \sum_{t=0}^t \sum_{\varphi=0}^{2\pi} \sum_{z=0}^{L_z} \left\{ \left[a_t (T_g - T|_{r=r_{odp}}) + \varepsilon \sigma (T_g^4 - T^4|_{r=r_{odp}}) \right] r_{idp} h_{\varphi} h_z t \right\}$$

После начала процесса осаждения золы суммарное количество теплоты, подведенное от внешней газовой среды:

$$Q_{h-rgs} = \sum_{t=0}^t \sum_{\varphi=0}^{2\pi} \sum_{z=0}^{L_z} \left\{ \left[a_t (T_g - T|_{r=r_{ods}}) + \varepsilon \sigma (T_g^4 - T^4|_{r=r_{ods}}) \right] r_{ods} h_{\varphi} h_z t \right\}$$

Теплота кристаллизации золотого расплава:

$$Q_{cd} = \sum_{t=0}^t \sum_{\varphi=0}^{2\pi} \sum_{z=0}^{L_z} \left\{ Q_m \rho_{slag} \frac{dr_s}{dt} r_{ods} h_{\varphi} h_z t \right\}$$

Тепло, накопленное в материале стенок трубы за счет теплоемкости:

$$Q_{aht} = \sum_{r=r_{dp}}^{r=r_{odp}} \sum_{\varphi=0}^{2\pi} \sum_{z=0}^{L_z} \left\{ C_1 \rho_1 [T - T_0] (r_i^2 - r_{i-1}^2) h_{\varphi} h_z \right\}$$

Тепло, аккумулированное в слое золы за счет теплоемкости:

$$Q_{ahs} = \sum_{r=r_{odp}}^{r=r_{ods}} \sum_{\varphi=0}^{2\pi} \sum_{z=0}^{L_z} \left\{ C_s \rho_s [T - T_0] (r_i^2 - r_{i-1}^2) h_{\varphi} h_z \right\}$$

Погрешность теплового баланса трубы (без отложений) рассчитывалась из следующего выражения:

$$E = \frac{Q_{h-rg} - Q_{hw} - Q_{aht}}{Q_{h-rg}} 100$$

Тепловой баланс системы «водяной пар – стенка труба – слой золы – топочная среда» рассчитывался из выражения:

$$E = \frac{Q_{h-rgs} - Q_{hw} - Q_{aht} - Q_{ahs} + Q_{cd}}{Q_{h-rgs} + Q_{cd}} 100$$

На Рисунке 18 приведены зависимости величины теплового потока ($q(t)$ Вт/(м²К)) от внутренней стенки трубы к теплоносителю (пар) в условиях формирования отложений золы на поверхностях теплообмена. Температура топочной среды в случае сжигания угля варьировалась в диапазоне 1400...1700 К, при горении ВУТ $T=800...1200$ К. Анализ кривых показывает, что в период времени до $\tau \approx 5 \cdot 10^3$ с сжигание угля более эффективно по сравнению с водоугольным топливом. Это обусловлено тем, что температура факела угля намного выше, чем у ВУТ. Однако при формировании золотых отложений на трубной поверхности интенсивность теплопередачи при сжигании угля снижается. Последнее объясняется тем, что при налипании золы образуется слой, обладающий высоким термическим сопротивлением. В результате, по истечению периода времени $\tau \approx 5 \cdot 10^3$ с тепловой поток от внутрикотловой среды к теплоносителю при сжигании водоугольного топлива начинает превышать значение $q(t)$ в пылеугольной топке. Если температура факела ВУТ меньше T_g угля, хотя бы на 500 К, то эффективность передачи теплоты у пылеугольной топки будет выше, чем у водоугольной. Анализ влияния процессов кристаллизации расплава золы при его осаждении на поверхности нагрева показал, что им можно пренебречь при расчете характеристик теплообмена. Это объясняется малой величиной теплового эффекта фазового перехода (≤ 100 кДж/кг).

В заключении подведены основные итоги диссертационного исследования и сформулированы соответствующие выводы.

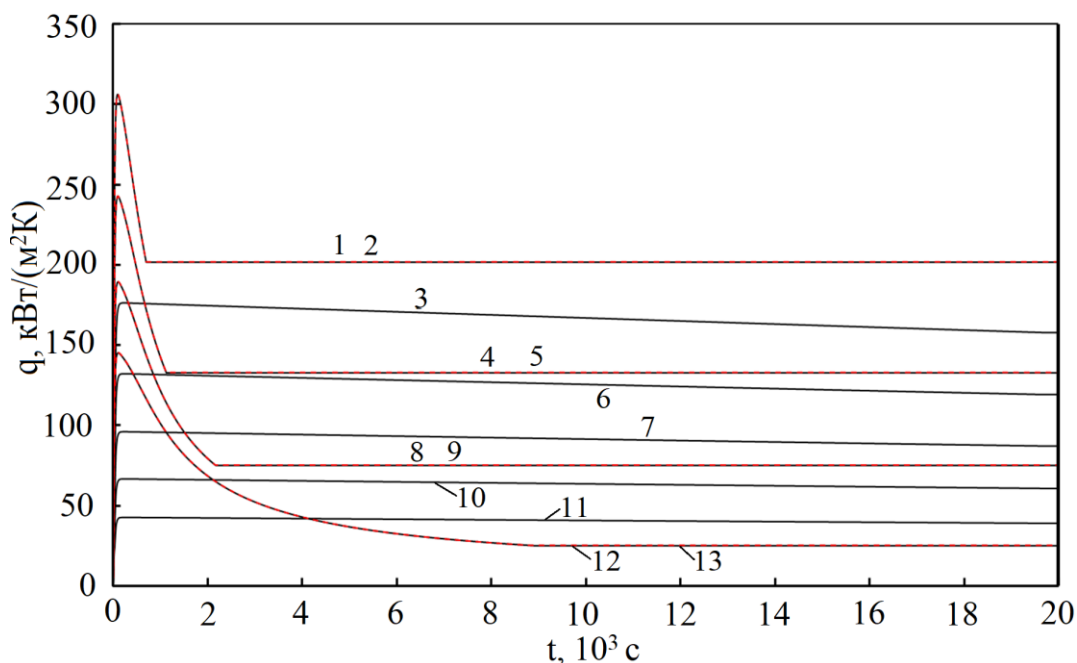


Рисунок 18 – Зависимость значений теплового потока от внутренней стенки трубы к теплоносителю от времени работы котельного агрегата при температуре окружающей среды:

1, 2 – $T_g = 1700$ К; 3 – $T_g = 1200$ К; 4, 5 – $T_g = 1600$ К; 6 – $T_g = 1100$ К; 7 – $T_g = 1000$ К; 8, 9 – $T_g = 1500$ К; 10 – $T_g = 900$ К; 11 – $T_g = 800$ К; 12, 13 – $T_g = 1400$ К; (1, 2, 4, 5, 8, 9, 12, 13) – сжигание угля; (3, 6, 7, 10, 11) – ВУТ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1. Впервые разработана инженерная прогностическая модель, детально описывающая комплекс физико – химических и теплофизических процессов, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы, взаимодействие газообразных и твердых продуктов пиролиза между собой и с окислителем) превращений при воспламенении и горении существенно неоднородных композиционных топлив на основе угля, предназначенная для обоснования выбора конструктивных и технологических параметров при проведении опытно-конструкторских работ по созданию котельных установок, сжигающих композиционные топлива.

2. По результатам диссертационного исследования разработан полностью автономный инженерный прогностический аппарат, отличающийся от известных моделей детальным описанием в рамках моделей механики сплошной среды процессов зажигания и горения частиц существенно неоднородных композиционных топлив на основе угля, в условиях интенсивного радиационно–конвективного нагрева в типичном для современной котельной техники температурном диапазоне внешней среды от 800 К до 1500 К. Разработанные модели комплексно описывают процессы радиационно–конвективно–кондуктивного теплопереноса, фильтрацию газообразных продуктов пиролиза и водяных паров сквозь пористую

структуру топлива, фазовые переходы (испарение воды и жидкого горючего), термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы (в условиях сложноразветвлённой кинетики), диффузию летучих в малой окрестности топливных частиц, газофазное воспламенение парогазовой смеси (с учетом сложности кинетической схемы реагирования), гетерогенное окисление углерода кокса, протекающих при воспламенении и горении частиц композиционных топлив на основе угля.

3. Разработаны автономные программные комплексы, для проведения инженерных расчетов характеристик и условий процессов зажигания и горения частиц многокомпонентных, существенно неоднородных и высокообводненных композиционных топлив в условиях, соответствующих (по температуре внешней среды $800 < T_g < 1500 \text{K}$) камерам сгорания типичных котельных агрегатов ТЭС.

4. По результатам экспериментальных и теоретических исследований процессов зажигания установлены предельные режимы воспламенения капель (в начальном состоянии), а затем частиц (после подсушивания приповерхностного слоя топлива) существенно неоднородных композиционных топлив на основе угля в условиях интенсивного радиационно-конвективного нагрева. Показано, что для стабильного воспламенения капель (в начальном состоянии), а затем частиц (после подсушивания приповерхностного слоя) композиционных топлив минимальная температура внутритопочного пространства должна составлять не менее 750K .

5. По результатам математического моделирования процесса зажигания частиц композиционных топлив показано, что существенная детализация кинетических схем термохимических реакции взаимодействия летучих с окислителем и термического разложения не оказывает значимого влияния на прогнозирование условий и характеристик процесса зажигания: отклонение расчетных значений времен задержки зажигания при выборе той или иной кинетической схемы не превышает $1,5\%$. Асимптотический анализ показал, что время непосредственного интенсивного реагирования газообразных продуктов пиролиза с кислородом воздуха составляет не более 2% от всего периода индукции. Соответственно, при проведении опытно-конструкторских работ по проектированию камер сгорания котельных агрегатов, сжигающих композиционные топлива, для расчета процессов зажигания применимы «простые» кинетические схемы реагирования летучих с окислителем.

6. Разработана и обоснована (по результатам теоретических исследований) гипотеза, описывающая теплофизические и термохимические процессы (протекающие в малой окрестности и во внутриводной структуре частиц композиционного топлива), приводящих к секвестрованию оксидов азота и серы, в результате термохимического реагирования водяных паров с оксидами серы и азота, и формировании в результате этих реакции серной и азотной кислот. Показано, что при влажности древесины $\approx 5\%$ происходит значительное снижение концентрации SO_x (в 6 раз) и NO_x (в 3 раза) в

продуктах сгорания древесно-угольного топлива, по сравнению с процессами сжигания однородного угля.

7. Приведено фундаментальное обоснование экономических преимуществ сжигания водоугольного топлива в топочных устройствах котельных агрегатов ТЭС по сравнению с однородным углем. По результатам моделирования процессов теплопередачи от внутритопочной среды к теплоносителю (водяной пар или вода) установлено, что интегральный коэффициент использования теплоты сгорания у водоугольных котельных агрегатов по крайней мере не ниже аналогичных коэффициентов пылеугольных котлов. Показано, что при сжигании водоугольных топлив при температуре внешней среды $T_g=1200\text{K}$ и однородного угля при $T_g=1400\text{K}$ эффективность сжигания ВУТ в 2 раза выше по сравнению со сжиганием однородного угля.

Автор выражает благодарности научному консультанту – доктору физико–математических наук, профессору Гению Владимировичу Кузнецову, а также доктору технических наук, профессору Саломатову Владимиру Васильевичу за обсуждение результатов выполненных исследований и полезные рекомендации при подготовке рукописи диссертации.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miller V.G. Clean Coal Engineering Technology. Elsevier Science. 2016. pp 750.
2. Зельдович Я.Б. К теории зажигания, Докл. АН СССР. 150:2 1963, 283–285.
3. Франк–Каменецкий Д. А. Горение угля // Успехи химии. — 1938. — Т. 7. — № 9. — С. 1277–1311.
4. Н. Н. Семёнов. Тепловая теория горения и взрывов (рус.) // Успехи физических наук. — Российская академия наук, 1940. — Т. XXIII, вып. 3. — С. 251—292.
5. Делягин Г.Н. Вопросы теории воспламенения и горения распыленной водоугольной суспензии // Кинетика и аэродинамика процессов горения топлив / ИГИ. – М.: Наука, 1969. – С.111–127.
6. Щинников П.А., Овчинников Ю.В., Францева А.А., Бойко Е.Е. Кинетическая модель процесса горения тонкодисперсного водоугольного топлива в котлах с циклонным предтопком//Энергетика и Теплотехника: сб. науч. трудов (под редакцией П.А. Щинникова). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. Вып. 22. – С. 106–116.
7. Vorobiev N., Becker A., Kruggel–Emden H., Panahi A., Levendis Y.A., Schiemann M. Particle shape and Stefan flow effects on the burning rate of torrefied biomass. Fuel. 210 (2017) 107–120.

ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (14):

1. **Сыродой, С.В.** Численное моделирование зажигания частиц водоугольного топлива / Г.В. Кузнецов, В.В. Саломатов, С.В. Сыродой // Физика горения и взрыва – 2015. – Т.51. – №4. – с.12–18. = **Syrodoy, S.V.** Numerical simulation of ignition of particles of a coal–water fuel / G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov, S.V. Syrodoy // Combustion, Explosion and Shock Waves – 2015. – V.51. – №4. – p. 409–415).
2. **Сыродой, С.В.** Иницирование горения покрытых водяной пленкой частиц угля в потоке высокотемпературного воздуха / А.В. Захаревич, Г.В. Кузнецов, В.В. Саломатов, П.А. Стрижак, С.В. Сыродой // Физика горения и взрыва – 2016. – Т.52. – №5. – с. 62–74. = **Syrodoy, S.V.** Initiation of combustion of coal particles coated with a water film in a high-temperature air flow / Zakharevich, A.V., Kuznetsov, G.V., V.V. Salomatov, P.A. Strizhak, S.V. Syrodoy // Combustion, Explosion and Shock Waves – 2016. – V.52. – №5. – p. 550–561).
3. **Сыродой, С.В.** Влияние диффузии продуктов пиролиза угля на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива / Г.В. Кузнецов, В.В. Саломатов, С.В. Сыродой // Физика горения и взрыва – 2018. – Т.54. – №6. – с. 30–40. = **Syrodoy, S.V.** Effect of Diffusion of Coal Pyrolysis Products on the Ignition Characteristics and Conditions of Coal–Water Fuel Droplets / G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov, S.V. Syrodoi // Combustion, Explosion and Shock Waves – 2018. – V.54. – №5. – p. 654 – 663).
4. **Сыродой, С.В.** Воспламенение частиц влажной древесной биомассы в условиях конвективной диффузии водяных паров в пристенной области / Г.В. Кузнецов, В.В. Саломатов, С.В. Сыродой // Физика горения и взрыва – 2018 – Т.54. – №3. – с. 82–95. = **Syrodoy, S.V.** Ignition of Particles of Wet Woody Biomass under Convective Diffusion of Water Vapor in the Near-Wall Region / G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov, S.V. Syrodoi // Combustion, Explosion and Shock Waves 2018 – V.54. – №3. – p. 325 – 336).
5. **Сыродой, С.В.** Влияние кинетической схемы пиролиза на прогностические оценки характеристик процесса воспламенения частицы древесной биомассы/ Г.В. Кузнецов, С.В. Сыродой // Физика горения и взрыва – 2019 – Т.55. – №2. –с. 82–96. = **Syrodoy, S.V.** Effect of the Kinetic Model of Pyrolysis on Prognostic Estimates of Ignition Characteristics of Wood Particles / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoi // Combustion, Explosion and Shock Waves – 2019 – V.55. – №2. – p.197–209)
6. **Сыродой, С.В.** Эволюция во времени температуры капли композиционного жидкого топлива при взаимодействии с потоком нагретого воздуха / Д.О. Глушков, А.В. Захаревич, П.А. Стрижак, С.В. Сыродой // Теплофизика и Аэромеханика – 2016. – Т.23. – №6. –с. 923–934. = **Syrodoy, S.V.** Evolution of temperature of a droplet of liquid composite fuel

- interacting with heated airflow / D.O. Glushkov, A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak, S.V. Syrodoy // *Thermophysics and Aeromechanics* – 2016. – V.23 – №6. – p. 887–898)
7. **Сыродой, С.В.** Теплоперенос в частице водоугольного топлива на стадии "термической" подготовки / Кузнецов Г.В., Саломатов В.В. Сыродой С.В. // *Теплофизика и Аэромеханика* – 2016. – Т.23. – №4. – с. 627–636. = **Syrodoy, S.V.** Heat and mass transfer in a coal-water fuel particle at the stage of "thermal" treatment/ G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov, S.V. Syrodoi // *Thermophysics and Aeromechanics* – 2016. – V.23 – №4. – p. 603–612)
 8. **Сыродой, С.В.** Влияние степени метаморфизма угля на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива / Сыродой С.В. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В // *Теплофизика и Аэромеханика* – 2018. – Т.25. – №5. – с. 805 – 820. = **Syrodoy, S.V.** Influence of the degree of coal metamorphism on characteristics and conditions of ignition of coal-water fuel drops/ V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy // *Thermophysics and Aeromechanics* – 2018. – V.25 – №5. – p. 773 – 788)
 9. **Сыродой, С.В.** Влияние радиационно–конвективного теплопереноса на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива. / Сыродой С.В. // *Теплофизика и Аэромеханика* – 2018. – Т.25. – №3. – с. 447–462. = **Syrodoy, S.V.** The influence of radiative-convective heat transfer on ignition of the drops of coal-water fuel / S.V. Syrodoy // *Thermophysics and Aeromechanics* – 2018. – V.25 – №3. – p. 429 – 443)
 10. **Сыродой, С.В.** Влияние фильтрационного теплопереноса на характеристики и условия воспламенения частиц водоугольного топлива / В.В. Саломатов, С.В. Сыродой // *Теплофизика и Аэромеханика* – 2019. – Т.26. – №5. – с. 795 – 812. = **Syrodoy, S.V.** Influence of filtration heat transfer on parameters and conditions for ignition of coal-water fuel particles / S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov // *Thermophysics and Aeromechanics* – 2019. – V.26 – №5. – p. 745 – 760.)
 11. **Сыродой, С.В.** Влияние форм частиц на характеристики воспламенения водоугольного топлива / С.В. Сыродой, Г.В. Кузнецов, В.В. Саломатов // *Химия твердого топлива* – 2015. – Т.49 – №6. – с. 28–34. = **Syrodoy, S.V.** Effect of the shape of particles on the characteristics of the ignition of coal–water fuel / S.V. Syrodoi, G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov // *Solid Fuel Chemistry* – 2015. – V.49 – №6. – p. 365 – 371
 12. **Сыродой, С.В.** Зажигание капель водоугольного топлива в потоке воздуха / А.В. Захаревич, В.В. Саломатов, П.А. Стрижак, С.В. Сыродой // *Химия твердого топлива* – 2016. – Т.50 – №3. – с. 25 – 29. = **Syrodoy, S.V.** Ignition of the drops of coal–water fuel in a flow of air / A.V. Zakharevich, V.V. Salomatov, P.A. Strizhak, S.V. Syrodoi // *Solid Fuel Chemistry* – 2016. – V.60 – №3. – p. 163 – 166.
 13. **Сыродой, С.В.** Влияние теплофизических свойств водоугольного топлива на условия его воспламенения / С.В. Сыродой, Г.В. Кузнецов, А.В. Захаревич, В.В. Саломатов // *Химия твердого топлива*. – 2017. – Т.51 – №3. – с.31–37. = **Syrodoy, S.V.** Influence of the temperature dependence of the

thermophysical properties of coal–water fuel on the conditions and characteristics of ignition / S.V. Syrodoi, G.V. Kuznetsov, A.V. Zakharevich, V.V. Salomatov // Solid Fuel Chemistry – 2016. – V.51 – №3. – p. 160 – 165.).

14. **Сыродой, С.В.** Влияние условий теплообмена на характеристики зажигания частиц водоугольного топлива / Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Саломатов В.В.// Теплоэнергетика – 2015. – Т.62 – №10. – с.16 – 21. = Syrodoi, S.V. Influence of the temperature dependence of the thermophysical properties of coal–water fuel on the conditions and characteristics of ignition / S.V. Syrodoi, G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika) – 2015. – V.62 – №10. – p. 703 – 707.).

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ (11):

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016616180 Российская Федерация. Расчет минимальных температур для устойчивого зажигания водоугольных и органоводоугольных топлив / С.В Сыродой, П.А. Стрижак; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2016613718; заявл. 18.04.2016; опубл 07.07.2016. – 1 с.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016616283 Российская Федерация. Расчет времени задержки зажигания одиночных капель органоводоугольных топлив с внешней пленкой воды при стоке тепла на спай термопары/ С.В Сыродой, П.А. Стрижак; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2016613724; заявл. 18.04.2016; опубл. 08.07.2016. – 1 с.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016616284 Российская Федерация. Расчет распределения температуры в капле органоводоугольного топлива в процессе нагрева в среде окислителя/ С.В Сыродой, П.А. Стрижак; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2016613723; заявл. 18.04.2016; опубл. 08.07.2016. – 1 с.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017618877 Российская Федерация. Оценка влияния скорости фазовых превращений и термического разложения на характеристики зажигания капли композиционного топлива/ С.В Сыродой, Г.В. Кузнецов, Д.О. Глушков; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2017615758; заявл. 19.07.2017; опубл. 10.08.2017. – 1 с.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

- 2017619188 Российская Федерация. Изучение движения фронтов фазовых переходов при зажигании капли композиционного топлива/ С.В Сыродой, Г.В. Кузнецов, Д.О. Глушков; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2017615760; заявл. 19.07.2017; опубл. 16.08.2017. – 1 с.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021661622 Российская Федерация. Расчет характеристик и условий зажигания капель водоугольного топлива в условиях высоких температур и давлений/ С.В Сыродой, Д.Ю. Малышев; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2021660874; заявл. 12.07.2021; опубл. 14.08.2021. – 1 с.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021661779 Российская Федерация. Расчет времени задержки зажигания частиц влажной древесной биомассы/ С.В Сыродой; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2021660890; заявл. 09.07.2021; опубл. 15.07.2021. – 1 с.
22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021661794 Российская Федерация. Программа по анализу интенсивности образования антропогенных оксидов азота при сжигании древесно-угольных топливных смесей/ С.В Сыродой, Н.А. Нигай; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2021660697; заявл. 09.07.2021; опубл. 15.07.2021. – 1 с.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021661959 Российская Федерация. Программа по анализу интенсивности образования антропогенных оксидов серы при сжигании древесно-угольных топливных смесей/ С.В Сыродой, Н.А. Нигай; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2021660813; заявл. 09.07.2021; опубл. 20.07.2021. – 1 с.
24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021662566 Российская Федерация. Программа по оценке влияния расстояния между частицами древесины и угля на характеристики их совместного воспламенения/ С.В Сыродой, Ж.А. Косторева; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – №

2021661649; заявл. 26.07.2021; опубл. 02.08.2021. – 1 с.

25. 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.

Статьи в журналах и материалах конференций, входящих в международные базы Scopus и/или Web of Science:

26. **Syrodoy, S.V.** The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, A.V. Zhakharevich, N.Y. Gutareva, V.V. Salomatov // *Combustion and Flame* – 2017. – №180. – p. 196–206.
27. **Syrodoy, S.** Effect of high–temperature gas flow on ignition of the water–coal fuel particles / V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva // *Combustion and Flame*. – 2019. – №203. – p. 375–385.
28. **Syrodoy, S.V.** Justification of the use of forest waste in the power industry as one of the components OF BIO–coal–water suspension fuel / G.V. Kuznetsov, D.Yu Malyshev, S.V. Syrodoy, N.Yu Gutareva, M.V. Purin, Zh.A. Kostoreva // *Energy* – 2022. – №239. – 121677.
29. **Syrodoy, S.V.** The ignition of the bio water–coal fuel particles based on coals of different degree metamorphism/ G.V. Kuznetsov, D.Yu. Malyshev, Zh.A. Kostoreva, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva // *Energy* – 2020. – №201. – 117701.
30. **Syrodoy, S.V.** Ignition of bio–water–coal fuel drops / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva, M.V. Purin // *Energy* – 2020. – №203. – 117808.
31. **Syrodoy, S.V.** Mathematical model simulating the ignition of a droplet of coal water slurry containing petrochemicals / G.V. Kuznetsov, D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, S.V. Syrodoy // *Energy* – 2018. – №150. – p. 262 – 275.
32. **Syrodoy, S.V.** Ignition of the wood biomass particles under conditions of near–surface fragmentation of the fuel layer / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva, A.A. Kostoreva, Zh.A. Kostoreva // *Fuel* – 2019. – №252. – p. 19–36.
33. **Syrodoy, S.V.** Effect of concentration and relative position of wood and coal particles on the characteristics of the mixture ignition process / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, A.A. Kostoreva, Zh.A. Kostoreva, N.A. Nigay // *Fuel* – 2020. – №274. – p. 117843.
34. **Syrodoy, S.V.** Ignition of coal–water fuel particles under the conditions of intense heat / V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // *Applied Thermal Engineering* – 2016. – №106. –p.561–569.
35. **Syrodoy, S.V.** Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio–water–coal suspensions. Ignition stage /

- S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, D.Yu. Malyshev, N.Yu. Gutareva, N.A. Nigay // Applied Thermal Engineering –2020. – №170. –p.115034.
36. **Syrodoy, S.V.** Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high–temperature medium / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva // Renewable Energy – 2020. – № 145. – p. 1474–1486.
 37. **Syrodoy, S.V.** Ignition of promising coal–water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects / D.O. Glushkov, S.V. Syrodoy, A.V. Zhakharevich, P.A. Strizhak // Fuel Processing Technology – 2016. – №148. – p. 224–235.
 38. **Syrodoy, S.V.** Justification of the possibility of car tires recycling as part of coal–water composites/ G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, M.V. Purin, A.V. Zenkov, D.V. Gvozdyakov, K.B. Larionov // Journal of Environmental Chemical Engineering – 2021. – №9. –p. 104741.
 39. **Syrodoy, S.V.** Mathematical and physical modeling of the coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface / V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva // Energy Reports – 2020. – №6. – p. 628–643.
 40. **Syrodoy, S.V.** Characteristics and conditions for ignition of bio–coal mixtures based on coal and forest combustible material / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Yu. Gutareva, Zh.A Kostoreva, A.A. Kostoreva, N.A. Nigay // Journal of the Energy Institute – 2020. – 93. – p. 1978–1992.
 41. **Syrodoy, S.V.** Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces / S.V. Syrodoy, J.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, L.I. Asadullina // Journal of the Energy Institute – 2020. –№93. – p. 443 – 449.
 42. **Syrodoy, S.V.** The efficiency of heat transfer through the ash deposits on the heat exchange surfaces by burning coal and coal–water fuels / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva, V.V. Salomatov // Journal of the Energy Institute – 2018. – 91. –p.1091–1101
 43. **Syrodoy, S.V.** The effect of the distance between wood and coal particles on the characteristics of their joint ignition under conditions of hightemperature radiation–convective heating / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, ZhA. Kostoreva, D.V. Malyshev, N. Yu Gutareva // Journal of the Energy Institute – 2021. – №97. – p.13 – 26.
 44. **Syrodoy, S.V.** Mathematical modeling of the thermochemical processes of nitrogen oxides sequestration during combustion of wood–coal mixture particles / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N. Yu Gutareva, N.A. Nigay // Journal of the Energy Institute – 2021. – №96. – p. 280–293.
 45. **Syrodoy, S.V.** Choice of the Kinetic Scheme of Oxidation Reactions of the Gaseous Products of Coal Pyrolysis during Induction Period at Ignition of the Water–Coal Fuel Particles / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, N.Yu. Gutareva // Energy & Fuels – 2019. –V. 33. – №11. – p. 11617–11629.
 46. **Syrodoy, S.V.** A Mathematical Model for Processes in Coal – Water Slurries Containing Petrochemicals under Heating / S.V. Syrodoy, D.O. Glushkov,

- G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Energy & Fuels – 2018. – V.32 – №8. – p. 8789–8802.
47. **Syrodoy, S.V.** Ignition of a group of the woody biomass particles / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, Zh.A. Kostoreva, I.K. Zabrodina, D.Yu. Malyshev // Thermal Science and Engineering Progress – 2021. – №25 – p.101017.
48. **Syrodoy, S.V.** Conditions of the Water–Coal Fuel Drop Dispersion at Their Ignition in the Conditions of High–Temperature Heating / V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // Combustion Science and Technology – 2019. – V.191. – №12. – p. 2162–2184.
49. **Syrodoy, S.V.** The Conditions and Characteristics of Wood Particles Ignition in the Stream of the High Temperature Gases / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva, K.A. Bugaeva, R.I. Taburchinov // Combustion Science and Technology – 2018. – V. 190 – №4. –p. 663–686.
50. **Syrodoy, S.V.** Ignition of bio–water–coal fuels based on coal and charcoal / G.V. Kuznetsov, D.Yu. Malyshev, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva, M.V. Purin, Zh.A. Kostoreva // Combustion Science and Technology – 2020 Ahead – of – Print. DOI: 10.1080/00102202.2020.1799203.
51. **Syrodoy, S.V.** Influence of Forest Combustible Material on the Characteristics and Conditions of Ignition of Bio–coal Water Fuels / G.V. Kuznetsov, D.Yu. Malyshev, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva, Zh.A. Kostoreva // Combustion Science and Technology – 2021 Ahead – of – Print. 1–21 DOI: 10.1080/00102202.2021.1968384.

Подписано к печати 21.02.2022.
Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 2,10.
Заказ 22-22. Тираж 100 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ