

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Пурин Михаил Владимирович

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

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

Сыродой Семен Владимирович

Томск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление	2
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЖИГАНИИ ПЕЛЛЕТ, КАПЕЛЬ И ЧАСТИЦ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ТОПЛИВ.....	12
Выводы по главе 1	19
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЖИГАНИИ ПЕЛЛЕТИЗИРОВАННОГО ТОПЛИВА.....	21
2.1 Тепломассоперенос при воспламенении угольной пеллеты в условиях радиационно-конвективного теплового воздействия.....	21
2.2 Воспламенение топливных пеллет в условиях радиационно-конвективно-микроволнового теплового воздействия.....	36
Выводы по главе 2	39
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЖИГАНИИ ЧАСТИЦЫ ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО И МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА.....	41
3.1 Решение задачи прогрева топливной частицы до инициирования процесса испарения внутрипоровой воды	46
3.2 Решение задачи сушки частицы древесины в условиях сложного теплового воздействия...49	
3.3 Решение задачи зажигания частицы древесины	63
Выводы по главе 3	71
ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЖИГАНИИ КАПЛИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА	72
4.1 Сравнительный анализ процессов тепломассообмена при зажигании и горении капель водоугольных топлив, выполненных из природного и торрефицированного (коксовый остаток) углей	72
4.2 Математическое моделирование процессов зажигания капель водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания газотурбинных установок (высокие температуры и давления).....	88
Выводы по главе 4.....	102
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	106

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Методы численного решения поставленных в работе задач воспламенения пеллетизированного (глава 2) и водоугольного (глава 4, параграф 4.2) топлив	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Условные обозначения	126

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивая и независимая энергетика является фундаментом безопасности любого государства. Анализ энергетического рынка последних лет позволяет сделать вывод о том, что попытки внедрения в глобальную энергетику так называемых нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) – ветрогенераторов [1], солнечных панелей [2], приливных электростанций [3] и т. п. – оказались безуспешными. Это обусловлено рядом весомых причин, среди которых можно выделить зависимость данных источников энергии от погодных условий и времени года. Кроме того, стоит отметить длительный срок окупаемости подобных проектов [4].

В свете этого обстоятельства традиционные источники энергии, такие как уголь и древесина, продолжают оставаться актуальными. Электростанции, функционирующие на таком топливе [5], характеризуются стабильной производительностью в течение всего года и не подвержены влиянию погодных условий.

Доля угольной энергетики в России сохраняет свою стабильность и демонстрирует тенденцию к росту в обозримом будущем [5]. Уголь играет ключевую роль в энергетическом секторе, являясь одним из основных источников тепловой и электрической энергии [6]. В настоящее время угольные электростанции составляют значительную часть энергетической системы страны, обеспечивая стабильное и надёжное энергоснабжение населения и промышленности. Угольные месторождения на территории России являются одними из крупнейших в мире, что позволяет стране полностью обеспечивать себя собственным сырьём для производства электроэнергии [7].

Одним из ключевых аспектов, способствующих активному применению угля в энергетической отрасли России, является его относительная доступность в сравнении с альтернативными видами топлива, такими как газ или нефть [8, 9].

Однако использование угля в энергетике имеет ряд негативных последствий для окружающей среды. Сжигание угля на электростанциях сопровождается выбросом в атмосферу вредных веществ, таких как диоксид серы, оксиды азота и тяжелые металлы. Эти вещества негативно влияют на природу и здоровье людей [10]. Кроме того, добыча угля часто осуществляется с нарушением экологических стандартов, что приводит к разрушению природных экосистем и загрязнению водных ресурсов [11-13].

Древесина также занимает важное место в современной энергетике [14]. Она представляет собой один из древнейших и наиболее доступных источников энергии, который человечество использует уже очень давно [14, 15].

Одной из главных причин, по которой древесина является столь значимым ресурсом для производства энергии, является её возобновляемость. Древесина – это природный ресурс, который можно воспроизводить, высаживая новые леса [16, 17]. В отличие от нефти или угля, древесина не истощится со временем, что делает её особенно ценным ресурсом для генерации энергии.

Кроме того, древесина обладает рядом экологических преимуществ. В процессе её сжигания не выделяются вредные для окружающей среды вещества, такие как сера или азотные соединения [18]. Более того, использование древесины в энергетике способствует снижению выбросов парниковых газов, так как при её сгорании выделяется только углекислый газ, который впоследствии поглощается растениями [19].

Древесина также является относительно дешёвым видом топлива. Её добыча и переработка, а также восстановление лесов обходятся гораздо дешевле, чем добыча, обработка и транспортировка нефти или угля [20]. Благодаря этому использование древесины позволяет снизить затраты на производство энергии и, как следствие, сделать её более доступной для потребителей.

В современном мире древесина представляет собой важный и многообещающий источник энергии. Очевидно, что необходимо продолжать разработку энергоэффективных технологий для более эффективного использования этого природного ресурса в производстве электроэнергии и тепла.

Обращение с отходами деревообработки в России – это актуальная проблема, которая возникает в процессе производства и переработки древесины. Ежегодно в стране образуется огромное количество отходов, которые требуют правильной утилизации и переработки [21, 22]. Одним из основных способов решения проблемы отходов деревообработки в России является их повторное использование. Восстановление и переработка отходов могут привести к созданию новых строительных материалов, тепловой энергии или биотоплива. Например, опилки и щепа могут быть использованы в производстве плит и панелей, а обрезки и обломки древесины – в производстве биотоплива [23, 24]. Такой подход не только минимизирует негативное воздействие на окружающую среду, но и способствует более рациональному использованию природных ресурсов.

В целом, повторное использование и переработка отходов деревообрабатывающей промышленности в России являются важными направлениями развития отрасли. Внедрение современных и эффективных технологий позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду, обеспечить рациональное использование природных ресурсов, а также уменьшить затраты на хранение и переработку отходов, а также на производство электроэнергии и тепла [25, 26].

Однако следует отметить, что моделей, описывающих горение древесных частиц, значительно меньше, чем моделей, посвященных горению угля. Для оптимизации процессов горения угольных и древесноугольных топлив необходимо разработать единую физико-математическую теорию, которая будет описывать процессы тепло- и массопереноса при воспламенении и горении частиц топлива в среде окислителя. Создание такой теории представляет собой сложную задачу, включающую целый комплекс физических и химических аспектов. Среди них особое внимание заслуживает анализ возможности внутрипорового воспламенения топлива.

Важно отметить, что современные математические модели не учитывают ряд важных факторов, таких как влияние высоких давлений окислителя и использование микроволнового излучения для повышения эффективности

процесса горения. Кроме того, они учитывают лишь ограниченное число химических реакций, протекающих во время прогрева, воспламенения и горения топлива.

Научно-техническая проблема. Отсутствие математических моделей и методов решения соответствующих задач тепломассопереноса при зажигании и горении группы перспективных композитных топлив в условиях, соответствующих топочным устройствам котельных агрегатов ТЭС. В настоящее время в мировой научной литературе отсутствуют публикации, представляющие теоретические результаты исследований процессов зажигания топливных частиц (угля, биомассы и др.) под действием сложного радиационно-конвективного и микроволнового нагрева.

Цель работы. Разработка математического аппарата, позволяющего с высокой достоверностью прогнозировать процессы тепломассопереноса, протекающие в период, предшествующий воспламенению частиц топливных композиций, изготовленных из угля и древесной биомассы, и описывающего процессы тепло- и массопереноса, происходящие при интенсивных термохимических и фазовых трансформациях во внутрипоровой структуре топлива и в пристенной газовой области в условиях сложного радиационно-конвективно-микроволнового теплового воздействия.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Создание физических и математических моделей, которые с высокой точностью описывают процессы тепло- и массопереноса в течение индукционного периода нагрева в угольных пеллетах, с учётом комплекса термохимических реакций, протекающих в пористой структуре топливных пеллет и во внешней среде окислителя;

2. Разработка математической модели, которая отражает процессы тепломассопереноса при термической подготовке и воспламенении влажных частиц древесной биомассы, в условиях сложного комбинированного конвекционно-радиационного и микроволнового нагрева, а также создание аналитического решения для соответствующей задачи;

3. Обоснование по результатам теоретических и экспериментальных исследований возможности использования коксового остатка в качестве базовой компоненты водоугольного топлива. Разработка математической модели процесса тепломассопереноса при зажигании капли водоугольного топлива, выполненного на основе коксового остатка;

4. Разработка математической модели процессов тепло- и массообмена во время термической подготовки и воспламенения капель (на начальном этапе нагрева), а также отдельных частиц (после испарения поверхностного слоя влаги) водоугольного топлива при высоких температурах и давлениях;

5. Разработка алгоритмов решения поставленных задач и их программная реализация на языке высокого уровня.

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

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

Достоверность. Определяется проведением сравнительного анализа теоретических и экспериментальных данных, полученных в ходе выполнения экспериментальных исследований, проводившихся с целью проверки математических моделей. Для проведения экспериментальных исследований были использованы современные стенды с минимальными методическими погрешностями.

Также достоверность результатов исследований обеспечивается проверкой консервативности используемых разностных схем, и сопоставлением результатов решения группы тестовых задач на менее сложных постановках задач тепломассопереноса с известными данными.

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту.

1. Зажигание угольных пеллет в результате внутрипорового реагирования кислорода, выделяющегося при термическом разложении органической части угля, с твёрдыми (углерод коксового остатка) и газообразными (летучие) продуктами пиролиза угля невозможно в условиях нагрева, соответствующих топочным устройствам (температуры внутрикотловой среды $T_g = 873-1273$ К) котельных агрегатов ТЭС;

2. Аналитическое решение задачи зажигания частиц влагонасыщенной древесной биомассы применительно к низкотемпературным (в диапазоне температур окислителя $T_g = 650-850$ К) топкам котлов в условиях комбинированного радиационно-конвективного и микроволнового нагрева;

3. Обоснована возможность использования коксового остатка каменного угля в качестве базовой горючей компоненты водоугольного топлива;

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

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

Связь работы с научными программами и грантами.

Исследования проводились в рамках выполнения работ по проектам:

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

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

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

Апробация работы. Основные положения, перечисленные в диссертационной работе, были представлены на следующих научных конференциях и опубликованы в соответствующих сборниках докладов:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Публикации. Научные результаты, представленные в диссертации, приведены в 4 статьях, опубликованных в международных журналах, индексируемых базами «Scopus» и «Web of Science» и входящими в Q1 и Q2: «Energy» [27], «Combustion and Flame» [28, 29], «Combustion Science and Technology» [30], а также в 1 статье в журнале, включённом Высшей аттестационной комиссией России в перечень изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук: «Химическая Физика» [31]. Получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [32].

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

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЖИГАНИИ ПЕЛЛЕТ, КАПЕЛЬ И ЧАСТИЦ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ТОПЛИВ

Математическому описанию процессов тепломассопереноса при зажигании и горении угля посвящено достаточно много работ. В первую очередь стоит отметить работу советского физика Д.А. Франк-Каменецкого [33], в которой ещё в 1938 году была сформулирована математическая модель зажигания угольных частиц. Автор [33] показал, что процесс окисления угля является сложным многостадийным процессом, состоящим из множества связанных стадий, в состав которых входит инертный нагрев, термическая декомпозиция угля, сопровождающаяся выходом летучих, перемешивание выделившихся горючих веществ с кислородом воздуха и воспламенение.

Надо отметить, что, несмотря на активное изучение процессов горения угля и древесины, до сих пор не создана автономная математическая модель, которая описывала бы весь комплекс протекающих при термической подготовке и зажигании угольной частицы процессов. Стоит отметить работы [34-36], посвящённые математическому моделированию гетерогенного воспламенения угля.

В статье [34] авторы сформулировали математические модели воспламенения частиц угольной пыли нагретыми керамическими частицами с целью анализа безопасности промышленных производств в широком диапазоне температур окислителя. Учитывались процессы теплопередачи и массопереноса, а также некоторые химические реакции и геометрическая форма нагретых частиц. При моделировании отслеживалось также смещение положения точки воспламенения частиц в зависимости от параметров нагретых частиц. Авторы [34] отмечают сложную взаимосвязь химических и физических процессов, которая не была достаточно исследована их предшественниками. В ходе исследования было выявлено, что при одинаковых теплофизических характеристиках материала

минимальная температура воспламенения частицы зависит от её исходной температуры. Также установлено, что по мере понижения температуры нагревательного источника зона воспламенения смещается от боковой поверхности угольных частиц к их верхней части.

В статье [34] рассматриваются режимы зажигания одиночной частицы угля в среде кислорода и углекислого газа, а также кислорода и азота с целью более экономичного и экологичного сжигания угольного топлива. Авторы анализировали закономерности зажигания частицы угля в различных средах, используя результаты экспериментальных исследований и аппарат математического моделирования. Математическая модель основывалась на расширенном механизме термохимического взаимодействия.

Работа [35] посвящена теоретическому анализу влияния размера угольных частиц, концентраций кислорода и температур среды на характеристики зажигания частиц высокосольных и высоковлажных угольных топлив. Предложенная математическая модель учитывала значительное число факторов. Авторы [35] дают по результатам проведённых теоретических исследований рекомендации по сжиганию низкосортных индийских углей.

В статье [36] рассматривалось воспламенение изолированных угольных частиц в различных условиях. Использовалась одномерная переходная математическая модель воспламенения с несколькими критериями зажигания с учётом выхода летучих. По результатам проведённых исследований авторами даются рекомендации по выбору критерия зажигания при различных условиях.

В [37] проведено численное исследование процесса термического разложения и рассчитаны времена задержки воспламенения угля. В предложенной математической модели были проанализированы семь реакций, при этом рассматривался механизм выхода летучих при термическом разложении. Подробное математическое описание процесса выхода летучих при математическом моделировании приводится также в статье [38].

Работы по исследованию и внедрению водоугольного топлива в энергетику начались еще в прошлом веке [39, 40]. В отечественной научной литературе

достаточно полно показаны практические перспективы использования ВУТ в энергетике [41-44], но необходимо отметить, что при этом на сегодняшний день не существует общей автономной теории зажигания капель водоугольных топлив, которая бы рассматривала весь комплекс протекающих при этом процессов.

В статьях [45-51] авторами исследованы общие стадии зажигания капель водоугольных топлив, такие как предварительный прогрев, испарение влаги, термическое разложение органической части топлива с последующим выходом летучих, формирование твёрдого углеродного каркаса, а также термохимическое взаимодействие летучих с кислородом воздуха. Авторы работ [45-48] предлагают математические модели, основанные на разделении всего процесса зажигания капель водоугольного топлива на четыре стадии (нагрев капли до температуры испарения, испарение влаги, пиролиз органической части угля с выделением летучих, формирование твёрдого углеродного каркаса с последующим воспламенением). Такой подход позволяет значительно упростить процесс моделирования. Аналогичный подход используют авторы статьи [52].

Теоретические исследования горения капли ВУТ в потоке воздуха приводятся в статье [53], при этом автор [53] делает вывод о пониженной температуре воспламенения капли водоугольного топлива вне зависимости от типа угля, на основе которого она выполнена. Также в [53] отмечается существенное влияние воды на процесс зажигания капли и описывается процесс образования сухого углеродного каркаса в процессе испарения влаги капли. Можно сказать, что в [53] предлагается физическая модель зажигания капли ВУТ, суть которой сводится к тому, что фронт испарения воды, образовавшийся на поверхности капли при прогреве её до температуры кипения, продвигается вглубь частицы. При этом формируются зоны термического разложения органической составляющей, сопровождающиеся выходом летучих, и зоны реагирования летучих с окислителем воздуха. При достижении критических значений температур и концентраций летучих в небольшой окрестности частицы инициируется процесс зажигания и горения газовой смеси.

Разработанные на сегодняшний день модели зажигания капель водоугольного топлива имеют ряд допущений, позволяющих упростить задачу. Например, в работе [54] математическая постановка задачи базируется на решении балансового уравнения энергии для сферической капли топлива. Авторы при этом полагают, что испарение влаги идёт во всем объёме топливной капли, что не соответствует действительности.

Брайан Сполдинг в своей работе [55], сформулировав математическую модель процесса воспламенения частицы угля, выделяет несколько весьма характерных допущений, которые являются причиной различий результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Во-первых, Б. Сполдинг отмечает, что радиус частицы в процессе её горения считают уменьшающимся, что неверно с точки зрения физики протекания процесса горения. Дело в том, что в процессе горения на частице образуется слой золы, который также влияет на протекание рассматриваемого процесса, так как он затрудняет доступ окислителя к нагретой поверхности частицы и препятствует выходу летучих.

Во-вторых, согласно Б. Сполдингу, необходимо учитывать некоторое увеличение размеров частицы, её «разбухание» за счёт выходящих из неё при термическом разложении газов. Также, согласно [55], неверным является предположение о равенстве концентраций окислителя в атмосферном воздухе и в пристеночном слое газов, окружающих частицу топлива.

Отметим работу [56], в которой авторы используют теорию «сжимающегося ядра». Согласно данной теории, топливо в частице ВУТ окружает сухой зольный каркас. При этом авторы [56] не учитывают термическое разложение органической составляющей топлива и выход горючих газов. Также авторы [56] считают плотность топлива постоянной и не зависящей от температуры.

В работах [57, 58] авторы рассматривают одновременное течение процессов термической подготовки и зажигания топлива. При этом учитывается совокупность ряда наблюдаемых процессов, таких как конвективный нагрев, нагрев за счёт теплового излучения, испарение влаги и термическая декомпозиция. При этом в

статье [58] предполагается, что зажигание топливной частицы происходит в очень малой области вокруг самой частицы, при этом перенос продуктов пиролиза через эту зону не рассматривался.

Значимость изучения диффузионных процессов при зажигании твёрдых топливных частиц подтверждается в работах [59, 60]. В то же время, диффузионные процессы, происходящие при зажигании капель жидкого топлива, также являются крайне важными.

В статье [61] приведена математическая модель воспламенения капли водоугольного топлива с добавлением нефти. Авторы данной статьи рассматривают зажигание как совокупность совместно протекающих сложных процессов тепло- и массообмена, происходящих в условиях интенсивных термодинамических (испарение влаги и жидких углеводородов) и термохимических (термическое разложение органической части угля и нефти, совместное реагирование водяных паров с углеродным каркасом частицы) превращений.

Интерес представляет и сжигание ВУТ при высоком давлении среды. Такая технология может быть применена, например, при использовании водоугольного топлива в двигателях внутреннего сгорания [62-64]. Несмотря на известные экспериментальные исследования, работ, посвящённых математическому моделированию процессов сжигания ВУТ под высоким давлением, не так много [65]. При этом стоит отметить, что данная научная проблема все ещё достаточно актуальна.

Вопрос о горении древесины изучается давно. Много работ посвящено экспериментальному изучению горения древесных топлив [66-70]. Однако же стоит отметить, что значительная часть работ, изучающих горение древесины, рассматривают данный процесс с точки зрения пожарной безопасности [67, 69].

Среди теоретических исследований горения древесины можно отметить статьи [71, 72]. Авторы статьи [71] разделяют физическую постановку задачи на 5 этапов: нагрев древесного материала, его сушка, пиролиз древесины с образованием сухого коксового каркаса и выходом летучих, зажигание и горение

пиролизных газов и горение коксового каркаса. Данный подход аналогичен подходу, представленному в [57, 58]. Однако при этом авторы [71] рассматривают режим горения как диффузионный и учитывают интенсивность протекания гетерогенных химических реакций окисления конденсированных продуктов пиролиза древесины.

В статье [72] автор рассматривает термическую подготовку и зажигание частиц древесины. Модель [72] основывается на законах сохранения массы, энергии, количества движения и уравнении состояния. Горение древесины подразделяется на три режима: кинетический, при котором скорость горения определяется интенсивностью протекающих гетерогенных химических реакций; диффузионный, при котором скорость горения определяется интенсивностью диффузии кислорода воздуха; и режим разрушения древесины, обусловленный растрескиванием твёрдых продуктов пиролиза, уносом частиц кокса и их догоранием в воздухе [72].

Известно, что основная трудность при математическом моделировании горения древесины – это ее неоднородность, которая существенно отличает условия теплопереноса в древесине от теплопереноса в однородных материалах. Известные модели горения древесины [73, 74] имеют ряд допущений. К примеру, в работе [73] авторами не бралась в расчёт неоднородность температурного поля в процессе термической деструкции древесины.

В статье [74] представлена математическая модель, в которой учитывались испарение влаги внутри пор древесины, процессы пиролиза и выделение летучих веществ в области прилегания к стенкам. При этом предполагается, что воспламенение происходит в газовой фазе. Испарение влаги рассматривалось как химическая реакция, однако одним из допущений было то, что испарение происходит по всему объёму частицы, а не только в её фронте. Также не рассматривалось охлаждение пристеночного газового слоя за счёт вдува в него продуктов пиролиза древесины.

Известно, что уголь и биомасса содержат значительное количество влаги [75, 76], что создает трудности при их использовании в качестве энергетического

топлива. Биомассу и уголь необходимо предварительно осушить, то есть удалить внутрипоровую влагу путем испарения.

Классификация видов сушки биомассы подробно описана в статье [77]. Выделяют несколько способов промышленного осушения древесины: ротационное, ультразвуковое, а также сушка с использованием электромагнитных волн. Эффективность ротационной и ультразвуковой сушки древесины невысока (влажность древесины не опускается ниже 42-48%) [77, 78]. Сушку с использованием электромагнитных волн разделяют на индукционный нагрев (используются электромагнитные колебания промышленной частоты), микроволновый нагрев (используется высокочастотное излучение) и инфракрасный нагрев [77, 79].

На практике методы сушки древесины с использованием индукционного нагрева и инфракрасного излучения широкого применения не нашли. Согласно [77], при индукционной сушке древесина осушается неравномерно, при этом в ее структуре появляются внутренние напряжения и перегревы. Себестоимость такой сушки весьма высока. Недостатком же инфракрасной сушки является низкая проникающая способность инфракрасных волн в нагреваемом объекте.

Известно [80], что при СВЧ сушке древесины максимум температур приходится на центр нагреваемого объекта, создавая тем самым оптимальные условия для диффузии водяных паров из глубинных слоев древесины к ее поверхности. В литературе по этой проблеме представлен ряд статей, описывающих результаты экспериментальных исследований СВЧ сушки древесины. Например, в статье [80] представлены распределения температур при сушке пиломатериалов в СВЧ установке. Авторами исследована зависимость параметров нагрева и осушения от расположения древесины в камере. В статье [81] приведено описание сушки древесины в сушильной камере, при этом контроль процесса сушки осуществлялся резонансным методом стоячей волны. Авторы [82] исследуются резонансные явления при СВЧ сушке древесины. Рассматривается нагрев в диапазоне сверхвысоких частот и сопутствующие этому физические процессы. Приведено исследование плазменного зажигания ацетилен-воздушной

смеси с использованием СВЧ излучения [83]. Показано увеличение скорости распространения пламени при данном методе зажигания. Результаты изучения СВЧ излучения применительно к розжигу тощих углей представлены в статье [84]. Авторы [84] сделали вывод о существенной интенсификации процесса горения при использовании СВЧ горелки по сравнению с обычными горелочными устройствами. Практическое использование микроволновой плазмы для получения синтез-газа из биомассы обсуждается в работе [85]. Авторами [85] даны рекомендации по выбору оптимальной мощности СВЧ излучения и конструкции реактора. Получение синтез-газа при помощи микроволнового излучения также приведено в статье [86]. Вопросы практического применения микроволнового излучения в химической технологии также обсуждаются в исследовании [87], где данное излучение используется при гидрировании биодизеля.

Стоит сказать, что, несмотря на достаточное количество экспериментальных работ, в которых изучался процесс сушки древесины, а также работ, посвящённых исследованиям электромагнитных основ процесса СВЧ сушки, в настоящее время в мировой научной литературе практически полностью отсутствуют работы, направленные на математическое моделирование сушки древесины с использованием СВЧ излучения. Математическое описание упомянутой выше задачи приведено, например, в статье [29] и диссертационной работе [88]. При этом анализ вышеприведённых источников показывает актуальность данной темы и интерес к ней со стороны мирового научного сообщества.

Выводы по главе 1

1. Проведённый анализ литературных научных источников показал, что, несмотря на значительный вклад в теоретические исследования процессов зажигания и горения частиц угля, на настоящее время отсутствует единая общепризнанная теория воспламенения и горения частиц угля или композитных топлив на его основе, например, угольных пеллет. Разработанные к настоящему времени достаточно сложные математические модели не учитывают ряд важных

физических процессов. В частности, до сих пор не описана возможность внутрипорового зажигания в результате термохимического реагирования образующихся при термическом разложении углерода коксового остатка и кислорода (выделяется в качестве одного из компонентов летучих). Последнее очень важно при описании процессов зажигания относительно крупных угольных частиц или пеллет. Таких моделей до настоящего времени не создано;

2. Также надо отметить, что проведённый анализ научной литературы показал практически полное отсутствие на настоящее время данных о процессах зажигания и горения топливных частиц в условиях сложного радиационно-конвективного и микроволнового нагрева. Последнее особенно актуально при разработке новых эколого-перспективных технологий топливосжигания, необходимых для обоснования энергетического использования низкосортных и высоковлажных топлив;

3. Дополнительно, обзор литературы показывает, что в современной мировой научной периодике отсутствуют публикации, содержащие теоретические или экспериментальные результаты оценки влияния давления внешней окислительной среды на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива (ВУТ). При этом ВУТ считается перспективным топливом для двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок. Однако к настоящему времени отсутствует теория процессов зажигания и горения капель ВУТ в условиях высоких давлений внешней среды.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЖИГАНИИ ПЕЛЛЕТИЗИРОВАННОГО ТОПЛИВА

2.1 Тепломассоперенос при воспламенении угольной пеллеты в условиях радиационно-конвективного теплового воздействия

Рассматривается задача зажигания угольной пеллеты в высокотемпературной среде окислителя (кислорода воздуха). При моделировании процессов тепло и массопереноса принята следующая физическая постановка задачи: в начальный момент времени топливная пеллета помещается в высокотемпературную окислительную среду (окислитель – кислород), где нагревается вследствие излучения и конвекции (рисунок 2.1).

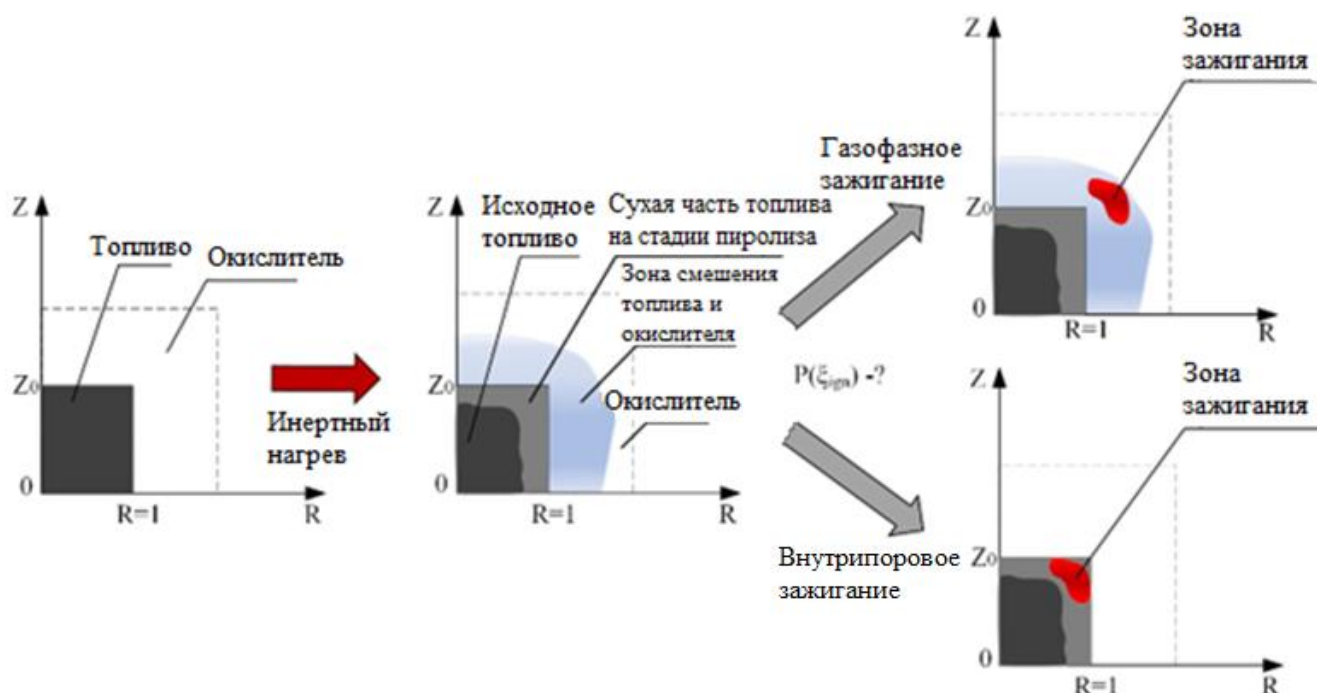


Рисунок 2.1 – Физическая постановка задачи

Инертный нагрев вызывает термическое разложение органической части угля. В результате этого процесса выделяются газообразные продукты термической деструкции (летучие вещества), такие как монооксид и диоксид углерода (CO и CO_2), метан (CH_4), водород (H_2) и другие. Эти летучие компоненты, вместе с

водяными парами, проходят через пористую структуру угля и вступают в термохимические реакции с коксовым остатком, образуя вторичные продукты реакции. Образующиеся газообразные продукты реакций термического разложения и взаимодействия попадают в малую (по объёму) пристенную окрестность топливной пеллеты, что способствует их активному перемешиванию с воздухом. Дополнительное тепло, поступающее от внешнего источника, нагревает парогазовую смесь. При выполнении условий воспламенения по Д.А. Франк-Каменецкому [89] и Я.Б. Зельдовичу [99] считается, что произошло зажигание. Предполагается, что инициирование горения может происходить как внутри структуры пеллеты, так и в её пограничном слое.

Математическая постановка задачи представляет собой систему нестационарных дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных переменных Франк-Каменецкого [89]. Эта модель предполагает использование ряда допущений, упрощающих процесс моделирования:

1. Используется плоская постановка задачи. В данном случае область решения ограничена осями R (радиус) и Z (вертикальная ось). При такой постановке задачи подвод тепла по оси цилиндра симметричен, то есть различия в температуре, концентрации компонентов газовой смеси и скорости движения газовой смеси по угловой координате минимальны;

2. Областью решения задачи считается половина цилиндра. В этом случае на оси цилиндра выполняются условия симметрии;

3. Схема пиролиза угля ступенчатая с параллельными реакциями [90];

4. При описании процесса переноса энергии излучения принято одnogрупповое приближение;

5. Принято считать, что основными компонентами газообразных продуктов пиролиза, определяющими динамику воспламенения, являются метан (CH_4), монооксид углерода (CO), водород (H_2).

Уравнение энергии для топливной пеллеты:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Ho \left(\frac{\partial U_g \theta}{\partial R} + \frac{\partial V_g \theta}{\partial Z} \right) + \frac{A_c}{M_c^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2} = \frac{K_R^2}{Fk} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R A_c \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(A_c \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \right] + Po, \quad (2.1)$$

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

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

Распределение температур в газовой области, прилегающей к поверхности топливной пеллеты, описывается аналогичным уравнением энергии, дополнительно учитывающем перенос энергии излучением в пристенной зоне пеллеты и термохимическое реагирования газообразного горючего и окислителя:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Ho \left(\frac{\partial U_g \theta}{\partial R} + \frac{\partial V_g \theta}{\partial Z} \right) + \frac{A_g}{M_c^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2} = \frac{K_R^2}{Fk} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R A_g \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(A_g \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \right] + Po + div \Gamma, \quad (2.2)$$

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

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

Скорости движения парогазовой смеси в приграничном слое топлива определялись при решении системы уравнений [91], записанных в переменных «функция тока-вихрь» [92]:

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Xi}{\partial \tau} + \frac{\partial U_g \Xi}{\partial R} + \frac{\partial V_g \Xi}{\partial Z} = \frac{1}{Re} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \Xi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Xi}{\partial Z^2} - \frac{\Xi}{R^2} \right] + \frac{K_R Ri}{\theta_g - \theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial R}, \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \Psi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} - \frac{2}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} = -\Omega R, \quad (2.4)$$

$$\text{где} \quad U_g = \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial Z};$$

$$V_g = -\frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R};$$

$$\Xi = \frac{\partial V_g}{\partial R} - \frac{\partial U_g}{\partial Z};$$

$$R \in 0 \dots R_g; \quad Z \in 0 \dots Z_g.$$

Интенсивность теплового излучения вблизи композитной топливной пеллеты рассчитывалась при решении уравнения переноса энергии излучения [93]:

$$\Phi \frac{d\Gamma}{dS} = -Bu\Gamma + \frac{Bu\Gamma}{\pi}. \quad (2.5)$$

Постановка задачи предполагает, что продукты термического разложения совместно с водяными парами фильтруются сквозь сухой пористый каркас, охлаждая его и реагируя с углеродом коксового остатка. Распределение давления

(Н) в топливных пеллетах рассчитывалось из решения уравнения пьезопроводности [94]:

$$\frac{\partial PH}{\partial \tau} + \frac{P}{M_g^2} \frac{\partial^2 H}{\partial \tau^2} = \frac{K_R^2}{Le^H} \left[\frac{\partial}{\partial R} \left(R A_g \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(A_g \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \right] + Po, \quad (2.6)$$

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

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

Скорости парогазовой смеси определялись из дифференциальных выражений закона Дарси:

$$U_g = - \frac{1}{Da} \frac{\partial H}{\partial R}, \quad (2.7)$$

$$V_g = - \frac{1}{Da} \frac{\partial H}{\partial Z}. \quad (2.8)$$

Процесс термической декомпозиции органической части угля описывался основным уравнением химической кинетики [95]:

$$\frac{d\eta}{d\tau} = (1 - \eta) Y \exp\left(\frac{\theta \gamma}{1 + \beta \theta}\right). \quad (2.9)$$

При моделировании процесса термического разложения угольной пеллеты принята кинетическая схема [90], приведённая на рисунке 2.2.

Для расчёта значений концентраций основных составляющих парогазовой смеси в приграничном слое топлива решались уравнения диффузии для соответствующего компонента реакции:

$$\frac{\partial P Y_i}{\partial \tau} + Ho \left(\frac{\partial U_g P Y_i}{\partial R} + \frac{\partial V_g P Y_i}{\partial Z} \right) + \frac{D_i}{M_g^2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial \tau^2} = \frac{Le}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R D_i \frac{\partial P Y_i}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(D_i \frac{\partial P Y_i}{\partial Z} \right) + Po, \quad (2.10)$$

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

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

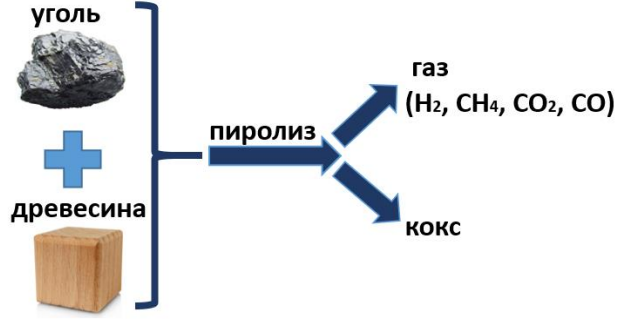


Рисунок 2.2 – Схема пиролиза [90]

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

$$\frac{\partial PY_i}{\partial \tau} + Ho \left(\frac{\partial U_g PY_i}{\partial R} + \frac{\partial V_g PY_i}{\partial Z} \right) + \frac{D_i}{M_g^2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial \tau^2} = \frac{Le}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R D_i \frac{\partial PY_i}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(D_i \frac{\partial PY_i}{\partial Z} \right) + Po, \quad (2.11)$$

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

$$\text{где } Po = \sum Y_i \exp\left(\frac{\theta \gamma}{1 + \beta \theta}\right) + \sum P_i \exp\left(\frac{\theta \gamma}{1 + \beta \theta}\right) \prod Y_i + \sum (1 - \eta) \exp\left(\frac{\theta \gamma}{1 + \beta \theta}\right) + M \delta(H_2O).$$

Система уравнений (2.1) – (2.11) была решена при следующих начальных условиях (рисунок 2.3):

$$t = 0 \rightarrow \begin{cases} \theta = \theta_0^c, \{R, Z\} \in \Omega_1 \\ \theta = \theta_0^g, \{R, Z\} \in \Omega_2 \\ \{Y_i\} = \Psi = \Xi = 0, \{R, Z\} \in \Omega_2 \end{cases}, \quad (2.12)$$

и граничных условиях (рисунок 2.3):

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=0, Z \in 0 \dots Z_g} = \left. \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right|_{Z=0, R \in 0 \dots R_g} = \left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} \right|_{R=R_g, Z \in 0 \dots Z_g} = \left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right|_{Z=Z_g, R \in 0 \dots R_g} = 0, \quad (2.13)$$

$$\left. \frac{\partial Y}{\partial R} \right|_{R=0, Z \in 0 \dots Z_0} = \left. \frac{\partial Y}{\partial Z} \right|_{Z=0, R \in 0 \dots R_g} = \left. \frac{\partial^2 Y}{\partial R^2} \right|_{R=R_g, Z \in 0 \dots Z_0} = \left. \frac{\partial^2 Y}{\partial Z^2} \right|_{Z=Z_g, R \in 0 \dots R_g} = 0, \quad (2.14)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial R} \right|_{R=0, Z \in 0 \dots Z_0} = \left. \frac{\partial H}{\partial Z} \right|_{Z=0, R \in 0 \dots 1} = H|_{\Omega_1 \cap \Omega_2} = 0. \quad (2.15)$$

На внешней границе области решения задачи ($\partial \Omega_2$) выполняются так называемые «мягкие» граничные условия [96]. На границе раздела системы «топливная пеллета – внешняя среда» заданы граничные условия сопряжения для уравнений теплопроводности и диффузии (рисунок 2.3):

$$\left. \frac{\partial \theta_g}{\partial \bar{n}} \right|_{\partial \mathbb{I}} = K_\lambda^g \left. \frac{\partial \theta_g}{\partial \bar{n}} \right|_{\partial \mathbb{I}} + Ki(\tau), \quad (2.16)$$

$$\theta|_{\partial \mathbb{I}+0} = \theta|_{\partial \mathbb{I}-0}, \quad (2.17)$$

$$Ki(\tau) = Sk \left. \frac{d\Gamma}{d\bar{n}} \right|_{\partial \mathbb{I}}, \quad (2.18)$$

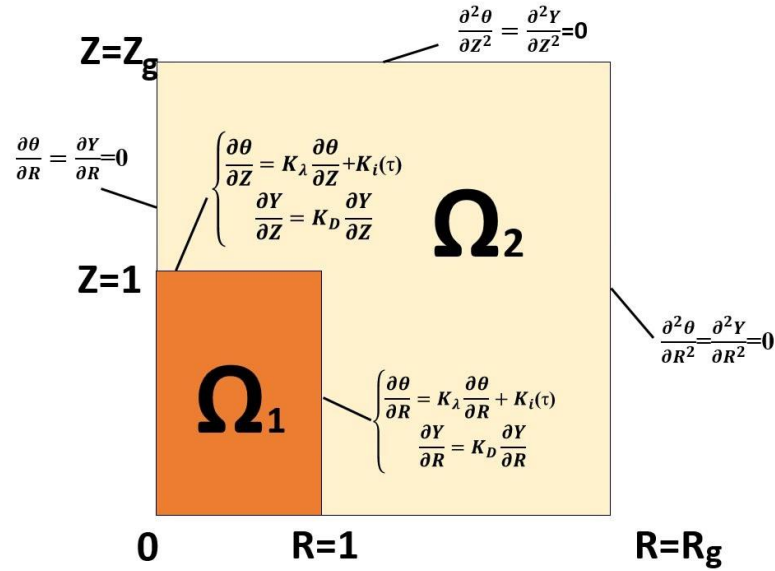
$$\left. \frac{\partial Y_i}{\partial \bar{n}} \right|_{\partial \mathbb{I}} = K_D^g \left. \frac{\partial Y_i}{\partial \bar{n}} \right|_{\partial \mathbb{I}}, \quad (2.19)$$

$$Y|_{\partial \mathbb{I}+0} = Y|_{\partial \mathbb{I}-0}, \quad (2.20)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial Z} \right|_{\substack{R=1 \\ X \in 0 \dots Z_g}} = RU_g, \quad (2.21)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial R} \right|_{\substack{R=1 \\ X \in 0 \dots Z_g}} = -RV_g, \quad (2.22)$$

$$\Xi|_{\partial \mathbb{I}} = \frac{\partial V_g}{\partial R} - \frac{\partial U_g}{\partial Z}. \quad (2.23)$$



Ω_1 – область, соответствующая топливной пеллете, Ω_2 – область, соответствующая внешней газовой среде

Рисунок 2.3 – Область решения задачи

Теплопроводность, теплоёмкость и плотность среды определялась аналогично [97, 98]. Коэффициент диффузии многокомпонентной смеси определялся по формуле Уилки [98]:

$$D_i = \frac{1 - Y_i}{\sum_{i \neq k} \frac{Y_i}{D_{i-k}}}. \quad (2.24)$$

При формулировании задачи предполагалось, что основные химические реакции протекают в пограничной зоне угольной пеллеты и внутри пористой структуры угля. Эти реакции связаны с окислением трёх ключевых продуктов пиролиза: водорода, метана и оксида углерода. При проведении моделирования принята кинетическая схема окисления газообразных продуктов термического разложения, приведённая в [97]. Воспламенение происходит при достижении критических температур и концентраций горючих компонентов. Предполагалось, что воспламенение может происходить не только в пристеночной области пеллеты, но и в её внутрипоровом пространстве. При этом в качестве критерия зажигания выступает достижение одного из следующих условий:

1) во-первых, считалось, что зажигание произошло, если температура в системе «угольная пеллета – внешняя среда» начинает превышать температуру внешней окислительной среды, другими словами, устанавливается нулевой градиент температуры. Это критерий Зельдовича [99].

2) во-вторых, предполагается, что момент зажигания наступил, когда скорость притока теплоты за счёт термохимического реагирования горючего и окислителя начинает превалировать над скоростью притока теплоты от внешнего источника (то есть окислительной среды). Другими словами, выполняется критерий Семёнова [100].

$$\sum_{i=1}^N Q_i \rho \prod_m Y_m \exp\left(-\frac{E_m}{RT}\right) \geq \left\{ \lambda_g \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\partial \Omega_1} \right\}. \quad (2.25)$$

3) в-третьих, выполняется критерий Виллюнова [101], когда скорость изменения максимальной температуры в системе «топливная пеллета – внешняя среда» начинает подчиняться экспоненциальному закону:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \cong \exp\left(-\frac{E}{RT_g}\right), \quad (2.26)$$

$$\theta = \max(T). \quad (2.27)$$

При выполнении одного из этих условий считается, что произошло зажигание. Методы решения системы уравнений (2.1) – (2.24) подробно изложены в приложении А.

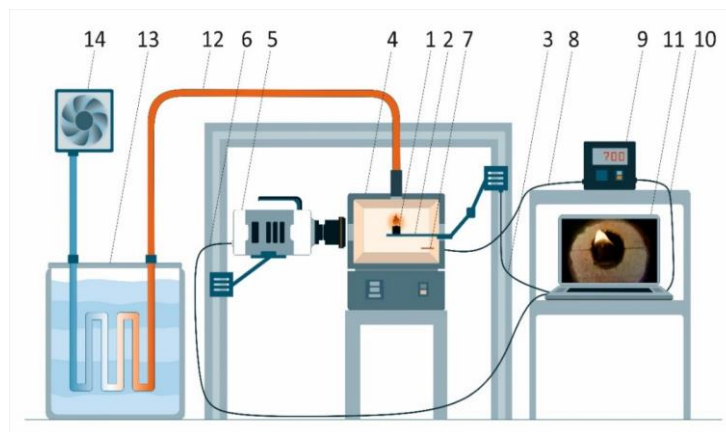
С целью верификации разработанной математической модели были проведены экспериментальные исследования процессов воспламенения угольных пеллет в условиях высокотемпературного нагрева в среде окислителя. В ходе экспериментальных исследований был принят диапазон температур внешней среды от 873 до 1073 К. Схема экспериментального стенда показана на рисунке 2.4. Характеристики топлива приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Элементный состав и технические характеристики исходных топлив (теплотворность, влажность, зольность, выход летучих) [102-104].

Марка угля	Технические характеристики, %			Элементарный состав, %				Теплота сгорания, Q, МДж/кг
	W ^a	A ^d	V ^{daf}	C	H	N	O+S _{opr}	
Т	5,52	18,37	25,56	84,3	6,4	2,9	6,4	25,72
Д	5,83	15,76	37,41	74,2	3,6	1,6	20,6	26,20

Методика подготовки образцов топлива и проведения эксперимента подробно описана в статье [27]. В терморегулируемой печи устанавливалась температура (в соответствии с условиями эксперимента) источника нагрева (от 873 К до 1073 К). Топливная пеллета помещалась на держатель координатного механизма, заранее откалиброванный на попадание в центр камеры сгорания. Одновременно с началом движения держателя с пеллетой в камеру сгорания начиналась видеорегистрация. Временем задержки зажигания считалось время от момента входа топливной пеллеты в фокус камеры до появления на поверхности гранулы свечения, соответствующего началу процесса горения. Погрешности определения t_{ign} составили: систематические менее 1%, случайные менее 2%.

На рисунке 2.5 представлены кадры видеогаммы процесса зажигания угольных пеллет, выполненных из угля марок Д и Т при различных температурах внешней среды. Установлено, что зажигание пеллеты на основе длиннопламенного угля происходит в газовой фазе, при этом воспламенение пеллет, выполненных из тощего угля, происходит в приповерхностной зоне слоя топлива.

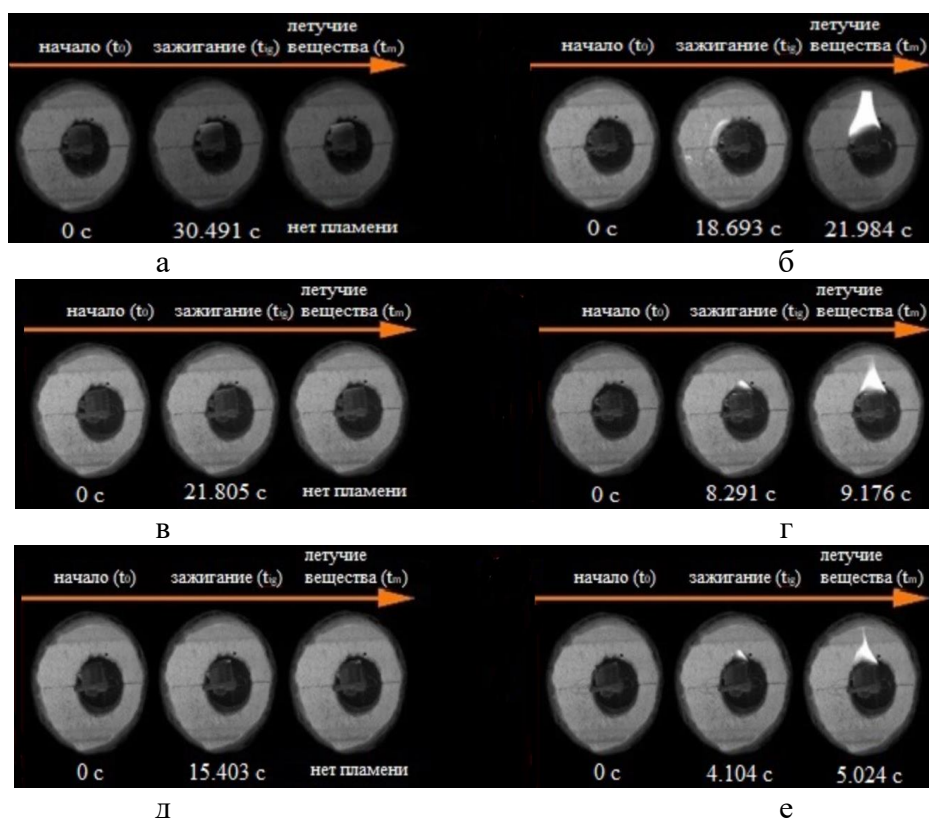


1 – Топливная пеллета, 2 – Платформа координатного механизма подачи топливной пеллеты в камеру сгорания, 3 – Линия связи координатного механизма с компьютером, 4 – Терморегулируемая камера сгорания, 5 – Скоростная видеокамера, 6 – линия связи видеокамеры с компьютером, 7 – термопара, 8 – линии связи термопары с преобразователем сигналов, 9 – преобразователь сигналов, 10 – соединение преобразователя сигналов с компьютером. 11 – Компьютер, 12 – Линия отвода пиролизных газов, 13 – Резервуар для охлаждения дымовых газов, 14 – Система вентиляции

Рисунок 2.4 – Принципиальная схема экспериментального стенда для определения времён задержки воспламенения топливных пеллет

С целью обоснования достоверности результатов математического моделирования проведён сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений времён задержек зажигания угольной пеллеты от температуры окружающей среды. Рисунок 2.6 иллюстрирует значения полученных в ходе теоретических и экспериментальных [27] исследований времён задержки зажигания топливных пеллет в условиях радиационно-конвективного нагрева. Можно отметить хорошее соответствие теоретических и экспериментальных значений t_{ign} . Значительно нелинейная зависимость $t_{\text{ign}}(T_g)$, соответствующая закону экспоненциального снижения, обусловлена воздействием совокупности теплофизических процессов (испарение внутриводной и адсорбционно-связанной влаги) и термохимических реакций (термическая декомпозиция органической

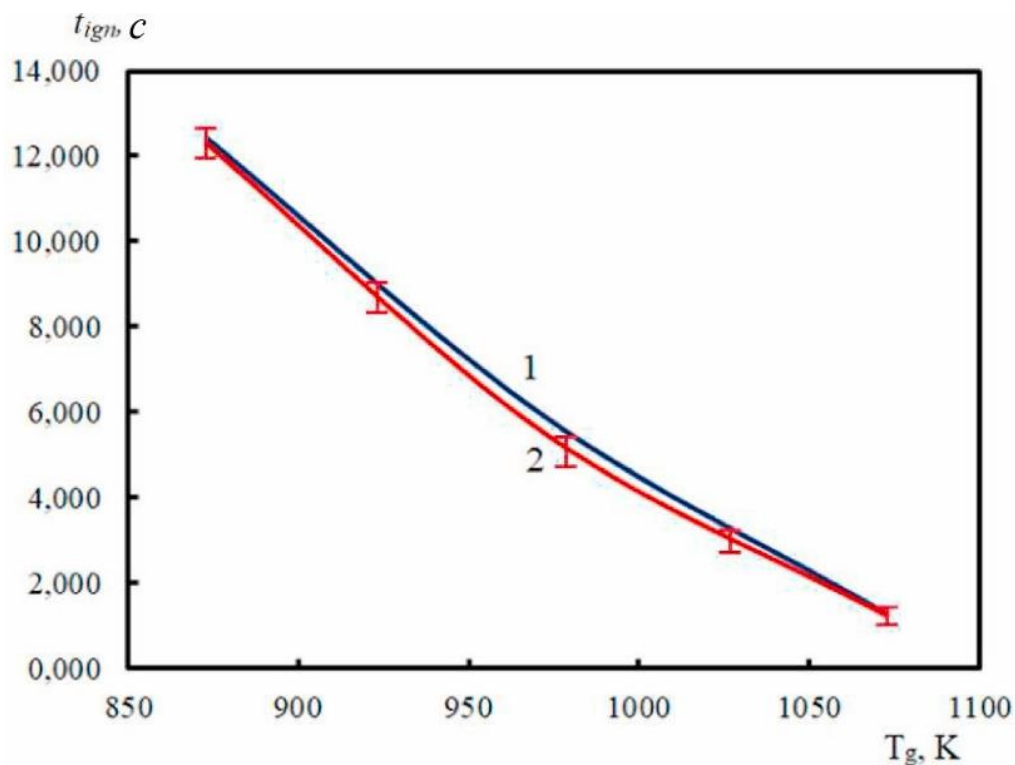
части угля и основных компонентов древесной биомассы, а также термохимическое реагирование газообразных продуктов пиролиза с кислородом воздуха).



а, б – $T_g = 873$ K; в, г – $T_g = 973$ K; д, е – $T_g = 1073$ K; а, в, е – уголь марки Т;
б, г, е – уголь марки Д

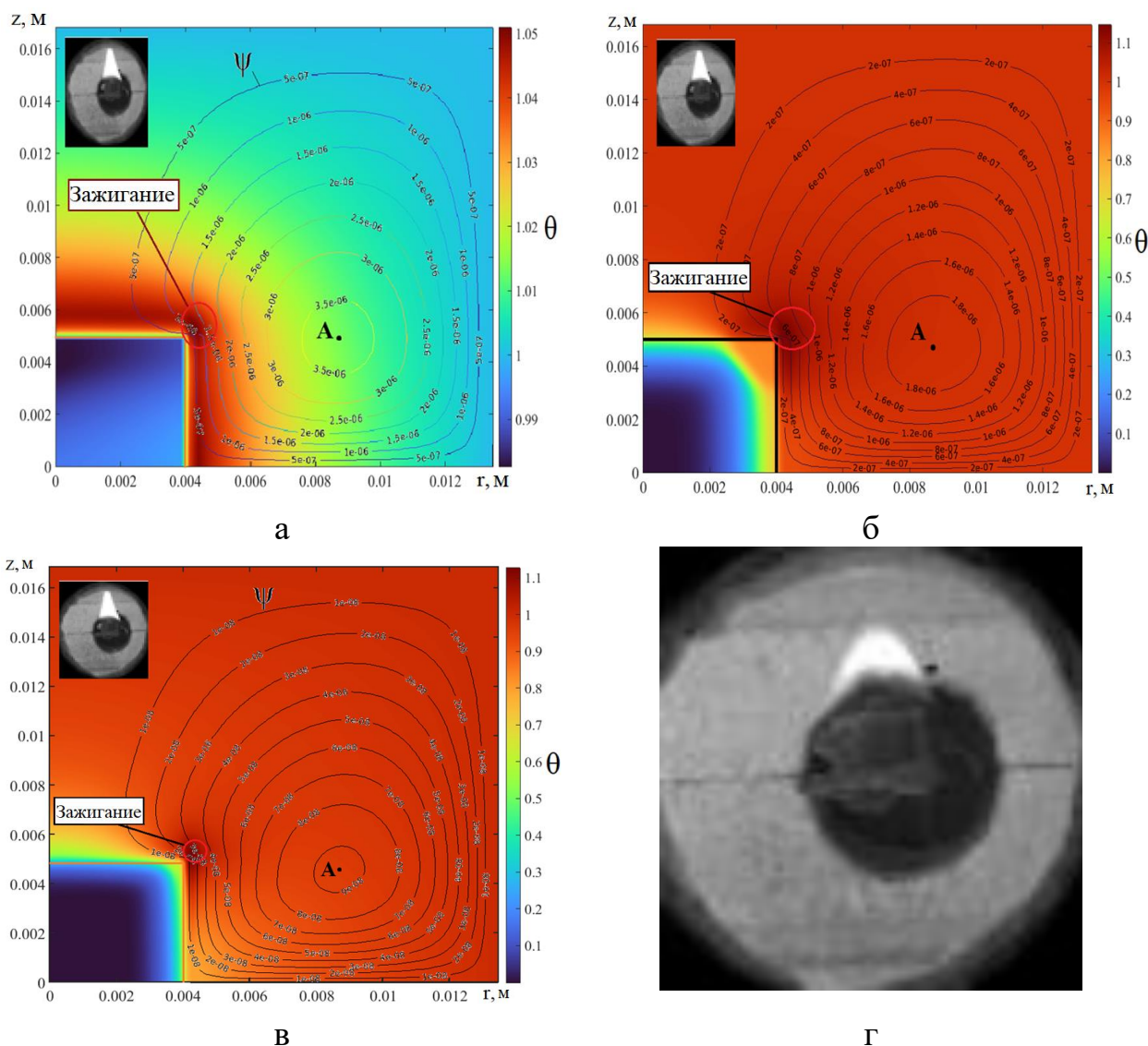
Рисунок 2.5 – Типичные кадры видеозаписей процесса воспламенения угольных пеллет при температуре окружающей среды

На рисунке 2.7 а-г приведены поля температур и линии тока в момент воспламенения топливной пеллеты. Можно отметить, что во всём исследованном температурном диапазоне ($T_g = 873$ - 1073 K) зажигание происходит в газовой фазе. Зона непосредственного воспламенения находится в районе сопряжения верхнего торца цилиндра и боковой цилиндрической поверхности. Также надо сказать, что анализ приведённых на рисунке 2.7 траекторий показывает, что в малой окрестности частицы формируется векторное поле ($V(R,Z)$) течений с одной особой точкой ($A(\cdot)$) типа «центр», с индексом $\text{ind}V(R,Z)=+1$. При этом стоит отметить, что с уменьшением температуры зона зажигания смещается к верхнему торцу цилиндрической частицы. Это обусловлено формированием в малой окрестности последней достаточно сложного спектра течений с нисходящими потоками вблизи



1 – результаты математического моделирования, 2 – результаты экспериментальных исследований

Рисунок 2.6 – Зависимость времен задержки зажигания угольной пеллеты относительно холодной поверхности и восходящими потоками на удалении от пеллеты. В результате летучие, выделяющиеся при термическом разложении, уносятся потоками воздуха и перемешиваются с окислителем. Стехиометрическая смесь газообразного горючего и окислителя скапливается в условной полусфере (в застойной зоне) над поверхностью верхнего торца цилиндрической пеллеты и зажигается при прогреве до критических температур. На рисунке 2.7 г приведён типичный кадр видеогаммы в момент воспламенения угольной пеллеты при температуре внешней среды $T_g = 973 K$. Сравнительный анализ рисунков 2.7 б и г показывает, что представленная математическая модель имеет высокий прогностический потенциал. Стоит отметить, что, согласно результатам численного моделирования, процесс зажигания протекает в газовой фазе. Можно сказать, что в «тривиальных» условиях нагрева (топочные устройства, камеры сгорания ГТУ и т.д.) внутрипорового зажигания угольных пеллет не может происходить. Это обусловлено группой значимых факторов.



а – Температура внешней среды $T_g = 870$ K; б – $T_g = 970$ K; в – $T_g = 1070$ K;

г – кадр типичной видеограммы в момент воспламенения частицы при $T_g = 973$ K

Рисунок 2.7 – Температурные поля и линии тока в малой окрестности частицы топлива в момент воспламенения

Во-первых, при термическом разложении происходит образование летучих, которые фильтруются сквозь пористый топливный каркас из глубинных слоев к поверхности, где вдуваются во внешнюю среду. В результате внешний кислород не может проникнуть вглубь топлива и вступить в термохимическое реагирование с углеродом коксового остатка.

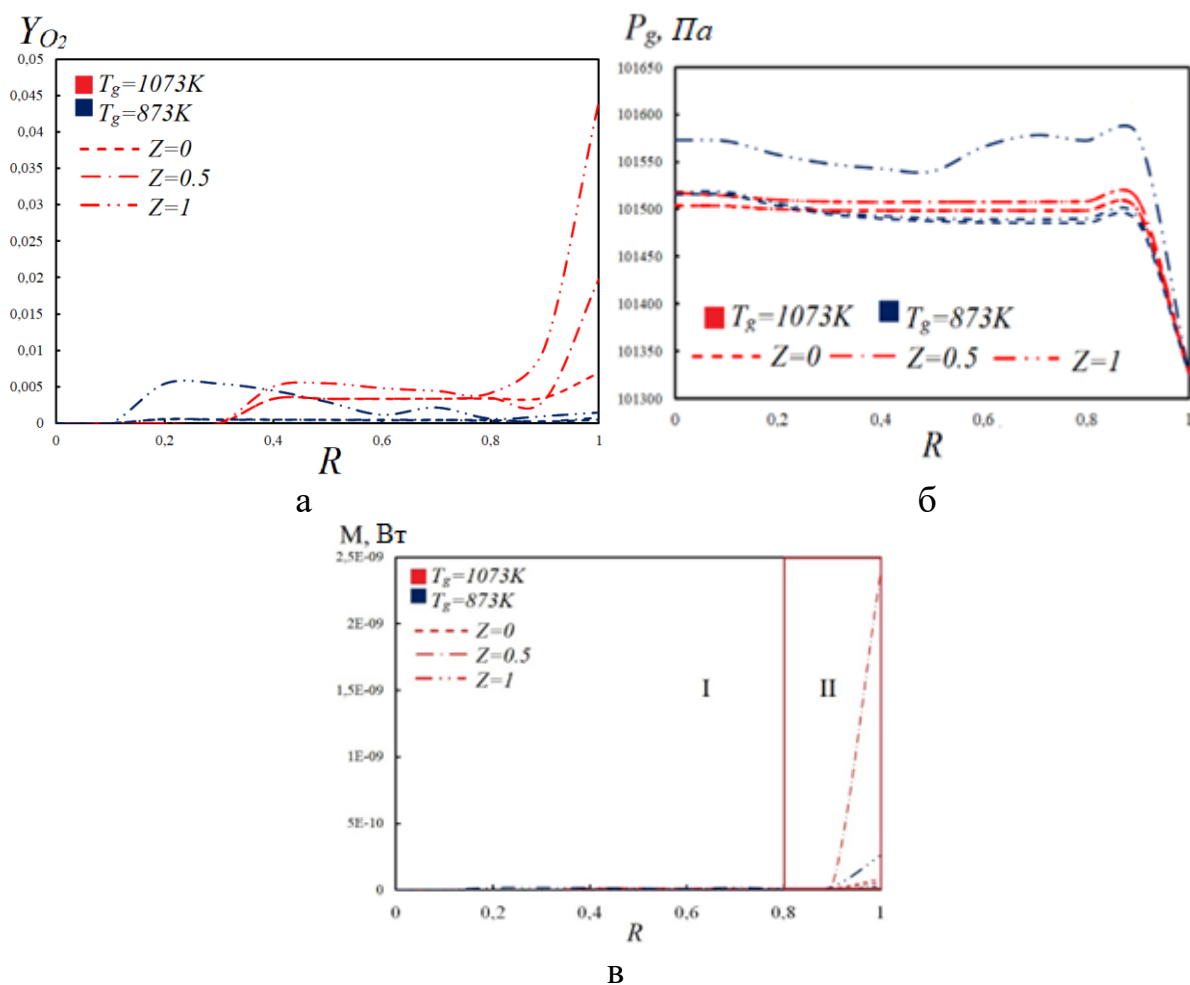
Во-вторых, адсорбционно-связанного кислорода не хватает для стабильного реагирования во внутрипоровом пространстве топливной частицы. При этом

необходимо отметить, что температура в слое топлива много меньше необходимой для начала стабильного реагирования газообразного горючего с окислителем.

В-третьих, теплоёмкость и плотность угля (или смеси угля и древесины) много больше, чем у воздуха. В результате тепло, выделяющееся при термохимическом реагировании горючего и окислителя, интенсивно поглощается топливным слоем.

На рисунке 2.8 приведены значения массовой концентраций кислорода в внутрипоровой структуре (Y_{O_2}), а также распределение значений давления (P), температуры (T) и тепловыделения (Q) термохимической реакции окисления углерода коксового остатка кислородом воздуха ($C+O_2=CO_2$) в момент воспламенения (при температурах внешней среды $T_g = 873$ К и $T_g = 1073$ К) в трёх разных сечениях по высоте топливной пеллеты (Z , где $Z = z/h_z$, где z – размерная координата мм, h_z – высота пеллеты). Можно отметить достаточно неравномерное распределение концентрации O_2 в слое топлива, последнее обусловлено, в первую очередь, неравномерным прогревом цилиндрической пеллеты, а также комплексом процессов фильтрационного тепломассопереноса, протекающих во внутрипоровой структуре топлива в период термической подготовки. Можно отметить почти нулевую концентрацию газообразного кислорода в глубине топлива. Последнее обусловлено тем, что зона пиролиза локализована в приповерхностных (наиболее нагретых) слоях.

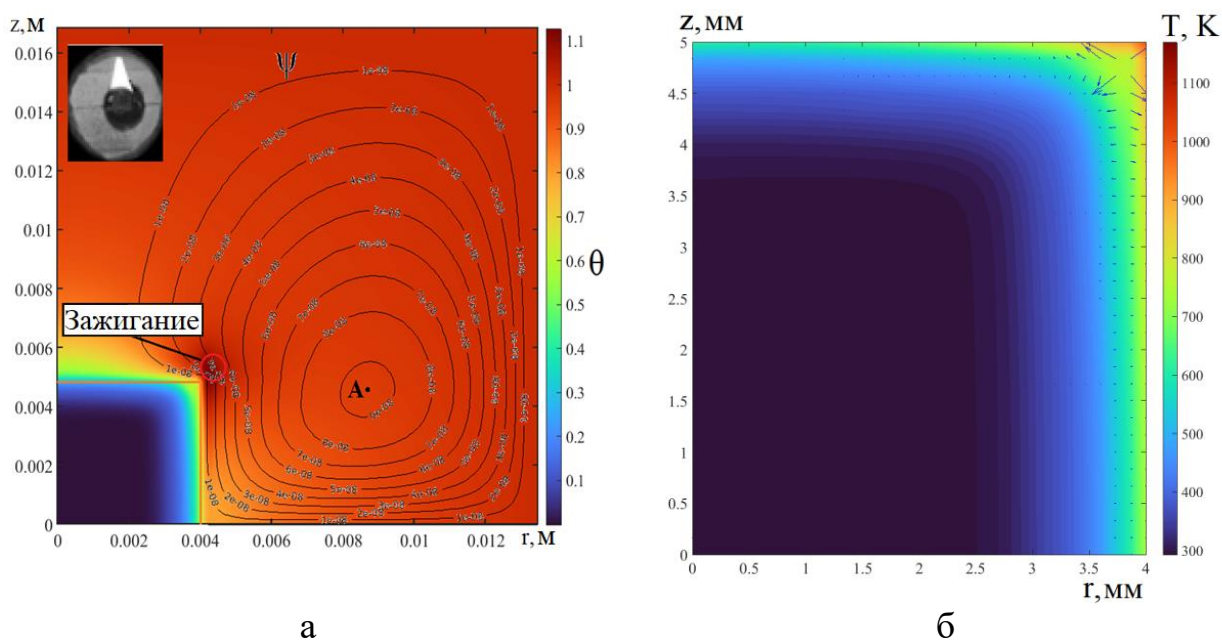
На рисунке 2.8 б приведено распределение давления в слое топлива. Можно отметить существенно нелинейный и немонотонный характер зависимостей $P(R)$. При этом пик значения давления зарегистрирован в приповерхностном слое топлива (при $R = 0.8-0.9$). Это обусловлено тем, что в этих слоях достигается условиях, при которых скорость термического разложения достаточно высока при этом фильтрационное сопротивление слоя топлива не позволяет газообразным продуктам пиролиза быстро выйти к поверхности. В результате летучие не успевают выйти на поверхность топлива, накапливаются в структуре топлива, повышая внутрипоровое давление.



Z – координата поперечного сечения ($Z = z/h_z$, где z – размерная координата мм, h_z – высота пеллеты), I – приповерхностный слой топлива, II – глубинные слои

Рисунок 2.8 – Концентрация кислорода (O_2 – рисунок 2.8 а), распределение давления (P – рисунок 2.8 б) и мощности тепловыделения за счёт термохимического реагирования углерода коксового остатка и кислорода (M – рис. 2.8 в) во внутрипоровой структуре топлива в момент воспламенения

На рисунке 2.8в приведены значения теплоты реакции термохимического взаимодействия углерода коксового остатка с кислородом, выделяющимся в результате термического разложения. Анализ зависимостей показывает, что наибольшее значения теплового эффекта достигается в приповерхностном слое топлива. Это обусловлено относительно большими концентрациями кислорода и высокими температурами приповерхностного слоя угля. Но значения Q не превышают $2,5 \cdot 10^{-9}$ Вт. Последнего недостаточно для стабильного внутрипорового гетерогенного воспламенения.



а – температурные поля в системе «частица топлива – внешняя среда»,

б – температурное поле в пористом угольном каркасе

Рисунок 2.9 – Температурные поля и линии тока в момент воспламенения угольной частицы при температуре внешней среды $T_g = 1073 \text{ K}$ и начальном содержании адсорбционно-связанного кислорода $Y_{O_2} = 2\%$

Анализ зависимостей, приведённых на рисунке 2.8, показывает, что значимых отличий в протекании основных процессов тепло- и массопереноса во внутрипоровой структуре угольного топлива при варьировании условий нагрева нет. Максимальные значения температуры и концентрации кислорода в слое топлива не превышают, соответственно, 550 K и 4,5%, что недостаточно для стабильного квазитвердофазного (или «гетерогенного» вследствие внутрипорового реагирования твёрдого и газообразного горючего с окислителем) зажигания угольных пеллет. Последнее подтверждается результатами математического моделирования процесса зажигания пеллетизированной частицы угольного топлива (рисунок 2.9). В этих условиях можно обосновано сказать, что внутрипорового зажигания угля в реальных условиях нагрева (камеры сгорания котельных агрегатов) быть не может.

2.2 Воспламенение топливных пеллет в условиях радиационно-конвективно-микроволнового теплового воздействия

Проведённый сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных (рисунок 2.6) показал высокий прогностический потенциал предложенной математической модели. В таких условиях имеет смысл провести теоретический анализ влияния параметров внешней среды на характеристики и условия воспламенения: например, анализ влияния воздействия высокочастотным электромагнитным полем на характеристики и условия воспламенения угольных пеллет. В настоящее время перспективным и энергоэффективным способом топливосжигания считается технология сжигания в условиях подсветки электромагнитным полем (в частности, при дополнительном СВЧ-воздействии). Но для установления наиболее приемлемых параметров микроволнового воздействия необходима математическая база для описания процессов термической подготовки и зажигания топливных частиц при таком сложном нагреве.

Физическая модель процесса воспламенения угольной пеллеты в условиях сложного комбинированного теплового воздействия соответствует приведённой выше, отличие заключается лишь в том, что на топливную частицу воздействует также электромагнитное излучение (рисунок 2.10).

Математическая формулировка задачи воспламенения композитного топлива также соответствует приведённой выше математической модели (2.1) – (2.24). Отличие заключается в том, что в уравнении энергии для топливной пеллеты добавлен нелинейный источниковый член, учитывающий объёмный нагрев в результате поглощения микроволновой энергии:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Ho \left(\frac{\partial U_g \theta}{\partial R} + \frac{\partial V_g \theta}{\partial Z} \right) + \frac{A_c}{M_c^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2} = \frac{K_R^2}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R A_c \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(A_c \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) + Po + Po_e, \quad (2.1')$$

где $Po_e = \frac{\text{div}(\bar{S}) E_0 \tau_a}{C_0 \rho_0 R \dot{T}^2},$

$\bar{S} = [E_e \times H_e]$ – Вектор Умова – Пойнтинга [105].

При этом вся система уравнений (2.1') – (2.2) – (2.24) дополняется системой уравнений Максвелла для электромагнитного поля:

$$\frac{\partial D_e}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\mu_e^0 \varepsilon_e^0}} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R H_e) + \frac{\partial H_e}{\partial Z} \right), \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial H_e}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\mu_e^0 \varepsilon_e^0}} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R E_e) + \frac{\partial E_e}{\partial Z} \right), \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_e \frac{\partial E_e}{\partial t} = - \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R H_e) + \frac{\partial H_e}{\partial Z} \right), \quad (2.30)$$

$$D_e = \varepsilon_r E_e. \quad (2.31)$$

Граничные условия и замыкающие соотношения для системы (2.28) – (2.31):

$$n \times D_e \Big|_{\substack{R=1 \\ X \in 0 \dots Z_g}} = 0, \quad (2.32)$$

$$n \times E_e \Big|_{\substack{R=0 \\ X \in 0 \dots Z_g}} = 0, \quad (2.33)$$

$$n \times H_e \Big|_{\substack{R=1 \\ X \in 0 \dots Z_g}} = 0, \quad (2.34)$$

$$E_e \Big|_{\substack{R=1 \\ X \in 0 \dots Z_g}} = E \sin(i\omega t). \quad (2.35)$$

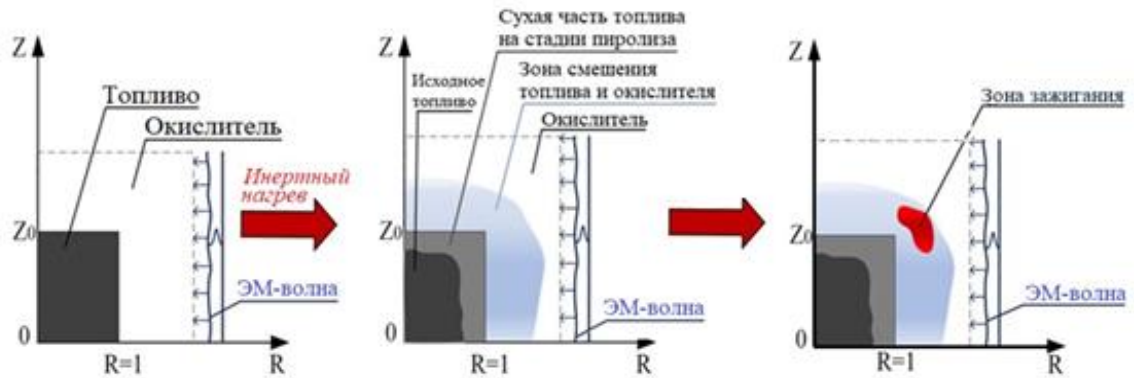


Рисунок 2.10 – Область решения задачи зажигания при комбинированном радиационно-конвективном-микроволновом нагреве

Численное решение системы (2.28) – (2.31) проведено в соответствии с методом конечных разностей во временной области [106, 107]. На рисунке 2.11 представлены результаты математического моделирования процессов воспламенения топливной пеллеты под действием комбинированного нагрева. Можно отметить, что с увеличением напряженности от 0 до 16 кВ/м и, соответственно, мощности на магнетроне, существенно снижаются времена

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

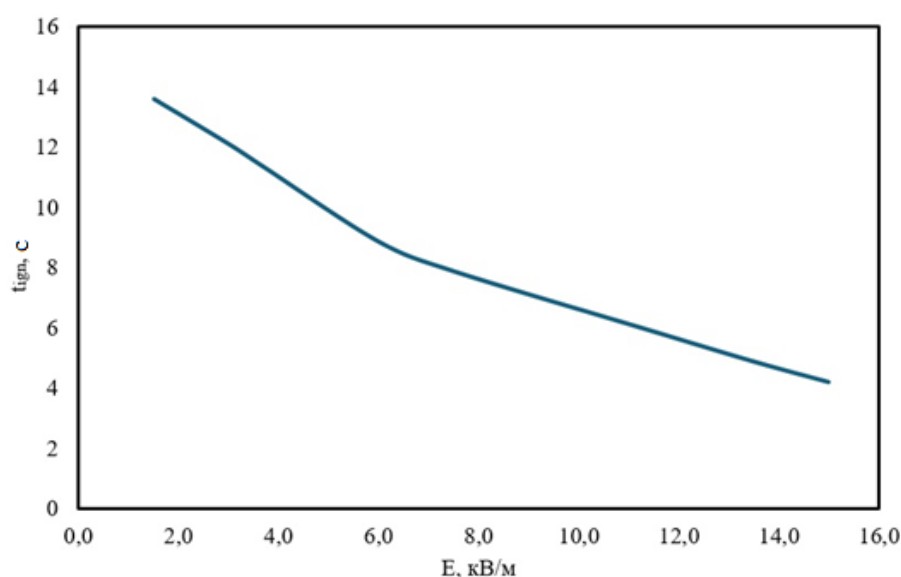
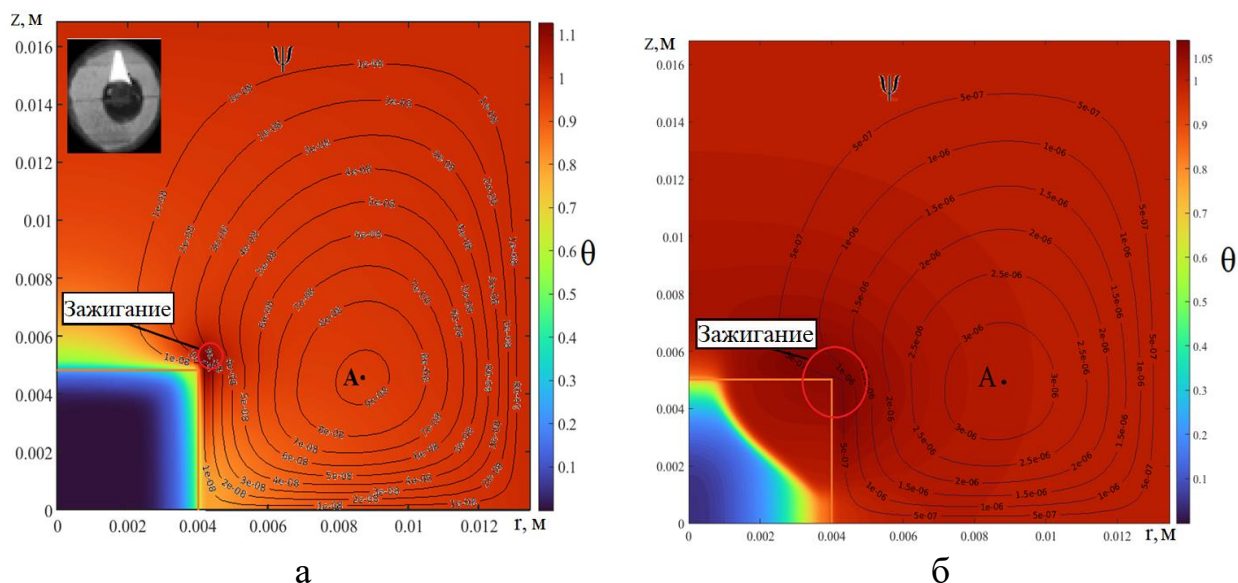


Рисунок 2.11 – Зависимость времен задержки зажигания угольной пеллеты (t_{ign}) от напряженности электрического поля (E)

На рисунке 2.12 изображены распределения температур и линии траекторий в системе «топливная пеллета – внешняя среда» при зажигании в условиях комбинированных нагревов (радиационно-конвективных и радиационно-конвективно-микроволновых) при напряженности поля $E = 12$ кВ/м. Анализ теоретических данных, приведённых на этом рисунке, показывает, что даже в условиях интенсивного радиационно-конвективно-микроволнового воздействия (то есть при значительном тепловыделении, обусловленном поглощением электромагнитной энергии) зажигание происходит в газовой фазе. Можно обоснованно сделать вывод, что внутрипоровый режим зажигания угольной пеллеты невозможен.



а – температурные поля в системе «частица топлива – внешняя среда» при радиационно-конвективном тепловом воздействии, б – температурные поля в системе «частица топлива – внешняя среда» при радиационно-конвективном и микроволновом нагреве

Рисунок 2.12 – Температурные поля и линии тока в момент воспламенения топливной пеллеты при температуре внешней среды $T_g = 1073$ К

Выводы по главе 2

1. Проведённые теоретические и экспериментальные исследования показали, что зажигание угольного топлива всегда протекает в газовой фазе. При этом формирующегося в период термического разложения кислорода (в результате выхода из угля адсорбционно-связанного O_2) не хватает для стабильного внутрипорового реагирования кислорода, выделяющегося в результате термического разложения, с углеродом коксового остатка и летучими. Анализ полей концентрации O_2 во внутрипоровой структуре показал, что максимальное содержание кислорода в внутрипоровой газовой смеси не превышает 4,5%. При этом теплота термохимической реакции окисления твёрдых продуктов

термического разложения кислородом, выделяющимся в результате пиролиза, мала и не приводит к стабильному внутрипоровому зажиганию угольной пеллеты;

2. Показано, что применение дополнительно микроволнового воздействия при низкотемпературном нагреве угольной пеллеты ведёт к существенному снижению времен задержки зажигания.

Результаты исследований, изложенные в главе 2, опубликованы в [27, 31].

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЖИГАНИИ ЧАСТИЦЫ ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННО- КОНВЕКТИВНОГО И МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА

Приведённые выше теоретические исследования показали, что применение микроволновой подсветки топливного факела (или слоя) имеет достаточно обширные перспективы на практике. Особенно это актуально для технологий сжигания низкосортных или высоковлажных топлив. К последним относятся высоковлажные и высокочольные бурые угли, а также древесная биомасса, которая по естественным причинам (вследствие транспирации влаги в период жизнедеятельности растения) обладает высокой влажностью. Однако надо сказать, что в настоящее время нет примеров устойчиво работающих энергоустановок, использующих дополнительно микроволновую энергию для стабилизации процесса зажигания и горения. Как правило, в настоящее время СВЧ-излучение активно применяется для сушки материалов. В то же время потенциал данной технологии применительно к энергетике ещё недостаточно изучен. Это обусловлено тем, что пока отсутствуют математические модели, описывающие процесс воспламенения и горения топливных частиц в условиях сложного радиационно-конвективного и микроволнового нагрева.

Математическое описание СВЧ-сушки материалов подробно излагается в статьях [77-88], где авторы приводят аналитическое решение задачи сушки материала, разделяют рассматриваемый процесс на стадии прогрева и сушки с постоянной скоростью влагоудаления. В основе математической модели лежат уравнения электродинамики Максвелла и тепловлагопереноса А.В. Лыкова, однако стоит отметить, что работы [77-88, 108] рассматривают только процесс сушки, при этом зажигание материала не описывается. Процессы тепломассопереноса, протекающие в слое угля при воздействии на него микроволнового излучения, рассматриваются в диссертации [88]. Также можно отметить, что результаты

экспериментальных исследований анализа возможности использования микроволновой плазмы для сжигания углей приведены в статье [109].

Теоретическое обоснование использования микроволнового излучения для зажигания топлива (капель ВУТ) впервые проведено в статье [110]. Авторы [110] рассматривают процесс зажигания капли водоугольного топлива в двигателе внутреннего сгорания при повышенном давлении среды в условиях сложного радиационно-конвективно-кондуктивного-электроискрового и микроволнового нагрева.

В работах [109, 110] приведены результаты численного решения задачи зажигания капель водоугольного топлива. При этом использование теории [109, 110] для решения инженерных задач в реальной практике слабо применимо вследствие высоких временных затрат и вычислительных мощностей для установления характеристик и условий процессов зажигания и горения. В этих условиях имеет смысл разработки аналитического решения задачи зажигания частицы влагонасыщенной древесной биомассы.

Для разработки математической модели процессов зажигания частиц влагонасыщенной древесной биомассы в условиях комплексного (комбинированного радиационно-конвективного и микроволнового воздействия) нагрева на первом этапе были проведены экспериментальные исследования соответствующих процессов. Эксперименты выполнены с использованием стенда, который по принципам работы аналогичен экспериментальному стенду, приведённому в [111]. Подробное описание процедур проведения экспериментальных исследований, обработки результатов эксперимента, подготовки топлива приведено в [112].

По результатам выполненных экспериментов [111] были определены основные этапы термической подготовки и зажигания частицы влажной древесной биомассы в условиях сложного нагрева. Физическая постановка задачи заключается в следующем (рисунок 3.1): в начальный момент времени частица древесной биомассы попадает под воздействие электромагнитного излучения в высокотемпературной окислительной среде. В результате частица нагревается за

счет радиационно-конвективно-микроволнового нагрева. Микроволновое излучение приводит к внутреннему нагреву и, соответственно, к ускорению процессов испарения внутрипоровой влаги.

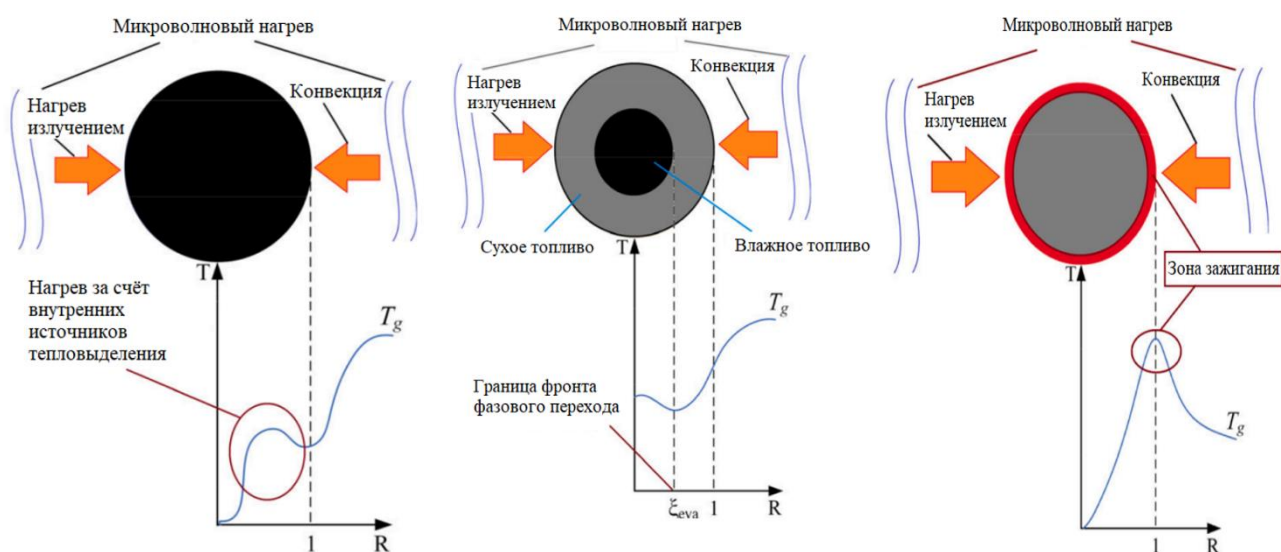


Рисунок 3.1 – Схема области решения задачи зажигания частицы древесины. Фронт испарения продвигается от внешних слоев частицы ко внутренним ее слоям. В результате радиационно-конвективного и микроволнового нагрева инициируется процесс пиролиза основных компонентов древесины с образованием твёрдых и газообразных продуктов пиролиза. Газообразные продукты пиролиза фильтруются через сухой углеродистый каркас к внешней границе частицы и вдуваются в пристеночную область. Дальнейший нагрев приводит к интенсивному взаимодействию углерода коксового остатка с окислителем (кислородом воздуха). При формулировке математической постановки задачи, соответствующей представленной выше физической модели, были приняты следующие допущения:

- Нагрев частицы по всей поверхности идентичен;
- Воспламенение происходит в пристеночной области газа, окружающего частицу;
- Возможная неоднородность аэродинамического спектра в пограничном слое частицы существенно не влияет на характеристики нагрева;
- Термическая подготовка и зажигание происходят в три последовательных этапа:

1. Инертный нагрев до достижения температуры на поверхности частицы 373 К;
2. Сушка топливной частицы в условиях равновесных параметров на границе фронта испарения ($T_{eva} = 373$ К);
3. Воспламенение сухой пористой частицы древесины.

Создана математическая модель процесса зажигания, представляющая собой систему нестационарных дифференциальных уравнений теплопереноса с нелинейным источником тепловыделения. При этом учитываются вышеприведенные допущения. Математическая постановка задачи сформулирована в безразмерных переменных. На первом этапе решена задача нагрева частицы древесины до начала интенсивного испарения влаги. Процесс теплопереноса описывается уравнением энергии с внутренним источником теплоты:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial Fo} = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial R} \right) + Po \cdot e^{-Bu \cdot \gamma}, \quad (3.1)$$

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

Начальные условия:

$$\left\{ \theta \Big|_{\substack{Fo=0 \\ R \in 0..1}} \right\} = \theta_0. \quad (3.2)$$

Граничные условия:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=1} = Sk \cdot (1 - \theta_1^4) + Bi \cdot (1 - \theta_1) \equiv Ki(Fo), \\ \left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=0} = 0. \end{cases} \quad (3.3)$$

После того, как поверхность древесной частицы нагревается до температуры 373 К, начинается процесс сушки частицы. Этот процесс описывается следующей системой уравнений.

Уравнение энергии для исходной (насыщенной влагой) части топлива:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial Fo} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial R} \right) + Po_1 \cdot e^{-Bu \cdot \gamma}, \quad (3.4)$$

$$Fo \leq Fo_{fe},$$

$$0 \leq R \leq \xi_{eva}.$$

Уравнение энергии для сухой части частицы:

$$K_a \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial Fo} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial R} \right) + Po_2 \cdot e^{-Bu\gamma}, \quad (3.5)$$

$$Fo \geq Fo_{fe},$$

$$\xi_{eva} \leq R \leq 1.$$

Начальные условия:

$$\theta(R \in 0 \dots 1) = \theta(R, Fo_{ews}) = \varphi(R). \quad (3.6)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \theta_2}{\partial R} \right|_{R=1} = Ki(Fo), \quad (3.7)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_1}{\partial R} \right|_{R=0} = 0. \quad (3.8)$$

На границе раздела «исходное влагонасыщенное топливо – сухой каркас» выполняются калорические условия [113]:

$$\left. \frac{\partial \theta_1}{\partial R} \right|_{R=\xi_{eva}-0} - K_\lambda \left. \frac{\partial \theta_2}{\partial R} \right|_{R=\xi_{eva}+0} = -KuH \frac{d\xi_{eva}}{dFo}, \quad (3.9)$$

$$\theta_1|_{R=\xi_{eva}} = \theta_2|_{R=\xi_{eva}}. \quad (3.10)$$

После окончания процесса сушки частицы ($\xi_{eva} = 0$) начинается третий этап – зажигание. Известно [99], что воспламенение происходит при достижении критических значений концентраций летучих газов и окислителя, а также температуры внешней среды. Уравнение энергии, описывающее процесс зажигания, записано в переменных Франк-Каменецкого [89]. В уравнении энергии также учитывается нагрев за счёт поглощения микроволнового излучения:

$$\frac{\partial \Xi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Xi}{\partial \zeta^2} + e^{\frac{\Xi}{1+\beta \cdot \Xi}} + K_q e^{-Bu\gamma}. \quad (3.11)$$

Начальные условия:

$$\Xi(R \in 0 \dots 1) = \Xi(R, Fo_{ewf}) = \psi(R). \quad (3.12)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \Xi}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=0} = Ki(Fo), \quad (3.13)$$

$$\left. \frac{\partial \Xi}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=\infty} = 0. \quad (3.14)$$

Задача зажигания (3.1) – (3.14) решается методом квазистационарного «теплового» приближения (ТКП) с выделением асимптотических оценок.

Последний разработан профессором В.В. Саломатовым [113, 114] и получил физическое обоснование в [115]. Расширение метода ТКП применительно к решению задач зажигания развито в серии работ [49, 116]. С учётом вышеприведенных приближений сформулированная система (3.1) – (3.14) решена с помощью интегральных преобразований Лапласа. Освобождаясь от дифференциальных операторов по времени и решая преобразованную задачу, возвращаясь в область оригиналов, выделяется асимптотика температурного поля. Время задержки зажигания находится по принципу суперпозиции временных асимптотик каждого отдельного этапа термической подготовки (инертный нагрев, испарение воды, зажигание):

$$t_{ign} = \sum_{i=1}^m t_i = t_{hwb} + t_{fwe} + t_{ign}^{awe}. \quad (3.15)$$

Ниже представлено решение задачи зажигания частицы влагонасыщенной древесной биомассы в условиях сложного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева. Как отмечалось выше, общий процесс термической подготовки условно делится на три последовательные стадии: инертный нагрев, испарение влаги, непосредственное зажигание. На первом этапе решена задача инертного нагрева частицы древесины.

3.1 Решение задачи прогрева топливной частицы до инициирования процесса испарения внутрипоровой воды

Влажная древесина относится к диэлектрическим материалам, то есть способна поглощать электромагнитное излучение в СВЧ-диапазоне, тем самым генерируется внутренний источник тепла. В данной постановке задачи поглощение микроволновой энергии осуществляется согласно закону Бугера. Процесс переноса тепла рассматривается в одномерной модели. Верхняя граница системы отдает тепло за счет радиации и конвекции (см. рисунок 3.2), в то время как нижняя граница теплоизолирована. Лучистый теплообмен наиболее заметен при достижении системой высоких температур ($q_{rad} \sim \sigma T^4$), а конвекционный – при

более низких температурах ($q_{\text{con}} \sim \alpha T$). В целом необходимо учитывать оба вида тепловых потоков одновременно.

Математическая модель, рассматриваемая в данной главе, полагается на следующие предположения:

1. Древесина обладает постоянными и изотропными теплофизическими свойствами;
2. Начальная температура системы постоянна;
3. Тепло поступает к поверхности за счет излучения и конвекции.

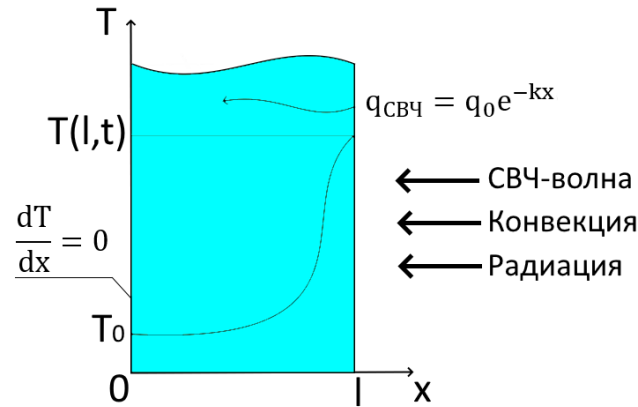


Рисунок 3.2 – Область решения задачи СВЧ-нагрева вследствие конвекции и излучения

С учётом принятых допущений математическая постановка задачи прогрева имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_v}{C\rho} \exp(-kx), \quad (3.16)$$

$$0 \leq t \leq t_{se}, \quad (3.17)$$

$$\left\{ T \mid_{t=0} \right\}_{x \in 0..l} = T_{start}, \quad (3.18)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \Big|_{\bar{n} \in \partial \Pi} = \sigma (T_g^4 - T^4|_{\bar{n} \in \partial \Pi}) + a (T_g - T|_{\bar{n} \in \partial \Pi}), \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \Big|_{x=0} = 0. \quad (3.20)$$

Для поиска обобщенного решения обратимся к безразмерным переменным, определив в качестве масштабов величины, входящие в условия однозначности задачи. В результате постановка (3.16) – (3.20) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + Po \cdot \exp(-BuX), \quad (3.21)$$

$$0 \leq Fo \leq Fo_{se}, \quad (3.22)$$

$$\left\{ \theta \right|_{\substack{Fo=0 \\ X \in [0,1]}} = \theta_{start}, \quad (3.23)$$

$$\begin{cases} -\frac{\partial \theta}{\partial \bar{n}} \Big|_{\bar{n} \in \partial \mathbb{I}} = Sk(1 - \theta^4|_{\bar{n} \in \partial \mathbb{I}}) + Bi(1 - \theta|_{\bar{n} \in \partial \mathbb{I}}), \\ \frac{\partial \theta}{\partial \bar{n}} \Big|_{X=0} = 0. \end{cases} \quad (3.24)$$

Задачи, обозначенные как (3.21) – (3.24), не имеют точного аналитического решения из-за нелинейного закона Стефана-Больцмана в уравнении (3.24). Тем не менее, согласно [117], можно эффективно построить асимптотические решения для подобного класса задач. В дальнейшем мы сосредоточимся на разработке таких решений для случаев малых и больших значений числа Fo . Для этого отобразим систему (3.21) – (3.24) в соответствии с трансформантом Лапласа [118]:

$$s\theta - \theta_{start} = \theta_L'' + \frac{Po}{s} \exp(-BuX), \quad (3.25)$$

$$-\theta_L' \Big|_{\bar{n} \in \partial \mathbb{I}} = Ki_L(s), \quad (3.26)$$

$$\theta_L' \Big|_{X=0} = 0.$$

Решение системы (3.25) – (3.26) рассмотрено и хорошо изучено в работах [29, 88, 119]. Авторы [29, 88, 119] выделили соответствующие асимптотические оценки и получили следующее математическое выражение для вычисления распределения температуры в области решения задачи (рисунок 3.2):

$$\begin{aligned} \Theta(X, Fo) = & \frac{Po}{Bu^2} \cdot e^{-BuX} (e^{Bu^2 Fo} - 1) - \frac{(e^{-Bu} - 1)(1 - e^{-Bu^2 Fo} + Bu^2 Fo)Po}{Bu^3} + \Theta_0 - \\ & - \left(Sk(\Theta^4(1, Fo) - 1) + Bi(\Theta(1, Fo) - 1) \right) \left(Fo + \frac{X^2}{2} \right). \end{aligned} \quad (3.27)$$

Для полного определения температур необходимо иметь зависимость температуры на границе $\Theta(1, Fo)$ от параметра Fo . Найдём граничную температуру:

$$\Theta(1, Fo) = \frac{Po}{Bu^2} \cdot e^{-Bu} (e^{Bu^2 Fo} - 1) - \frac{(e^{-Bu} - 1)(1 - e^{-Bu^2 Fo} + Bu^2 Fo)Po}{Bu^3} + \quad (3.28)$$

$$+\theta_0 - (Sk(\theta^4(1, Fo) - 1) + Bi(\theta(1, Fo) - 1))(Fo + 0,5).$$

В итоге граничная температура:

$$\theta(1, Fo) = -\frac{1}{2}\sqrt{A} + \frac{1}{2}\sqrt{-B + \frac{2(Fo + 0.5)Bi + 2}{(Fo + 0.5)Sk\sqrt{C}}}, \quad (3.29)$$

где

$$A = \frac{Po}{Bu^2} e^{-Bu} (e^{Bu^2 Fo} - 1) - \frac{(e^{-Bu} - 1)(1 - e^{-Bu^2 Fo} + Bu^2 Fo)Po}{Bu^3} +$$

$$+\theta_0 + (Sk + Bi)(Fo + 0.5),$$

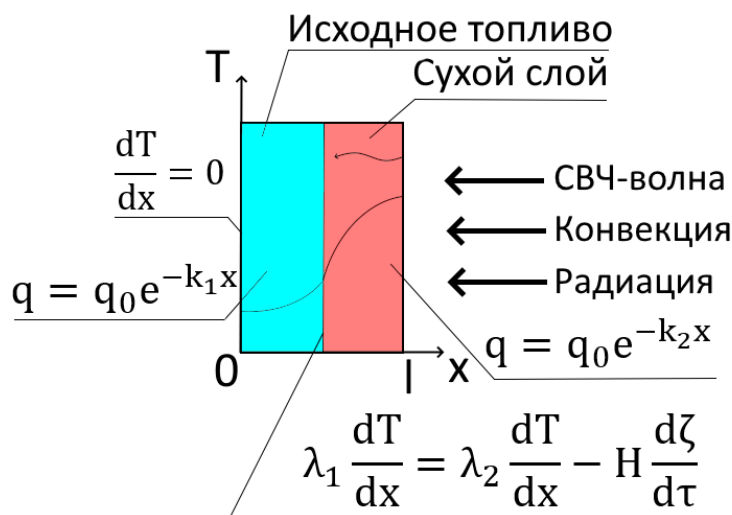
$$B = (27(Fo + 0.5)(1 + (Fo + 0.5)Bi)^2 \cdot Sk +$$

$$+\sqrt{729(Fo + 0.5)^2(1 + (Fo + 0.5)Bi)^4 Sk^2 + 6912(Fo + 0.5)^3 A^3 Sk^3})^{\frac{1}{3}},$$

$$C = \frac{4 \cdot 2^{\frac{1}{3}} A}{B} + \frac{B}{3 \cdot 2^{\frac{1}{3}} (Fo + 0.5) \cdot Sk}.$$

3.2 Решение задачи сушки частицы древесины в условиях сложного теплового воздействия

На втором этапе решается задача испарения внутрипоровой влаги топливной частицы. При этом предполагается, что частица биомассы, поверхность которой нагрета до температуры парообразования, попадает в высокотемпературную среду и нагревается за счёт конвекции и излучения. Одновременно с этим нагревается слой древесины за счёт поглощения микроволнового излучения. В результате высокотемпературного воздействия поверхностные слои древесины подсушиваются, образуя две характерные зоны: пористый высушенный слой и исходная влагонасыщенная часть (рисунок 3.3).



1 – исходное топливо, 2 – сухой пористый каркас

Рисунок 3.3 – Схема сушки частицы древесины

Тепло, подводимое от высокотемпературной среды, расходуется на разогрев высушенного топлива до его зажигания (зона 1), на разогрев исходного топлива (зона 2) и на фазовый переход «вода – пар». Также дополнительно к основным допущениям используются следующие:

1. Частица древесной биомассы сохраняет свою форму сферы после высыхания;
2. Диффузия влаги незначительна;
3. Испарение протекает на границе раздела «сухое топливо – влажное топливо»;
4. Температура парообразования и теплота испарения принимаются постоянными.

Система уравнений для задачи испарения имеет вид:

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = a_1 \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] + Q_1, \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = a_2 \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] + Q_2. \quad (3.31)$$

Граничные и начальные условия:

$$\lambda_1 \frac{\partial T(r_0, t)}{\partial r} = \sigma [T_c^4 - T^4] + \alpha [T_c - T], \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial r} = 0, \quad (3.33)$$

$$T(r, 0) = T_0. \quad (3.34)$$

Рассмотрим процесс теплопереноса в сухой зоне топлива (зона 1), перейдя к безразмерным переменным. Тогда теплоперенос в первой зоне будет описываться следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial \Theta(R, Fo)}{\partial Fo} = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial \Theta(R, Fo)}{\partial R} \right] + P_{01}, \quad (3.35)$$

$$\Theta(R, 0) = \Theta_0, \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial \Theta(1, Fo)}{\partial R} = Ki(Fo), \quad (3.37)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta_1(R, Fo)}{\partial R} \right|_{R=R_u} = 0. \quad (3.38)$$

Переходим к области отображений:

$$\Theta_L(R, S) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta(R, Fo) \cdot e^{-S\tau} d\tau, \quad (3.39)$$

$$\Theta_L(R, S) - \Theta_0 = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial \Theta_L(R, S)}{\partial R} \right] + \frac{P_{01}}{S}, \quad (3.40)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta_L}{\partial R} \right|_{R=1} = Ki(S), \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial \Theta_1(Ru, S)}{\partial R} = \Theta_L(S). \quad (3.42)$$

Пусть $v(R, S) = \Theta_L(R, S) - \frac{\Theta_0}{S}$, тогда система (3.35) – (3.38) преобразуется к следующему виду:

$$Sv(R, S) = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial v_L(R, S)}{\partial R} \right] + \frac{P_0}{S} \rightarrow v(R, S) = \frac{R^{-2}}{S} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial v}{\partial R} \right] + \frac{P_0}{S^2}, \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial v(R, S)}{\partial R} = Ki(S), \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial v(R, S)}{\partial R} = \Theta_L(S). \quad (3.45)$$

Воспользуемся передаточными функциями:

$$v_L(R, S) = Ki(S)\Phi_1(R, S) + \Theta_L(S)\Phi_2(R, S) + P_0(S)\Phi_3(R, S), \quad (3.46)$$

$$\Phi_1(R, S) = \Psi_0 + S\Psi_1 \dots, \quad (3.47)$$

$$\Phi_2(R, S) = \chi_0 + S\chi_1 \dots, \quad (3.48)$$

$$\Phi_3(R, S) = \frac{1}{S^2}. \quad (3.49)$$

Подставляем (3.46) в (3.43), получим:

$$\begin{aligned} & S \left\{ Ki(S)(\Psi_0 + S\Psi_1 \dots) + \Theta_L(S)(\chi_0 + S\chi_1 \dots) + \frac{P_{01}}{S^2} \right\} = \\ & = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 Ki(S)(\Psi'_0 + S\Psi'_1 \dots) + R^2 \Theta_L(S)(\chi'_0 + S\chi'_1 \dots) + \frac{P_{01}}{S^2} \right], \end{aligned} \quad (3.50)$$

$$\frac{P_0}{S^2} = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2 Ki(S)(\Psi'_0 + S\Psi'_1 \dots) + R^2 \Theta_L(S)(\chi'_0 + S\chi'_1 \dots)], \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial \Theta_L(R, S)}{\partial R} = Ki(S)(\Psi'_0 + S\Psi'_1 \dots) + \Theta_L(S)(\chi'_0 + S\chi'_1 \dots). \quad (3.52)$$

Тогда из (3.50) следует:

$S\{Ki(S)(\Psi_0 + S\Psi_1 \dots)\} =$ $= R^2 \frac{\partial}{\partial R} [R^2 Ki(S)(\Psi'_0 + S\Psi'_1 \dots)]$		$S\{\Theta_L(S)(\chi_0 + S\chi_1 + \dots)\} =$ $= R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2 \Theta_L(S)(\chi'_0 + S\chi'_1 \dots)]$	
$S^0 \rightarrow R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2(\Psi'_0)] = 0$	(I)	$S^0 \rightarrow R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2(\chi'_0)] = 0$	(II)
$S' \rightarrow R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2(\Psi'_1)] = \Psi_0$	(II)	$S' \rightarrow R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2(\chi'_1)] = 0$	(IV)
При R=1 $Ki(S) = Ki(S)(\Psi'_0 _{R=1} + S\Psi'_1 _{R=1})$ При R=R _{eva} $(\Psi'_0 _{R=R_{eva}} + S\Psi'_1 _{R=R_{eva}}) = 0$		При R=R _{eva} $\Theta_L(S) = \theta_{L1}(\chi'_0 _{R=R_{eva}} + S\chi'_1 _{R=R_{eva}})$ При R=1 $\chi'_0 _{R=1} + S\chi'_1 _{R=1} = 0$	

Тогда:

$\Psi'_0 _{R=1} = 1$	(V)	$\Psi'_1 _{R=1} = 0$	(VI)	$\chi'_0 _{R=R_{eva}} = 1$	(IX)	$\chi'_1 _{R=R_{eva}} = 0$	(X)
$\Psi'_0 _{R=R_{eva}} = 0$	(VII)	$\Psi'_1 _{R=R_{eva}} = 0$	(VIII)	$\chi'_0 _{R=1} = 0$	(XI)	$\chi'_1 _{R=1} = 0$	(XII)

Одна из констант находится из соотношения:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\frac{4}{3}\pi(1 - R_{eva}^3)} S \int_{R_{eva}}^1 4\pi R^2 v_{L1}(R, S) = \\ & = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi(1 - R_{eva}^3)} \int_{R_{eva}}^1 4\pi R^2 R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial v_{L1}(R, S)}{\partial R} \right] dR + \\ & \quad + \frac{1}{\frac{4}{3}\pi(1 - R_{eva}^3)} \int_{R_{eva}}^1 4\pi R^2 \frac{P_{01}}{S} dR, \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned}
S \int_R^1 R^2 [Ki(S)(\Psi_0 + S\Psi_1 \dots) + \Theta_L(S)(\chi_0 + S\chi_1 \dots)] dR + S \int_{Reva}^1 R^2 \frac{P_{01}}{S} dR = \\
= Ki(S) - Ru^2 \Theta_{L1}(S) + \int_{Reva}^1 R^2 \frac{P_{01}}{S} dR.
\end{aligned} \tag{3.54}$$

Из последнего можно составить два следующих соотношения:

$$S \int_{Ru}^1 R^2 [Ki(S)(\Psi_0 + S\Psi_1 + \dots)] dR = Ki(S) = 1, \tag{3.55}$$

$$S \int_{Ru}^1 R^2 [\Theta_L(S)(\chi_0 + S\chi_1 + \dots)] dR = Ru^2 \Theta_{L1}(S). \tag{3.56}$$

Из (3.55) и (3.56) находим:

$$\int_{Reva}^1 R^2 \Psi_0 dR = \frac{1}{S}, \tag{3.57}$$

$$\int_{Reva}^1 R^2 \Psi_1 dR = 0, \tag{3.58}$$

$$\int_{Reva}^1 R^2 \chi_0 dR = -\frac{Reva^2}{S}, \tag{3.59}$$

$$\int_{Reva}^1 R^2 \chi_1 dR = 0. \tag{3.60}$$

Решаем систему уравнений (3.30) (3.36) (3.53) относительно Ψ_0 :

$$\begin{cases} R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2 (\Psi'_0)] = 0 \\ \Psi'_0|_{R=Reva} = 0 \\ \int_{Reva}^1 R^2 \Psi_0 dR = \frac{1}{S} \end{cases}. \tag{3.61}$$

Т.к. $R^2(\Psi'_0) = C_1$ при $R(\Psi'_0)|_{R=Reva} = 0$, тогда:

$$C_1 = 0, \tag{3.62}$$

$$\Psi'_0 = \frac{C_1}{R^2} \Rightarrow \Psi_0 = -\frac{C_1}{R} + C_2 \Rightarrow \Psi_0 = C_2, \tag{3.63}$$

$$C_1 \int_{Reva}^1 R^2 dR = \frac{1}{S} \Rightarrow C_2 = \frac{3}{S(1 - Reva^3)}. \tag{3.64}$$

Решаем систему уравнений (3.32) (3.37) (3.55) относительно Ψ_1 :

$$\begin{cases} R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2(\Psi'_1)] = \Psi_0 = C_2 \\ \Psi'_0|_{R=R_{eva}} = 0 \\ \int_{R_{eva}}^1 R^2 \Psi_1 dR = 0 \end{cases}, \quad (3.65)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial R} [R^2(\Psi'_1)] &= \frac{3R^2}{S(1-R_{eva}^3)} \rightarrow R^2(\Psi'_1) = \frac{3R^2}{3S(1-R_{eva}^3)} + C_3 \rightarrow \Psi'_1 = \frac{1}{S(1-R_{eva}^3)} + \frac{C_3}{R^2_{eva}} = 0 \Rightarrow \\ \begin{cases} C_3 = -\frac{R_{eva}^2}{S(1-R_{eva}^3)} \\ \Psi_1(R) = \frac{R^2}{2S(1-R_{eva}^3)} + \frac{C_3}{R} + C_4 \end{cases} &\Rightarrow \Psi_1(R) = \frac{R^2}{2S(1-R_{eva}^3)} + \frac{R_{eva}^3}{SR(1-R_{eva}^3)} + C_4 \end{aligned} \quad (3.66)$$

Для C_4 имеем из (3.55):

$$\int_{R_{eva}}^1 R^2 \left[\frac{R^2}{2S(1-R_{eva}^3)} + \frac{R^3}{SR(1-R_{eva}^3)} + C_4 \right] dR = 0, \quad (3.67)$$

$$\begin{aligned} &\frac{R^5}{2S(1-R_{eva}^3)} \cdot 5 \Big|_{R_{eva}} - \frac{R_{eva}^3}{S(1-R_{eva}^3)} \cdot \frac{R^2}{2} \Big|_{R_{eva}} + C_4 \cdot \frac{R^3}{3} \Big|_{R_{eva}} = 0 \\ \Rightarrow &\frac{(1-R_{eva}^5)}{10S(1-R_{eva}^3)} - \frac{R_{eva}^3}{S(1-R_{eva}^3)} \cdot \frac{(1-R_{eva}^2)}{2} + C_4 \cdot \frac{(1-R_{eva}^3)}{3} = 0 \Rightarrow C_4 \end{aligned} \quad (3.68)$$

$$\begin{aligned} &= -\frac{3(1-R_{eva}^5)}{10S(1-R_{eva}^3)^2} + \frac{3R_{eva}^3(1-R_{eva}^2)}{S(1-R_{eva}^3)^2}, \\ \Psi_1(R) &= \frac{R^2}{2S(1-R_{eva}^3)} + \frac{R_{eva}^3}{S(1-R_{eva}^3)} \cdot \frac{1}{R} + \frac{(1-R_{eva}^5)}{10S(1-R_{eva}^3)^2} + \frac{3R_{eva}^3(1-R_{eva}^2)}{S(1-R_{eva}^3)^2}. \end{aligned} \quad (3.69)$$

Решаем систему уравнений (3.31) (3.37) (3.56) относительно χ_0 :

$$\begin{cases} R^2 \frac{\partial}{\partial R} [R^2(\chi'_0)] = 0 \\ \chi'_0|_{R=1} = 0 \\ \int_{R_{eva}}^1 R^2 \chi_0 dR = -\frac{R_{eva}^2}{S} \end{cases}. \quad (3.70)$$

Т.к. $R^2(\chi'_0) = D_1$ при $R(\chi'_0)|_{R=1} = 0$, тогда:

$$\begin{aligned} D_1 = 0 \Rightarrow \chi'_0 &= \frac{D_1}{R^2} \Rightarrow \chi_0 = -\frac{D_1}{R} + D_2 \Rightarrow \chi_0 = D_2 \Rightarrow D_2 \int_{R_{eva}}^1 R^2 dR = -\frac{R_{eva}^2}{S} \Rightarrow \\ \Rightarrow D_2 \frac{R^3}{3} \Big|_{R=R_{eva}} &= -\frac{R_{eva}^2}{S} \Rightarrow D_2 = -\frac{3R_{eva}^2}{S(1-R_{eva}^3)} \end{aligned} \quad (3.71)$$

Решаем систему уравнений (3.33) (3.45) (3.56) относительно χ_1 :

$$\begin{cases} R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2(\chi'_1)] = \chi_0 \\ \chi'_1|_{R=1} = 0 \\ \int_{R_{eva}}^1 R^2 \chi_1 dR = 0 \end{cases}, \quad (3.72)$$

$$\frac{\partial}{\partial R} [R^2(\chi'_1)] = D_2 R^2 \Rightarrow R^2(\chi'_1) = D_2 \frac{R^3}{3} + D_3. \quad (3.73)$$

При R=1:

$$\begin{aligned} 0 = D_2 + \frac{1}{3} D_3 \Rightarrow D_3 = -D_2 \frac{1}{3} = \frac{R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} \Rightarrow \chi'_1 = D_2 \frac{R}{3} + \frac{D_3}{R^2} \Rightarrow \chi_1 \\ = D_2 \frac{R^2}{6} + \frac{D_3}{R} + D_4, \end{aligned} \quad (3.74)$$

$$\chi_1 = -\frac{R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} \cdot \frac{R^2}{2} + \frac{R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} \cdot \frac{1}{R} + D_4, \quad (3.75)$$

$$\begin{aligned} \int_{Ru}^1 R^2 \left[-\frac{R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} \cdot \frac{R^2}{2} + \frac{R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} \cdot \frac{1}{R} + D_4 \right] dR = 0 \\ \Rightarrow -\frac{R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} \cdot \frac{R^5}{10} \Big|_{R_{eva}}^1 - \frac{3R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} \cdot \frac{R^2}{2} \Big|_{R_{eva}}^1 + D_4 \frac{R^3}{3} \Big|_{R_{eva}}^1 \\ \Rightarrow -\frac{R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} \cdot \frac{1 - R_{eva}^5}{10} - \frac{3R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} \cdot \frac{(1 - R_{eva}^2)}{2} + D_4 \frac{(1 - R_{eva}^3)}{3}, \end{aligned} \quad (3.76)$$

$$D_4 = \frac{R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} \frac{1 - R_{eva}^5}{10} + \frac{9R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)^2} \frac{(1 - R_{eva}^2)}{2}. \quad (3.77)$$

Итоговое решение в изображениях:

$$\begin{aligned} v_L(R, S) = Ki(S) \left[\frac{3}{S(1 - R_{eva}^3)} + S \left\{ \frac{R}{2S(1 - R_{eva}^3)} - \frac{R_{eva}^3}{SR(1 - R_{eva}^3)} - \frac{3(1 - R_{eva}^5)}{10S(1 - R_{eva}^3)^2} + \frac{3R_{eva}^3(1 - R_{eva}^5)}{S(1 - R_{eva}^5)^2} \right\} \right] + \\ + \Theta_L(S) \left[\frac{-3R_{eva}^2}{S(1 - R_{eva}^3)} + S \left\{ \frac{-R^2 R_{eva}^3}{2S(1 - R_{eva}^3)} - \frac{3R_{eva}^2}{SR(1 - R_{eva}^3)} + \frac{3R_{eva}^2(1 - R_{eva}^5)}{S(1 - R_{eva}^3)^2} + \frac{9R_{eva}^2(1 - R_{eva}^2)}{2S(1 - R_{eva}^3)^2} \right\} \right] + \frac{P_{01}}{S^2}. \end{aligned} \quad (3.78)$$

Переходим к оригиналам:

$$\Theta_{L1}(R, S) - \frac{\Theta_0}{S} = \frac{1}{(1 - R_{eva}^3)} \{A_1 - \Theta_L(S)A_2 + Ki(S)A_3\} + \frac{P_{01}}{S^2}, \quad (3.79)$$

$$\text{где } A_1 = \left[\frac{3Ki(S)}{S} - \frac{3\Theta_{L1}(R, S)}{S} R_{eva}^2 \right],$$

$$A_2 = \left[\frac{-R_{eva}^2 R^2}{2} - \frac{3R_{eva}^2}{R} + \frac{3}{10} \frac{R_{eva}^2 (1 - R_{eva}^5)}{(1 - R_{eva}^3)} - \frac{3R_{eva}^2 (1 - R_{eva}^2)}{2(1 - R_{eva}^3)} \right],$$

$$A_3 = \left[\frac{R^2}{2} - \frac{R_{eva}^3}{R} - \frac{3}{10} \frac{(1 - R_{eva}^5)}{(1 - R_{eva}^3)} + \frac{3R_{eva}^3 (1 - R_{eva}^2)}{(1 - R_{eva}^3)} \right].$$

Рассмотрим процесс теплопереноса во влажной части. Перейдём к безразмерным переменным. Тогда теплоперенос в второй зоне будет описываться следующей системой уравнений:

$$K_a \frac{\partial \Theta_2(R, Fo)}{\partial Fo} = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial \Theta(R, Fo)}{\partial R} \right] + P_{02}, \quad (3.80)$$

$$\partial \Theta_2(R, 0) \approx \Theta_0, \quad (3.81)$$

$$\frac{\partial \Theta_2(R, Fo)}{\partial R} = 0, \quad (3.82)$$

$$\frac{\partial \Theta_2(R, Fo)}{\partial R} = \Theta_2(Fo). \quad (3.83)$$

Переходим в область оригиналов:

$$K_a (S \Theta_2(R, S) - \Theta_0) = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial \Theta(R, S)}{\partial R} \right] + P_{02}, \quad (3.84)$$

$$\frac{\partial \Theta_2(0, S)}{\partial R} = 0, \quad (3.85)$$

$$\frac{\partial \Theta_{2L}(Ru, S)}{\partial R} = \Theta_{2L}(S). \quad (3.86)$$

Пусть $v_L(R, S) = \Theta_L(R, S) - \frac{\Theta_0}{S}$, тогда:

$$K_a S v_L(R, S) = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial \Theta_{2L}(R, S)}{\partial R} \right] + \frac{P_{02}}{S} \Rightarrow v_L(R, S) =$$

$$= \frac{R^{-2}}{K_a S} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial \Theta_{2L}(R, S)}{\partial R} \right] + \frac{P_{02}}{K_a S^2} \Rightarrow v_L(R, S) = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial v_L(R, S)}{\partial R} \right] + \frac{P_0}{S}, \quad (3.87)$$

$$\frac{\partial v(0, S)}{\partial R} = 0, \quad (3.88)$$

$$\frac{\partial v(Ru, S)}{\partial R} = \Theta_{2L}(S). \quad (3.89)$$

Проведём замену:

$$v_L(R, S) = \frac{1}{K_a} \Theta_{2L}(S) F_1(R, S) + \frac{P_{02}(S)}{K_a} F_2(R, S). \quad (3.90)$$

здесь:

$$F_1(R, S) = \varphi_0(R, S) + S \varphi_1(R, S) + S^2 \varphi_2(R, S) + \dots, \quad (3.91)$$

$$F_2(R, S) = S^{-2}, \quad (3.92)$$

$$v_{2L}(R, S) = \frac{1}{K_a} \Theta_{2L}(S) [\varphi_0(R, S) + S\varphi_1(R, S) + S^2\varphi_2(R, S) + \dots] + \frac{P_{02}(S)}{K_a S^2}, \quad (3.93)$$

$$\frac{\partial v_{2L}(Ru, S)}{\partial R} = \frac{1}{K_a} \Theta_{2L}(S) [\varphi'_0 + S\varphi'_1 + \dots]. \quad (3.94)$$

При $R=0$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_a} \Theta_{2L}(S) [\varphi'_0 + S\varphi'_1 + \dots] &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \varphi'_0|_{R=0} + S\varphi'_1|_{R=0} &= 0. \end{aligned} \quad (3.95)$$

При $R=R_{eva}$:

$$\begin{aligned} \Theta_{2L}(S) &= \frac{1}{K_a} \Theta_{2L}(S) [\varphi'_0 + S\varphi'_1 + \dots] \Rightarrow \\ \Rightarrow \varphi'_0 + S\varphi'_1 + \dots &= K_a. \end{aligned} \quad (3.96)$$

Подставим (3.93) в (3.80):

$$K_a S \left[\frac{1}{K_a} \Theta_{2L}(S) [\varphi_0 + S\varphi_1 + \dots] \right] = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial}{\partial R} \left\{ \frac{1}{K_a} \Theta_{2L}(S) [\varphi_0 + S\varphi_1 + \dots] \right\} \right] + \frac{P_{02}}{S} \Rightarrow \quad (3.97)$$

$$S(\varphi_0 + S\varphi_1) = \frac{R^{-2}}{K_a} \frac{\partial}{\partial R} [R^2 \varphi'_0] + \frac{SR^{-2}}{K_a} \frac{\partial}{\partial R} [R^2 \varphi'_1] \quad (3.98)$$

$S^0: \frac{1}{K_a} R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} (R^2 \varphi'_0) = 0 \quad (3.99)$	$S^1: \frac{1}{K_a} R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} (R^2 \varphi'_1) = 0 \quad (3.100)$
$\varphi'_0 _{R=0} = 0 \quad (3.101)$	$\varphi'_0 _{R=Ru} = K_a \quad (3.102)$
$\varphi'_1 _{R=0} = 0 \quad (3.103)$	$\varphi'_1 _{R=Ru} = 0 \quad (3.104)$

Так как одну из известных нельзя разделить при заданных граничных условиях $\dots \varphi'_0|_{R=R_{eva}}$, то для неё используется теория о среднем для:

$$\begin{aligned} \frac{S}{\frac{4}{3}\pi R_4^3} \int_0^{R_{eva}} 4\pi R^2 v_2(R, S) dR &= \frac{1}{\frac{4}{3}\pi R_4^3} \int_0^{R_{eva}} \frac{4\pi R^2}{K_a} R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2(R, S)] + \frac{1}{\frac{4}{3}\pi R_4^3} \int_0^{R_{eva}} \frac{4\pi R^2}{K_a S^2} P o^2 dR \Rightarrow \\ \Rightarrow S \int_0^{Ru} v_2(R, S) dR &= \int_0^{Ru} \frac{1}{K_a} R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial}{\partial R} v(R, S) \right] dR + \int_0^{Ru} \frac{1}{K_a S^2} P o^2 dR. \end{aligned} \quad (3.105)$$

$$\begin{aligned}
& S \int_0^{R_{eva}} R^2 \left(\frac{1}{K_a} Q_2(\gamma)(\varphi_0 + S\varphi_1 + \dots) + \frac{1}{K_a S^2} P o^2 \right) dR = \\
& = \frac{S}{K_a} (R_{eva}^2 \frac{1}{K_a} Q_{2L}(\gamma)(\varphi_0 + \varphi_1 + \dots) + \int_0^{R_{eva}} \frac{1}{K_a S^2} P o^2 dR = \\
& = S \int_0^{R_{eva}} R^2 \frac{1}{K_a} Q_2(\gamma)(\varphi_0 + S\varphi_1 + \dots) dR + \int_0^{R_{eva}} \frac{1}{K_a S^2} P o_2 dR = \\
& = \frac{1}{K_a} \left[R_{eva}^2 \frac{1}{K_a} Q_{2L}(\gamma)(\varphi_0'|_{R=R_u} + S\varphi_1'|_{R=R_u} + \dots) \right] + \int_0^{R_{eva}} \frac{1}{K_a S^2} P o^2 dR \Rightarrow \\
& \Rightarrow S \int_0^{R_{eva}} R^2 (\varphi_0 + S\varphi_1 + \dots) dR = \frac{1}{K_a} \{ R_{eva}^2 (\varphi_0|_{R_{eva}}^1 + S\varphi_1|_{R_{eva}}^1) \}.
\end{aligned} \tag{3.106}$$

В соответствии с (3.99), (3.101), (3.103):

$$S \int_0^{R_{eva}} R^2 \varphi_0 dR + S^2 \int_0^{R_{eva}} R^2 \varphi_1 dR = \frac{1}{K_a} \{ R_{eva}^2 \cdot K_a \} + \frac{S}{K_a} R_{eva}^2 \cdot 0, \tag{3.107}$$

$$\int_0^{R_{eva}} R^2 \varphi_0 dR = \frac{R_{eva}^2}{S}; \quad \int_0^{R_{eva}} R^2 \varphi_1 dR = 0, \tag{3.108}$$

$$\varphi_0|_{R_{eva}}^1 = 0; \quad \int_0^{R_{eva}} R^2 \varphi_0 dR = \frac{R_{eva}^2}{S}. \tag{3.109}$$

В итоге:

$$R^2 \varphi_0' = C_1, \tag{3.110}$$

$$\varphi_0' = \frac{C_1}{R^2} \Rightarrow \varphi_0 = -\frac{C_1}{R} + C_2 \Rightarrow \varphi_0 = C_2 \Rightarrow C_1 = 0. \tag{3.111}$$

Найдём C_2 из (3.106):

$$\int_0^{R_{eva}} R^2 \varphi_0 dR = \frac{R_{eva}^2}{S} \Rightarrow \frac{R_{eva}^3}{3} C_2 = \frac{R_{eva}^2}{S} \Rightarrow C_2 = \frac{3}{R_{eva} S} \Rightarrow \varphi_0 = \frac{3}{R_{eva} S}. \tag{3.112}$$

Найдём φ_1 из (3.100), (3.102) и (3.104):

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{K_a} R^{-2} \left[\frac{\partial}{\partial R} (R^2 \varphi_1') \right] = \varphi_0 \Rightarrow \varphi_0|_{R_{eva}}^1 = 0 \Rightarrow \varphi_0 = \frac{3}{R_{eva} \cdot S} \Rightarrow \\
& \Rightarrow \frac{1}{K_a} R^{-2} \left[\frac{\partial}{\partial R} (R^2 \varphi_1') \right] = \frac{3}{R_{eva} \cdot S} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial R} (R^2 \varphi_1') = \frac{3 \cdot K_a \cdot R^2}{R_{eva} \cdot S}
\end{aligned} \tag{3.113}$$

Интегрируем:

$$R^2 \varphi_1' = \frac{3}{R_{eva} \cdot S} \cdot \frac{R^3}{3} + C_3 \Rightarrow C_3 = 0 \Rightarrow \varphi_1' = \frac{K_a \cdot R}{R_{eva} \cdot S}. \tag{3.114}$$

Интегрируем:

$$\varphi_1 = \frac{K_a}{R_{eva} \cdot S} \cdot \frac{R^2}{2} + C_4 = \frac{K_a \cdot R^2}{2 \cdot R_{eva} \cdot S} + C_4. \tag{3.115}$$

C_4 найдем из (3.107):

$$C_4 = -\frac{K_a}{R_{eva} \cdot S} \cdot \frac{R_{eva}^5}{10} \cdot \frac{3}{R_{eva}^3} = -\frac{3}{10} \frac{K_a}{S} \cdot R_{eva}, \quad (3.116)$$

$$\varphi_1 = \frac{K_a}{R_{eva} \cdot S} \cdot \frac{R^2}{2} - \frac{3}{10} \frac{K_a}{S} \cdot R_{eva}. \quad (3.117)$$

Итоговое решение в отображениях:

$$v_l(R, S) = \frac{1}{K_a} Q_2(\gamma) \frac{3}{R_{eva} \cdot S} + \frac{S}{K_a} Q_2(S) \cdot \left[\frac{K_a}{R_{eva} \cdot S} \frac{R^2}{2} - \frac{3}{10} \frac{K_a}{S} \cdot R_{eva} \right] + \frac{Po_2}{K_a S^2}. \quad (3.118)$$

Проведём переход к оригиналам:

$$\Theta_2(R, Fo) - \Theta_0 = \frac{3}{R_{eva} \cdot S} \int_0^{Fo} \Theta_2(n) dn + \Theta_2(Fo) \left\{ \frac{R^2}{2R_{eva}} - \frac{3R_{eva}}{10} \right\} + \frac{Po_2}{K_a} Fo. \quad (3.119)$$

Итоговое решение:

Для зоны 1:

$$\begin{aligned} \theta_y(R, F_0) = \theta_0 + \frac{1}{1 - R_{eva}^3} & \left\{ 3 \int_0^{F_0} (K_i(F_0) - R_{eva}^2 Q_1(F_0)) dF_0 + \right. \\ & \left. + K_i(F_0) \left(\frac{R^2}{2} - \frac{R_{eva}^3}{R} - \frac{3}{10} \frac{1 - R_{eva}^5}{1 - R_{eva}^3} + \frac{3R_{eva}^3(1 - R_{eva}^2)}{1 - R_{eva}^3} \right) \right\} - \\ & - Q_l(F_0) \left\{ \frac{R_{eva}^2}{2} R^2 + 3 \frac{R_{eva}^2}{r} - \frac{3}{10} \frac{R_{eva}^2(1 - R_{eva}^5)}{1 - R_{eva}^3} - 3 \frac{R_{eva}^2}{1 - R_{eva}^3} \frac{1 - R_{eva}^2}{2} \right\} + \frac{Po}{S^2}. \end{aligned} \quad (3.120)$$

Для зоны 2:

$$\theta_2(R, F_0) - \theta_0 = \frac{3}{K_a \cdot R_{eva}} \int_0^{F_0} Q_2(y) dy + Q_2(F_0) \cdot \left(\frac{R^2}{2R_{eva}} - 3 \cdot \frac{R_{eva}}{10} \right) + \frac{Po_2}{K_a} \cdot F_0. \quad (3.121)$$

Т.к. процесс испарения начинается при условии $\theta \equiv 1$:

$$\begin{aligned} \theta_1(R, Fo) = 1 + \frac{1}{1 - R_{eva}^2} + & \left\{ 3 \int_0^{Fo} (K_i(Fo) - R_{eva}^2 Q_1(Fo)) dFo + \right. \\ & \left. + K_i(Fo) \left[\frac{R^2}{2} - \frac{R_{eva}^3}{R} - \frac{3}{10} \frac{1 - R_{eva}^5}{1 - R_{eva}^3} + \frac{3R_{eva}^3(1 - R_{eva}^2)}{(1 - R_{eva}^3)} \right] \right\} - \\ & - Q_l(Fo) \left[\frac{R_{eva}^2}{2} R^2 + 3 \frac{R_{eva}^2}{R} - \frac{3}{10} \frac{R_{eva}^2(1 - R_{eva}^5)}{1 - R_{eva}^3} - 3 \frac{R_{eva}^2}{1 - R_{eva}^3} \frac{(1 - R_{eva}^2)}{2} \right] + Po_1 Fo, \end{aligned} \quad (3.122)$$

$$\theta_2(R, F_0) = \theta_0 + \frac{3}{K_a \cdot R_{eva}} \int_0^{F_0} Q_2(y) dy + Q_2(F_0) \left(\frac{R^2}{2R_{eva}} - 3 \frac{R_{eva}}{10} \right) + \frac{Po_2}{K_a} F_0. \quad (3.123)$$

На границе раздела системы выполняются условия 4-го рода:

$$Q_1(Fo) - Q_2(Fo)K_\lambda \equiv V(Fo), \quad (3.124)$$

$$\theta = \frac{T}{T_{eva}} \Rightarrow \theta_0 = 1, \quad (3.125)$$

$$V(Fo) = -Ste \frac{dR_{eva}}{d\tau}, \quad (3.126)$$

$$\theta_1(x, Fo)/_{R=R_{eva}} = \theta_2(x, Fo)/_{R=R_{eva}} = 1. \quad (3.127)$$

В уравнении (3.124) неизвестны $Q_2(Fo)$ и R_{eva} , которые являются функциями от Fo , и могут быть определены, если удовлетворить (3.122) условию (3.124). Тогда уравнение (3.122) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} & 3 \int_0^{Fo} (Ki(Fo) - Ru^2 Q_1(Fo)) dFo = \\ & = \left(Ki(Fo) \left[\frac{R^2}{2} - \frac{R_{eva}^3}{R} - \frac{3}{10} \cdot \frac{1 - R_{eva}^5}{1 - R_{eva}^3} + \frac{3R_{eva}^3(1 - R_{eva}^2)}{(1 - R_{eva}^3)} \right] - Q_l(Fo) \right) \times \\ & \times \left[\left(\frac{R_{eva}^2}{2} R^2 + 3 \frac{R_{eva}^2}{R} - \frac{3}{10} \frac{R_{eva}^2 \cdot (1 - R_{eva}^5)}{1 - R_{eva}^3} - 3 \frac{R_{eva}^2}{1 - R_{eva}^3} \frac{(1 - R_{eva}^2)}{2} \right) + Po_1 \cdot Fo \right]. \end{aligned} \quad (3.128)$$

Если $Q_1(Fo)$ представить в виде:

$$Q_1(Fo) = V(Fo) + K_\lambda Q_2(Fo), \quad (3.129)$$

то уравнение (3.122) с учетом условия (3.124) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{1 - R_{eva}^2} \left\{ 3 \int_0^{Fo} [Ki(Fo) - R_{eva}^2 (V(Fo) + K_\lambda Q_2(Fo))] dFo + \right. \\ & \left. + Ki(Fo) \left[-\frac{R_{eva}^2}{2} + \frac{-2.7R_{eva}^5 + 3R_{eva}^3 - 0.3}{1 - R_{eva}^3} \right] \right\} - V(Fo) + \\ & + K_\lambda Q_2(Fo) \left[\frac{R_{eva}^4}{2} + 3R_{eva} + \frac{0.3R_{eva}^5 + 1.5R_{eva}^4 - 1.8R_{eva}^2}{1 - R_{eva}^3} \right] + Po_1 Fo = 0. \end{aligned} \quad (3.130)$$

аналогично уравнение (3.122):

$$\begin{aligned} & 3 \int_0^{Fo} (Ki(Fo) - R_{eva}^2 (V(Fo) + K_\lambda Q_2(Fo))) dFo + Ki(Fo) \alpha(R_{eva}) + \\ & + (V(Fo) + K_\lambda Q_2(Fo)) \beta(R_{eva}) + Po Fo (1 - R_{eva}^2) = 0, \end{aligned} \quad (3.131)$$

где

$$\alpha(R_{eva}) = \left[-\frac{R_{eva}^2}{2} + \frac{-2.7R_{eva}^5 + 3R_{eva}^3 - 0.3}{1 - R_{eva}^3} \right],$$

$$\beta(R_{eva}) = \left[\frac{R_{eva}^4}{2} + 3R_{eva} + \frac{0.3R_{eva}^5 + 1.5R_{eva}^4 - 1.8R_{eva}^2}{1 - R_{eva}^3} \right] (1 - R_{eva}^2).$$

При конвективном теплообмене:

$$\left. \frac{\partial \theta_1}{\partial R} \right|_{R=1} = Ki(Fo) = Bi(\theta_c - \theta_1|_{R=1}) = \quad (3.132)$$

$$\begin{aligned}
&= Bi \left(\theta_C - 1 - \frac{1}{1 - R_{eva}^2} \left(3 \int_0^{Fo} (Ki(Fo) - R_{eva}^2 \theta_1(Fo)) dFo + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + Ki(Fo) \left[\frac{1}{2} - R_{eva}^3 + \frac{-0.3 + 3R_{eva}^3 - 2.7R_{eva}^5}{1 - R_{eva}^3} \right] \right) + \right. \\
&\quad \left. + \theta_1(Fo) \left[3.5R_{eva}^2 - \frac{3}{10} \frac{R_{eva}^2(1 - R_{eva}^5)}{1 - R_{eva}^3} - 3 \frac{R_{eva}^2}{1 - R_{eva}^3} \frac{1 - R_{eva}^2}{2} \right] - Po_1 Fo \right), \\
&\quad \frac{\partial \theta_1}{\partial R} \Big|_{R=1} = \frac{1}{1 - R_{eva}^2} Ki(Fo) [1 + R_{eva}^3] - 2R_{eva}^2 Q_1(Fo), \tag{3.133}
\end{aligned}$$

$$\alpha(R_{eva}) = \left[\frac{1}{2} - R_{eva}^3 + \frac{-0.3 + 3R_{eva}^3 - 2.7R_{eva}^5}{1 - R_{eva}^3} \right], \tag{3.134}$$

$$\beta(R_{eva}) = \left[3.5R_{eva}^2 - \frac{3}{10} \frac{R_{eva}^2(1 - R_{eva}^5)}{1 - R_{eva}^3} - 3 \frac{R_{eva}^2}{1 - R_{eva}^3} \frac{1 - R_{eva}^2}{2} \right], \tag{3.135}$$

$$\begin{aligned}
\gamma(R_{eva}) &= \frac{1}{1 - R_{eva}^2} (1 + R_{eva}^3), \\
\delta(R_{eva}) &= 2R_{eva}^2. \tag{3.136}
\end{aligned}$$

Проведём преобразование (3.133):

$$\begin{aligned}
Bi(\theta - 1) - \frac{1}{1 - R_{eva}^2} \left(3 \int_0^{Fo} (Ki(Fo) - R_{eva}^2 \theta_1(Fo)) dFo + \right. \\
\left. + Ki(Fo) \alpha(R_{eva}) + \theta_1(Fo) \beta(R_{eva}) - Po_1 Fo \right) = \\
= \gamma(R_{eva}) Ki(Fo) \delta(R_{eva}) Q(Fo), \tag{3.137}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{3Bi}{1 - R_{eva}^2} \int_0^{Fo} Ki(Fo) dFo + \left[\frac{3Bi}{1 - R_{eva}^2} \alpha(R_{eva}) - \gamma(R_{eva}) \right] Ki(Fo) - \\
&- \frac{3Bi}{1 - R_{eva}^2} \int_0^{Fo} R_{eva}^2 Q(Fo) dFo + [\beta(R_{eva}) + \delta(R_{eva})] \theta_1(Fo) + Bi(\theta_C - 1 - Po_1 Fo) = 0, \tag{3.138}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\left[\frac{3Bi}{1 - R_{eva}^2} \alpha(R_{eva}) - \gamma(R_{eva}) \right] Ki(Fo) + [\beta(R_{eva}) + \delta(R_{eva})] \theta_1(Fo) + Bi(\theta_C - 1 - Po_1 Fo) = \\
&= 0. \tag{3.139}
\end{aligned}$$

Тогда выражение для поверхностного теплового потока будет иметь вид:

$$Ki(Fo) = \frac{[\beta(R_{eva}) + \delta(R_{eva})] \theta_1(Fo) + Bi(\theta_C - 1 - Po_1 Fo)}{\left[-\frac{3Bi}{1 - R_{eva}^2} \alpha(R_{eva}) + \gamma(R_{eva}) \right]}, \tag{3.140}$$

$$\frac{\theta_C - 1 - Po_1 Fo}{D(R_{eva})} = \frac{\theta_C - 1}{D(R_{eva})} \cdot \frac{Po_1 Fo}{D(R_{eva})} + V. \tag{3.141}$$

В (3.133) сделаем подстановку:

$$\frac{\theta_C - 1 - Po_1 Fo}{D(R_{eva})} - (V(Fo) + K_\lambda q_1)(E(R_{eva}) + R_{eva}) = \tag{3.142}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\theta_c - 1}{D(R_{eva})} - (V(Fo) + K_\lambda q_1)(E(R_{eva}) + R_{eva}) - \frac{Po_1 Fo}{D(R_{eva})} = \\
&= \frac{\theta_c - 1}{D(R_{eva})} - (V(Fo) + K_\lambda q_1)(E(R_{eva}) + R_{eva}) - \frac{Po_1 Fo(E(R_{eva}) + R_{eva})}{(E(R_{eva}) + R_{eva})D(R_{eva})} = \\
&= \frac{\theta_c - 1}{D(R_{eva})} - \left(V(Fo) - \frac{Po_1 Fo}{(E(R_{eva}) + R_{eva})D(R_{eva})} + K_\lambda q_1 \right) (E(R_{eva}) + R_{eva}).
\end{aligned}$$

Пусть:

$$W = V(Fo) - \frac{Po_1 Fo}{(E(R_{eva}) + R_{eva})D(R_{eva})}. \quad (3.143)$$

Тогда:

$$\frac{\theta_c - 1}{D(R_{eva})} - (W(Fo) + K_\lambda q_1)(E(R_{eva}) + R_{eva}). \quad (3.144)$$

Решение (3.133) можно аналогично записать в виде:

$$\tilde{m}Fo = I_L + \sum_{j=1}^2 I_j + \sum_{k=1}^3 P_k, \quad (3.145)$$

Где $I_L = \frac{1 - R_{eva}^3}{3} \left[\frac{1}{Bi_1} - \frac{A(R_{eva})}{2} \right];$

$$I_1(R_{eva}) = \frac{\tilde{m}Ka}{30} D(R_{eva}) \Phi(R_{eva});$$

$$I_2(R_{eva}) = \frac{\tilde{m}Ka}{30} \int_1^{Ru} \frac{B(R_{eva})}{1 - R^3} \Phi(R_{eva}) dR;$$

$$P_1(R_{eva}) = \frac{\tilde{m}KaK_\lambda}{30} [\beta(R_{eva}) - \alpha(R_{eva})E(R_{eva})] q_2(Fo);$$

$$P_2(R_{eva}) = \frac{\tilde{m}KaK_\lambda}{10} \int_0^{R_{eva}} q_2(R) \frac{B(R_{eva})}{1 - R^3} [\beta(R_{eva}) - \alpha(R_{eva})E(R_{eva})] dR;$$

$$P_3(R_{eva}) = \tilde{m}K_\lambda \int_0^{Fo} q_2(Fo) D(R_{eva}) [E(R_{eva}) + R_{eva}^2] dFo;$$

$$\Phi(R_{eva}) = \frac{\alpha(R_{eva})}{D(R_{eva})} + [\beta(R_{eva}) - \alpha(R_{eva})E(R_{eva})] W(R_{eva});$$

$$\tilde{m} = \frac{c}{M};$$

$$W = V(Fo) - \frac{Po_1 Fo}{(E(R_{eva}) + R_{eva})D(R_{eva})}.$$

Решая уравнение (3.134) относительно Fo , в предположении, что $R_{eva}=0$ (другими словами, фронт испарения достиг центра частицы) можно найти характерное время стадии сушки. Относительно структуры достаточно сложного

решения (3.134) следует отметить, что первое слагаемое $I_1(R_{eva})$ является известным решением Л.С. Лейбензона [120] при упрощающих предположениях, т.е. пренебрегая теплоемкостью обеих зон частицы (сухой и влагонасыщенной). С физической точки зрения сумма $\sum_{i=1}^2 I_i(R_{eva})$ учитывает нагрев высохшего слоя частицы, а $\sum_{i=1}^3 P_i(q_2; R_{eva})$ – подогрев исходного влагонасыщенного топлива. Функция V в (3.134) характеризует ту часть тепла, которая идёт на испарение.

3.3 Решение задачи зажигания частицы древесины

После окончания процедуры влагоудаления наступает стадия зажигания частицы древесной биомассы. При этом процесс воспламенения можно условно разделить на две последовательные стадии:

1. Прогрев частицы до температуры, при которой начинается интенсивное термохимическое реагирование горючего с окислителем. Иными словами, это стадия, когда поток тепла от внешнего источника (высокотемпературной среды или микроволнового излучения) превышает поток тепла, выделяющегося в результате термохимической реакции горючего с окислителем;

2. Зажигание частицы, происходящее после достижения системой заданной температуры. Период времени, когда скорость притока теплоты за счёт термохимической реакции выше скорости притока теплоты от внешнего источника.

С целью установления основных значимых характеристик процесса зажигания (предельная температуры воспламенения T_{ign} , время задержки воспламенения t_{ign}) реализована постановка задачи, схема которой приведена на рисунке 3.4. При этом приняты следующие упрощающие допущения:

- Теплофизические свойства частицы постоянны;
- Частица – сфера;
- Перенос тепла – одномерный;
- Физические свойства частицы биомассы изотропны.

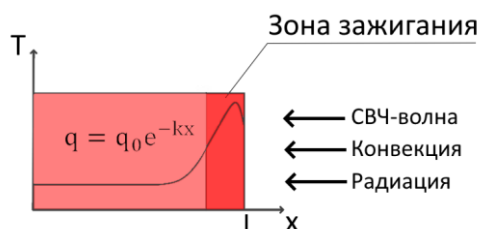
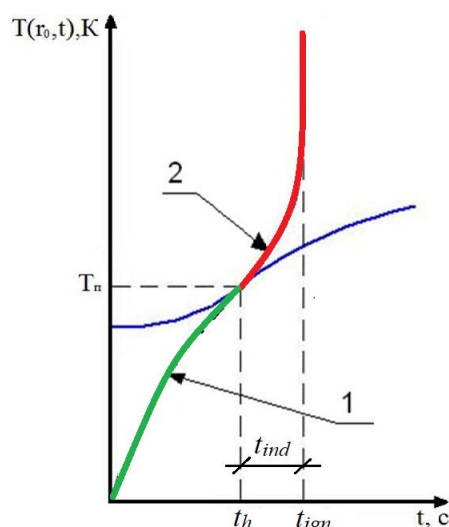


Рисунок 3.4 – Схема решаемой задачи зажигания частицы древесины



1 – стадия нагрева, 2 – воспламенение

Рисунок 3.5 – Изменение температуры поверхности топливной частицы в процессе воспламенения

Принято, что сухая частица древесины находится в потоке дымовых газов и обдувается последними. При этом на частицу воздействует микроволновое излучение, а также конвективный и лучистый тепловые потоки. Процесс зажигания описывается уравнением теплопроводности с внутренним источником тепла вследствие химической реакции и поглощения микроволновой энергии.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta \theta}\right) + K_q \exp(-Bu\xi), \quad (3.146)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = Ki(\tau), \quad (3.147)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=L} = 0. \quad (3.148)$$

Задача зажигания решалась в рамках адиабатической теории [101]. Таким образом, процесс зажигания можно условно разбить на две последовательных этапа (рисунок 3.5).

1. Инертный нагрев до температуры (на поверхности частицы) начала зажигания;

2. Зажигание топлива.

С учётом этого уравнение (3.146) можно условно разбить на два:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + K_q \exp(-Bu\xi), \quad (3.149)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right). \quad (3.150)$$

На первом этапе решается задача прогрева, для этого рассмотрим следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + K_q \exp(-Bu\xi), \quad (3.151)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = Ki(\tau), \quad (3.152)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} = 0. \quad (3.153)$$

Процесс зажигания происходит быстро. В соответствии с [118] отображение $f(\tau) \rightarrow F(s)$ находится из условия, что τ – «малое», а отображение времени s – «большое». В результате система (3.151) – (3.153) приводится к виду:

$$s\theta_L(\xi, s) - \theta_0 = \theta_L''(\xi, s) + \frac{K_q}{s} \cdot e^{-Bu\xi}, \quad (3.154)$$

$$-\theta_L'(0, s) = Ki_L(s), \quad (3.155)$$

$$\theta_L'(1, s) = 0. \quad (3.156)$$

Получим решение системы (3.154) – (3.156) как сумму решения однородной задачи и решения с учётом неоднородного члена:

$$\theta(\xi, s) = Ae^{-\sqrt{s}\xi} + Be^{\sqrt{s}\xi} + Ce^{-Bu\xi} + \frac{\theta_0}{s}. \quad (3.157)$$

Подставляя (3.157) в уравнение (3.154), находим константу C :

$$\begin{aligned} Ae^{-\sqrt{s}\xi}s + Be^{\sqrt{s}\xi}s + Ce^{-Bu\xi}s + \frac{\theta_0}{s}s - \theta_0 &= Ae^{-\sqrt{s}\xi}s + Be^{\sqrt{s}\xi}s + Bu^2Ce^{-Bu\xi} + \frac{K_q}{s}e^{-Bu\xi} \Rightarrow \\ \Rightarrow Ce^{-Bu\xi}s &= Bu^2Ce^{-Bu\xi} + \frac{K_q}{s}e^{-Bu\xi} \Rightarrow Ce^{-Bu\xi}(s - Bu^2)\frac{K_q}{s}e^{-Bu\xi} \Rightarrow C = \frac{K_q}{s(s - Bu^2)}. \end{aligned} \quad (3.158)$$

Подставляем C в граничные условия (3.155) – (3.156):

$$\theta_L'(1, s) = 0 \Rightarrow -\sqrt{s}Ae^{-\sqrt{s}} + \sqrt{s}Be^{\sqrt{s}} - BuCe^{-Bu} = 0, \quad (3.159)$$

$$-\theta_L'(0, s) = Ki_L(s) \Rightarrow -\sqrt{s}A + \sqrt{s}B - BuC = -Ki_L. \quad (3.160)$$

В результате получим значения «А»:

$$A = \frac{Ki_L - BuC}{\sqrt{s}} + B. \quad (3.161)$$

Тогда константу В найдём следующим образом:

$$-\sqrt{s} \left(\frac{Ki_L - BuC}{\sqrt{s}} + B \right) e^{-\sqrt{s}} + \sqrt{s} B e^{\sqrt{s}} - BuC e^{-Bu} = 0, \quad (3.162)$$

$$B = \frac{BuC e^{-Bu} + (Ki_L - BuC) e^{\sqrt{s}}}{\sqrt{s}(-e^{-\sqrt{s}} + e^{\sqrt{s}})} = \frac{Bu \frac{K_q}{s(s - Bu^2)} (e^{-Bu} - e^{-\sqrt{s}}) + Ki_L e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}(-e^{-\sqrt{s}} + e^{\sqrt{s}})}, \quad (3.163)$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{Ki_L - BuC}{\sqrt{s}} + B = \\ &= \frac{Ki_L - Bu \frac{K_q}{s(s - Bu^2)}}{\sqrt{s}} + \frac{Bu \frac{K_q}{s(s - Bu^2)} (e^{-Bu} - e^{-\sqrt{s}}) + Ki_L e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}(-e^{-\sqrt{s}} + e^{\sqrt{s}})}. \end{aligned} \quad (3.164)$$

В этом случае решением системы уравнений (3.154) – (3.156) будет следующее выражение:

$$\begin{aligned} \theta(\xi, s) &= \\ &= \frac{Bu \frac{K_q}{s(s - Bu^2)} (e^{-Bu} - e^{-\sqrt{s}}) + Ki_L e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}(-e^{-\sqrt{s}} + e^{\sqrt{s}})} [e^{-\sqrt{s}\xi} + e^{\sqrt{s}\xi}] + e^{-\sqrt{s}\xi} + \frac{Ki_L e^{-\sqrt{s}\xi}}{\sqrt{s}} - \\ &\quad - Bu \frac{K_q}{s\sqrt{s}(s - Bu^2)} e^{-Bu\xi} + \frac{K_q}{s(s - Bu^2)} e^{-Bu\xi} + \frac{\theta_0}{s}. \end{aligned} \quad (3.165)$$

Найдём обратное преобразование Лапласа от слагаемых в (3.165) (начиная с конца формулы, но при этом не затрагивая слагаемые с Ki):

$$L^{-1} \left[\frac{\theta_0}{s} \right] = \theta_0, \quad (3.166)$$

$$L^{-1} \left[\frac{K_q}{s(s - Bu^2)} e^{-Bu\xi} \right] = K_q e^{-Bu\xi} L^{-1} \left[\frac{1}{s(s - Bu^2)} \approx \frac{1}{s^2} \right] = K_q e^{-Bu\xi} \tau, \quad (3.167)$$

$$L^{-1} \left[Bu \frac{K_q}{s\sqrt{s}(s - Bu^2)} e^{-\sqrt{s}\xi} \right] = Bu K_q L^{-1} \left[\frac{e^{-\sqrt{s}\xi}}{s\sqrt{s}(s - Bu^2)} \approx \frac{e^{-\sqrt{s}\xi}}{s^{\frac{5}{2}}} \right] \approx 0, \quad (3.168)$$

$$L^{-1} \left[Bu \frac{K_q}{s^{\frac{3}{2}}(s - Bu^2)} (e^{-Bu} - e^{-\sqrt{s}}) \frac{[e^{-\sqrt{s}\xi} + e^{\sqrt{s}\xi}]}{(e^{-\sqrt{s}} + e^{\sqrt{s}})} \right] = \frac{4e^{-Bu} \tau^{\frac{3}{2}}}{3\sqrt{\pi}}. \quad (3.169)$$

Для того, чтобы найти обратное преобразование Лапласа от слагаемого, содержащего Ki , воспользуемся теоремой о свертке [118]. Рассмотрим первое слагаемое с учетом $Ki(s)$.

$$L^{-1} \left[Ki(s) \frac{e^{-\sqrt{s}\xi}}{\sqrt{s}} \right] = \int_0^\tau Ki(n) \frac{e^{-\frac{\xi^2}{4(\tau-n)}}}{\sqrt{\pi(\tau-n)}} dn. \quad (3.170)$$

Разложим $Ki(n)$ вблизи $n \approx \tau$ в ряд Тейлора:

$$Ki(n) = Ki(\tau) + (n - \tau) \cdot Ki(\tau) + \dots \quad (3.171)$$

Ограничиваясь первым членом, подставим (3.171) в (3.170):

$$L^{-1} \left[Ki(s) \frac{e^{-\sqrt{s}\xi}}{\sqrt{s}} \right] = Ki(\tau) \int_0^\tau \frac{e^{-\frac{\xi^2}{4(\tau-n)}}}{\sqrt{\pi(\tau-n)}} dn. \quad (3.172)$$

Тогда итоговое решение системы (3.151) – (3.153) примет следующий вид:

$$\theta(\xi, \tau) = \theta_0 + K_q e^{-Bu\xi} \tau + \frac{4e^{-Bu}\tau^{\frac{3}{2}}}{3\sqrt{\pi}} + Ki(\tau) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\sqrt{\tau} e^{-\frac{\xi^2}{4\tau}} - \frac{\xi}{2} \sqrt{\pi} \operatorname{erfc} \left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau}} \right) \right). \quad (3.173)$$

Преобразуем (3.173) относительно $\theta(0, \tau)$:

$$\theta(0, \tau) = \frac{\theta_0 \sqrt{\pi} + K_q \sqrt{\pi} \tau + \frac{4e^{-Bu}\tau^{\frac{3}{2}}}{3} + 2[Bi\theta_r + Ki]\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi} + 2Bi\sqrt{\tau}}. \quad (3.174)$$

Если в качестве масштаба температур выбрать температуру начала воспламенения, то на границе решений уравнений (3.151) – (3.153) выполняется условие «сшивания». В этом случае (3.174) можно записать в следующем виде:

$$\theta(0, \tau) = \frac{\theta_0 \sqrt{\pi} + K_q \sqrt{\pi} \tau + \frac{4e^{-Bu}\tau^{\frac{3}{2}}}{3} + 2[Bi\theta_r + Ki]\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi} + 2Bi\sqrt{\tau}} = 0. \quad (3.175)$$

Введём следующие обозначения:

$$x = \sqrt{\tau}, \quad (3.176)$$

$$a = \frac{4e^{-Bu}}{3}, \quad (3.177)$$

$$b = K_q \sqrt{\pi}, \quad (3.178)$$

$$c = 2[Bi\theta_r + Ki], \quad (3.179)$$

$$d = \theta_0 \sqrt{\pi}. \quad (3.180)$$

Тогда уравнение (3.175) можно записать в виде:

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0. \quad (3.181)$$

Разделим это уравнение на постоянную a и введём следующие переменные:

$$x = y - \frac{b}{3a}, \quad (3.182)$$

$$p = \frac{3ac - b^2}{3a^2}, \quad (3.183)$$

$$q = \frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{27a^3}. \quad (3.184)$$

В этих условиях (3.181) можно переписать:

$$y^3 + py + q = 0. \quad (3.185)$$

В соответствии с методом Кардано [121] решением (3.185) будет:

$$y_1 = \alpha + \beta, \quad (3.186)$$

$$y_{2,3} = -\frac{\alpha + \beta}{2} \pm i \frac{\alpha + \beta}{2} \sqrt{3}, \quad (3.187)$$

$$\text{где } \alpha = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}};$$

$$\beta = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}};$$

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2.$$

Тогда константы в уравнении (3.181) будут иметь следующий вид:

$$x = \sqrt{\tau}, \quad (3.188)$$

$$a = \frac{4e^{-Bu}}{3}, \quad (3.189)$$

$$b = K_q \sqrt{\pi}, \quad (3.190)$$

$$c = 2[Bi\theta_r + Ki], \quad (3.191)$$

$$d = \theta_0 \sqrt{\pi}. \quad (3.192)$$

С учётом (3.186) – (3.192) выделим из (3.175) выражение для вычисления значений характерного времени прогрева частицы древесной биомассы до начала интенсивного реагирования:

$$t_{h1} = \left(\sqrt[3]{-\frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{54a^3} + \sqrt{\left(\frac{3ac - b^2}{3a^2}\right)^3 + \left(\frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{54a^3}\right)^2}} + \right. \\ \left. + \sqrt[3]{-\frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{54a^3} - \sqrt{\left(\frac{3ac - b^2}{3a^2}\right)^3 + \left(\frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{54a^3}\right)^2}} - \frac{b}{3a} \right)^2, \quad (3.193)$$

$$t_{h2} = [\Psi \pm i(\Lambda - \Omega - \Pi) - K]^2, \quad (3.194)$$

$$\text{где } \Psi = -\frac{\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{3ac - b^2}{9a^2}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{3ac - b^2}{9a^2}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2}}}{2};$$

$$\Lambda = \frac{\sqrt[3]{-\frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{54a^3} + \sqrt{\left(\frac{3ac - b^2}{3a^2}\right)^3 + \left(\frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{54a^3}\right)^2}}}{2};$$

$$\Pi = \frac{\sqrt[3]{-\frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{54a^3} - \sqrt{\left(\frac{3ac - b^2}{3a^2}\right)^3 + \left(\frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{54a^3}\right)^2}}}{2}\sqrt{3};$$

$$K = \frac{b}{3a}.$$

В (3.193) – (3.194) физический смысл имеют только члены, не содержащие комплексную часть, соответственно, для вычисления времени прогрева частицы воспользуемся (3.193). Зная время прогрева, можно найти полное время зажигания. Из работы О.М. Тодеса [122] известно, что полное время зажигания можно найти как:

$$t_{ign} = t_{h1} + t_{ind}, \quad (3.195)$$

$$t_{ind} = 1 + 2\beta, \quad (3.196)$$

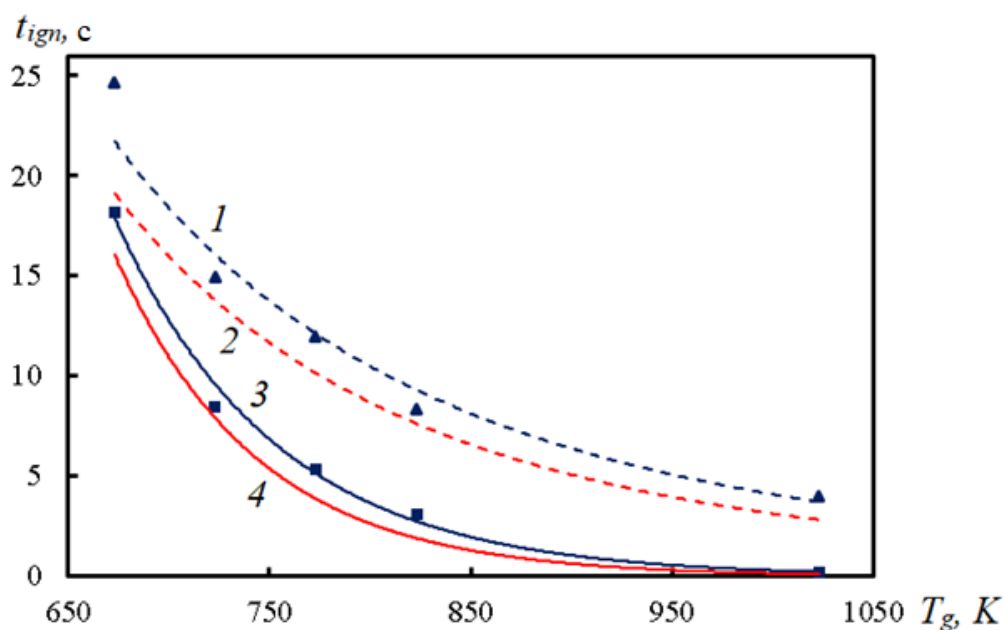
где t_{ind} – время индукции.

Время задержки воспламенения находится по принципу суперпозиции временных асимптотик каждой отдельной стадии термической подготовки (инертный нагрев, испарение воды, воспламенение):

$$t_{ign} = \sum_{i=1}^m t_i = t_{swe} + t_{fwe} + t_{ign}^{awe}. \quad (3.197)$$

Модель и методы решения были верифицированы путём сравнения теоретических и экспериментальных [29, 111] значений времени задержки зажигания частиц древесной биомассы при сложном радиационно-конвективном нагреве. На рисунке 3.6 представлены результаты по времени задержки зажигания частиц древесной биомассы при радиационно-конвективно-микроволновом нагреве. Можно отметить достаточно хорошее соотношение полученных экспериментально и по результатам математического моделирования значений t_{ign} .

Зависимости $t_{\text{ign}}(T_g)$ обладают заметно нелинейным характером, что обусловлено значительным воздействием комплекса процессов термической обработки (радиационный теплоперенос, поглощение СВЧ-энергии, источник тепловыделения Аррениусовского типа), оказывающего сложное нелинейное влияние на процессы формирования температурных полей в частице древесины и, соответственно, на условия воспламенения. На рисунке 3.6 представлены как теоретические, так и экспериментальные значения времени задержки зажигания влажных и сухих частиц древесной биомассы. Анализ этих зависимостей подтверждает, что при относительно низких температурах внешней среды ($T_g = 700$ К) различия во времени задержки зажигания сухих и влажных частиц не превышают 25%. В то время как при $T_g = 1050$ К разница может достигать 30 раз. Скорее всего, это связано с тем, что при низкотемпературном нагреве зажигание происходит после завершения процессов влагоудаления и термического



- 1, 2 – зажигание влагонасыщенных частиц древесной биомассы;
 3, 4 – зажигание сухих частиц древесной биомассы; 1, 3 – эксперимент [29, 111];
 2, 4 – теоретические значения

Рисунок 3.6 – Зависимости времён задержки зажигания частицы древесной биомассы от температуры внешней среды в условиях радиационно-конвективно-микроволнового нагрева

разложения основных компонентов биомассы. При этом зажигание обычно происходит в гетерогенном режиме.

Выводы по главе 3

1. По результатам проведённых теоретических и экспериментальных исследований впервые показано, что технология микроволнового нагрева частиц древесины в период их индукции имеет определённые перспективы при сжигании грубодроблёной биомассы в топочных устройствах;

2. По результатам проведённых экспериментов установлено, что в условиях относительно низких температур внешней среды применение СВЧ-нагрева обладает высоким потенциалом в современной теплотехнике. Показано, что при $T_g \leq 700$ К дополнительный микроволновой нагрев частиц древесины приводит к значительному (на $> 50\%$) ускорению процесса зажигания;

3. Можно сказать, что СВЧ подсветка позволяет с высокой энергетической эффективностью при одновременной низкой эмиссионности (оксидов серы и азота) сжигать био-топлива;

4. Получено аналитическое решение сложной нелинейной задачи зажигания частицы влажной древесной биомассы в условиях радиационно-конвективного и микроволнового нагрева. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных показал хорошее их соответствие.

Результаты исследований, изложенные в главе 3, опубликованы в [29].

ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЖИГАНИИ КАПЛИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

4.1 Сравнительный анализ процессов тепломассообмена при зажигании и горении капель водоугольных топлив, выполненных из природного и торрефицированного (коксовый остаток) углей

В настоящее время угольный кокс используются преимущественно в металлургии (при выплавке чугуна, и также как восстановитель железной руды) [123]. Значительная часть работ, посвящённых сжиганию угольного кокса, рассматривает этот процесс именно в рамках металлургического производства [124]. Но, как показывает опыт Китая, использование кокса в энергетических целях имеет существенные перспективы [125]. Последнее обосновывается тем, что более половины угольных запасов Китая приходится на низкосортные угли [126], которые необходимо подвергать предварительному коксованию для получения более ценных топлив, пригодных для целей энергетики. В результате образуется значительное количество коксового остатка, которое и предлагается использовать в энергетике. Стоит отметить, что фундаментальных экспериментальных и теоретических исследований процессов зажигания и горения капель водоугольных топлив, изготовленных из коксового остатка угля, практически нет. При анализе актуального состояния теории и практики процессов зажигания и горения частиц водоугольного топлива становится ясно, что на сегодняшний день практически не изучены энергетические (время задержки воспламенения) и экологические (концентрация основных газообразных антропогенных продуктов горения) характеристики горения частиц водоугольного топлива, выполненного на основе коксового остатка угля, и не проведён сравнительный анализ этих характеристик при сжигании ВУТ на основе природных и торрефицированных углей. Работа [127] содержит результаты экспериментальных исследований процессов зажигания капель органо-водоугольного топлива, изготовленного из природного угля и кокса,

полученного из того же вида угля. Однако в данной работе не проводился анализ компонентного состава газообразных продуктов сгорания органо-водоугольных топлив, изготовленных из природного угля и кокса.

Можно сказать, что использование в качестве топлива ВУТ, приготовленного на основе торрефицированного угля, позволяет разработать относительно простую математическую модель процесса зажигания капель ВУТ. Наиболее продвинутые на сегодняшний день математические постановки базируются на обширной и весьма сложной системе дифференциальных уравнений в частных производных (например, модели [128-130]). Это обусловлено тем, что, как установлено в экспериментах [131], зажигание капель ВУТ происходит в газовой фазе. При этом для адекватного описания газофазного воспламенения решается система уравнений Навье-Стокса, диффузии и энергии при термохимическом взаимодействии газообразного горючего (смесь метана, окиси углерода и водорода) с окислителем с учётом сложной кинетической схемы реагирования (модель [128]). Можно с уверенностью предположить, что капли ВУТ, созданные из коксового остатка угля, будут воспламеняться в гетерогенных условиях. В таком случае значительно облегчается математическое моделирование процессов зажигания и горения частиц водоугольного топлива. В результате для адекватного описания процесса зажигания можно разработать аналитические решения соответствующей задачи.

Первая группа водоугольных топлив была изготовлена из углей, имеющих существенно различающиеся степени метаморфизма: бурый и тощий угли. При этом коксовый остаток угля, на основе которого приготовлена вторая группа ВУТ, был изготовлен из углей тех же марок. Подготовка водоугольного топлива на основе природного угля проводилась в соответствии с методикой [28]. В таблице 4.1 перечислены теплофизические характеристики базовых компонент топлива: уголь, коксовый остаток каменного угля, вода.

Таблица 4.1 – Основные характеристики компонентов топлива [102-104]

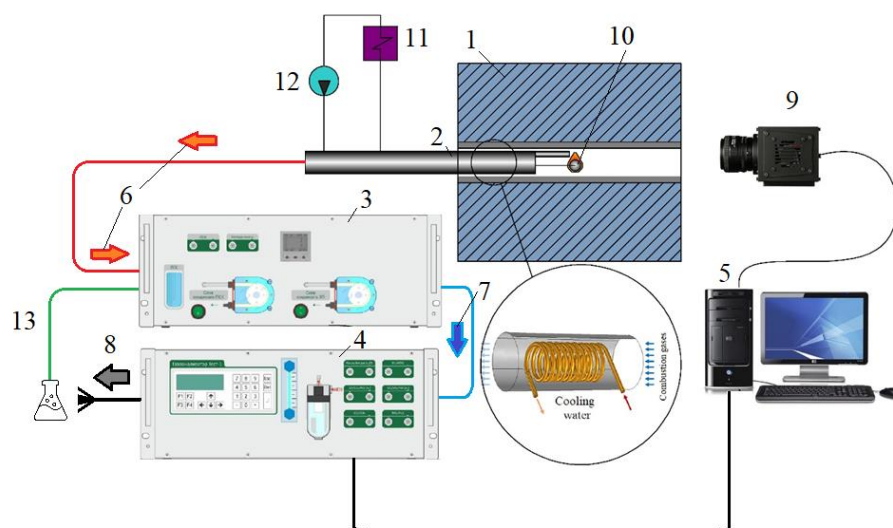
Компонент	C_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	V^{daf} , %	C^g , %	Q_p^H , Дж/кг
Уголь тощий (Т)	1000	0,134	1340	15,9	90	$25,12 \cdot 10^6$

Продолжение таблицы 4.1

Бурый уголь (БЗ)	1510	0,139	1400	55	76	$15,28 \cdot 10^6$
Коксовый остаток угля Т	820	0,49	1000	1	95	$\approx 29,03 \cdot 10^6$
Коксовый остаток угля БЗ	900	-	900	1	93	
Вода	4190	0,56	1000			

Твёрдые продукты термического разложения угля (коксовый остаток) получены методом торрефикации в условиях недостатка окислителя. Подготовка коксового остатка проводилась по следующей методике: сперва крупнокусковый уголь мельчился в щековой дробилке до состояния каменноугольной крошки (с характерным размером $\delta \leq 3$ мм). После этого полученную фракцию помещали в трубчатую печь и нагревали до температуры 1027 К без доступа кислорода. В таком состоянии уголь выдерживался в печи в течение 2 часов. Подготовка водоугольного топлива на основе коксового остатка угля проводилась по аналогичной [28] схеме. Концентрация основных компонентов топлива подбиралась исходя из критерия сохранения оптимальных эксплуатационных характеристик ВУТ (таких как вязкость и теплота сгорания). Массовое соотношение угля к воде составляло 55 / 45.

Для разработки математической модели зажигания капли (частицы) ВУТ предварительно были осуществлены экспериментальные исследования на стенде, который по своим методам регистрации и обработки результатов эксперимента соответствует стенду, описанному в главе 2 (см. рисунок 2.4). Также для обоснования перспективности использования коксового остатка каменного угля в качестве исходного сырья для производства водоугольного топлива были проведены экспериментальные исследования по анализу компонентного состава газообразных продуктов горения ВУТ.



1 – высокотемпературная печь; 2 – водоохлаждаемый пробоотборник; 3 – блок охладитель-осушитель пробы; 4 – газоанализатор; 5 – ЭВМ; 6 – проба, прошедшая первую ступень охлаждения; 7 – осушенная проба; 8 – экстракция газов из газоанализатора; 9 – высокоскоростная видеокамера; 10 – частица ВУТ; 11 – внешний теплообменник; 12 – насос; 13 – канал отвода конденсата из блока «охладитель-осушитель» пробы. Позиции 11, 12, представляют собой обратную систему охлаждения циркуляционной водой пробоотборника

Рисунок 4.1 – Схема экспериментального стенда по анализу компонентного состава газообразных продуктов сгорания ВУТ

На рисунке 4.1 изображена принципиальная схема экспериментального стенда для анализа состава продуктов сгорания топлива. Основное оборудование – высокотемпературная печь, схема которой уже была описана ранее. Отличие состоит в том, что этот стенд дополнен системой газового анализа образцов продуктов горения. Методика экспериментального определения компонентного состава продуктов сгорания водоугольных топлив, выполненных на основе природного угля и коксового остатка, подробно изложена в [28].

На рисунке 4.2 представлены типичные кадры процессов зажигания капель водоугольного топлива, изготовленного из природного бурого угля, и коксового остатка того же сорта. Можно заметить существенные различия в механизмах воспламенения частиц ВУТ. Экспериментальные данные свидетельствуют, что

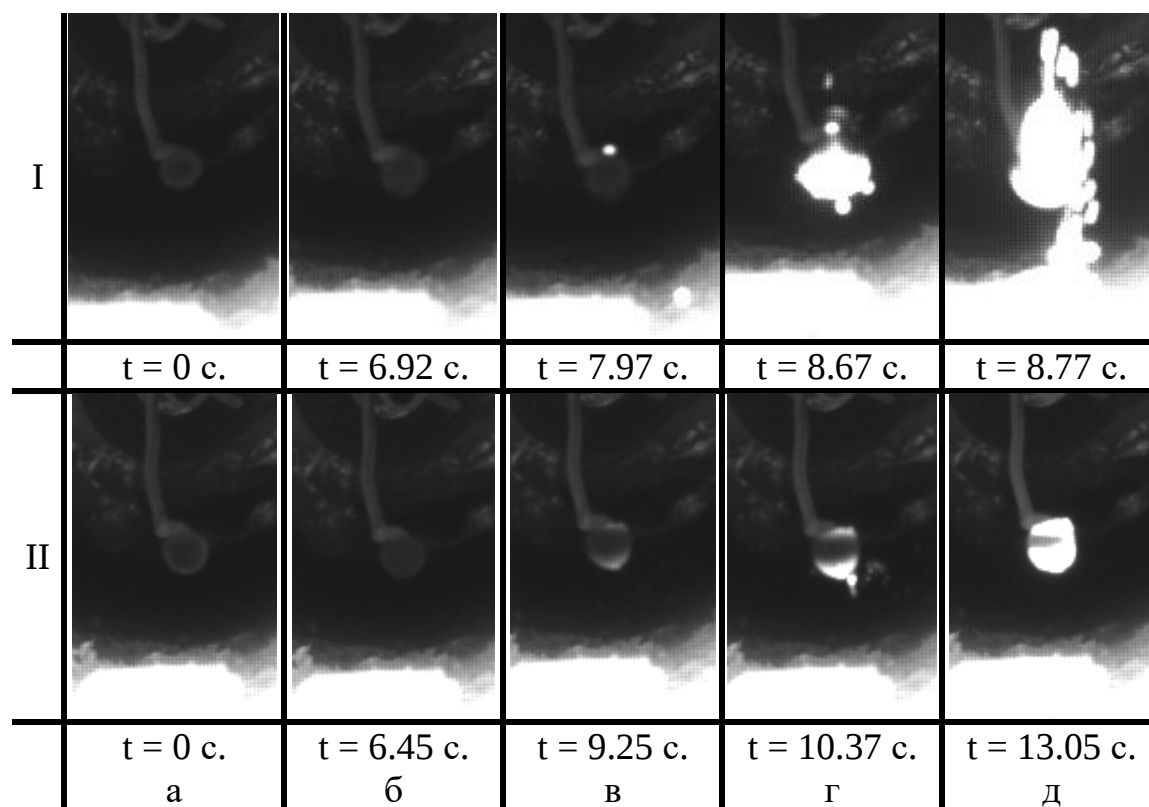
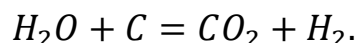
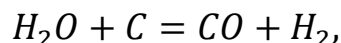


Рисунок 4.2 – Типичная видеограмма процесса нагрева и последующего воспламенения частиц водоугольных топлив на основе природного угля (I – ВУТ на основе бурого угля, II – ВУТ на основе коксового остатка, полученного из этого же угля) в высокотемпературной среде ($T_g = 1073 \text{ K}$)

зажигание капель водоугольного топлива на основе природного угля происходит в газовой фазе, что объясняется высоким содержанием летучих веществ в исходном буром угле. По результатам математического моделирования процессов зажигания водоугольных топлив на базе бурого угля [130] установлено, что в процессе термической подготовки газообразные продукты разложения фильтруются через пористый каркас и вводятся в приграничный слой топливной частицы, где образуют парогазовую смесь, которая загорается при достижении критических температур и концентраций в системе. В случае же коксового остатка угля зажигание происходит на поверхности частицы. Это обусловлено тем, что во время предварительной термической обработки угля (торрефикации) горючие газы и продукты разложения (включая синильную кислоту и сероводород, отвечающие за формирование более 80% оксидов азота и серы при сгорании) удаляются из структуры угля.

Как итог, в период нагрева частиц ВУТ на основе коксового остатка летучих в малой окрестности частицы недостаточно для формирования насыщенной смеси горючих газов и окислителя (кислорода воздуха). В этих условиях в роли летучих, скорее всего, выступают продукты термохимического взаимодействия водяных паров и углерода коксового остатка (СО и Н₂):



На рисунке 4.3 приведены установленные по результатам проведённых экспериментов зависимости, характеризующие среднее (по периоду горения) значение концентрации основных антропогенных продуктов горения одиночной частицы водоугольных топлив на основе природного угля и коксового остатка угля:

$$\bar{Y} = \frac{1}{t_{fc}} \int_0^{t_{fc}} Y_i dt, \quad (4.1)$$

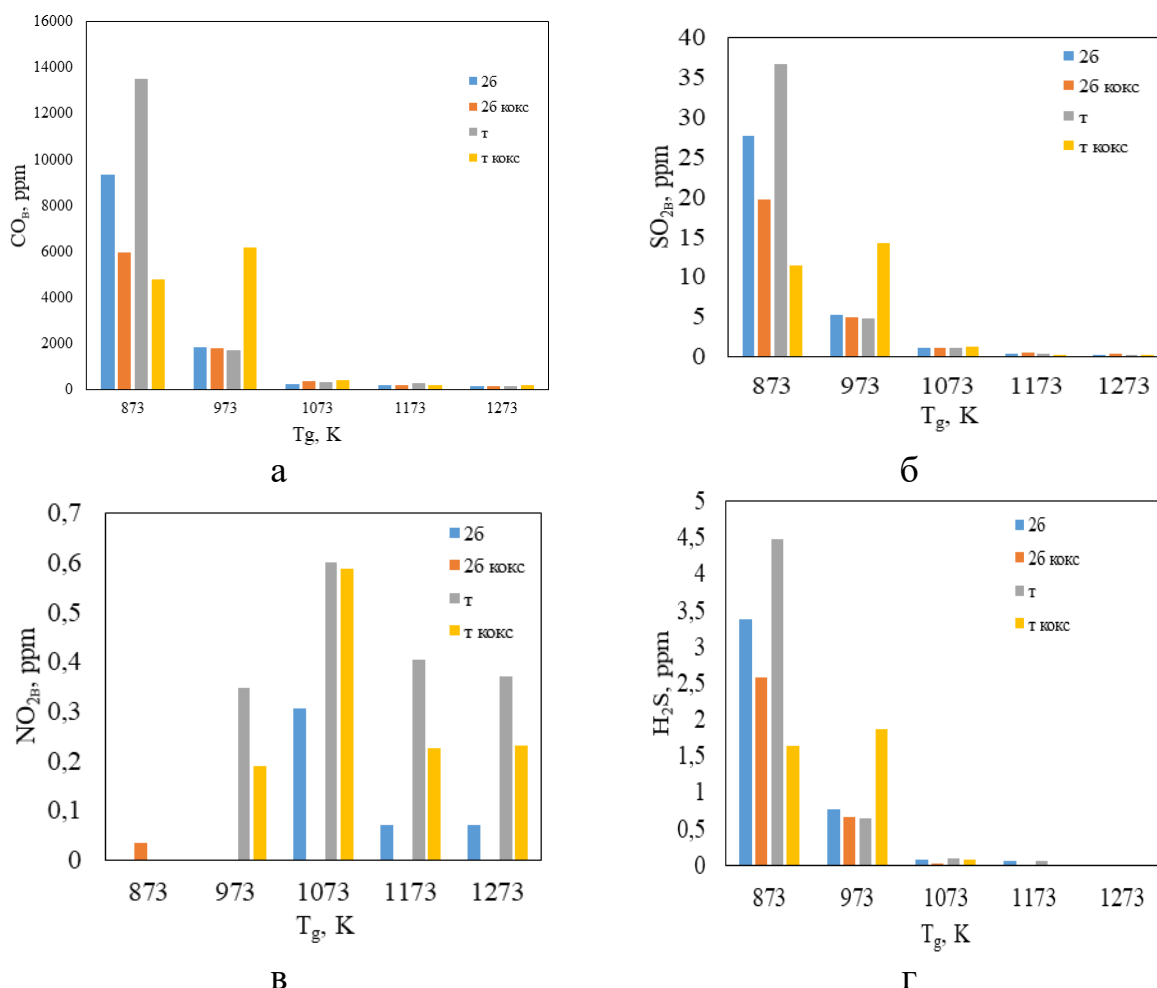
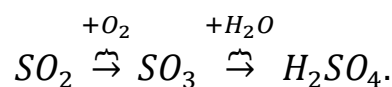
где t_{fc} – время горения топлива, с;

Y_i – концентрация i -го компонента газовой смеси.

Исследование представленных на рисунке 4.3 зависимостей выявляет влияние нескольких значимых факторов.

Первое: значение $\bar{Y}$ значительно зависит от типа исходного топлива, из которого изготовлено ВУТ. При сжигании ВУТ, произведенного из бедного угля, образуется заметно меньше оксидов серы по сравнению с буроугольным ВУТ. Этот факт, согласно анализу рисунка 4.3 г, вероятнее всего связан с тем, что в буром угле содержится больше органической (или колчеданной) серы по сравнению с тощим углём, что подтверждается меньшим выделением сероводорода при термическом разложении. Также отмечается, что с ростом температуры внешней среды концентрация сероводорода в продуктах сгорания уменьшается. Это обусловлено тем, что при высокотемпературном нагреве H₂S активно вступает в термохимические реакции с кислородом воздуха, в результате которых образуются $SO_x \rightarrow SO_2, SO_3$. На первый взгляд кажется необычным, что с повышением температуры окислителя снижается концентрация диоксида серы в продуктах

сгорания. Это объясняется тем, что при увеличении температуры SO_2 активно взаимодействует с кислородом воздуха, формируя SO_3 , который затем реагирует с водяным паром, вызывая образование паров серной кислоты:



а – окись углерода; б – диоксид серы; в – диоксид азота; г – сероводород
Рисунок 4.3 – Средние по времени концентрации антропогенных газообразных продуктов горения в малой окрестности частиц ВУТ, выполненных из природных углей и их коксового остатка

Результаты моделирования [132] процесса горения смеси угля и биомассы показывают, что секвестрация SO_x существенно снижает концентрацию оксидов серы в продуктах сгорания. Аналогичный механизм применяется и для секвестрации оксидов азота, как показано в [133]. Для стабильного и значительного снижения концентрации SO_2 , SO_3 и NO_x достаточно, чтобы влажность биомассы составляла около 5% ($\varphi \approx 0,05$). При дальнейшем увеличении влажности эффект

секвестирования становится незначительным и приближается к асимптоте. В то же время, влажность водоугольной капли достигает 40-50%.

Анализ, выполненный на основе зависимостей, изображённых на рисунке 4.3 в, позволяет сделать обоснованный вывод о перспективности внедрения технологии предварительной термической обработки угля (торрефикации) в качестве эффективного метода секвестрации оксидов азота в продуктах сгорания ВУТ. Установлено, что в результате проведения торрефикации углей наблюдается значительное снижение концентрации NO_x : примерно на 40% при сжигании водоугольных топлив, произведённых из тощих углей, и практически полностью при использовании коксового остатка бурых углей. Также заметно, что при $T_g = 1273 \text{ K}$ концентрация оксидов азота в продуктах сгорания ниже, чем при $T_g = 1073 \text{ K}$. Этот эффект объясняется активным термохимическим реагированием диоксида азота с водяными парами с образованием паров азотной кислоты.

Экспериментальные исследования показали, что воспламенение капель водоугольного топлива, основанного на коксовом остатке, обычно инициируется на поверхности. Это обусловлено тем, что коксовый остаток имеет мало летучих в своем составе, однако концентрация углерода в нём по-прежнему высокая. При таких исходных данных имеются предпосылки к разработке относительно «простых» (то есть не учитывающих процессы тепломассопереноса, протекающих в малой окрестности частицы ВУТ) математических моделей, описывающих с достаточно высоким прогностическим потенциалом процессы зажигания частиц ВУТ в условиях высокотемпературного нагрева.

Физическая модель процесса зажигания водоугольной капли (ВУТ) соответствует физической постановке задачи зажигания ВУТ, представленной в [28]. На основе физической модели [28] разработана математическая модель процессов тепломассопереноса, протекающих при воспламенении капли водоугольного топлива, выполненного на основе коксового остатка. Математическая постановка задачи базируется на следующих допущениях:

- Топливная частица имеет сферическую форму;
- Теплоперенос рассматривается в одномерной модели;

- Локализация зажигания в приповерхностных слоях частицы;
- Влияние неоднородности скорости потока окислителя на температурное поле частицы считается незначительным;

- Термическая подготовка протекает в три последовательных этапа:

1. Инертный нагрев до достижения температуры кипения воды на поверхности частицы (373 K);

2. Сушка топливной частицы: температура на границе фронта испарения не меняется $T|_{r=r_s} = T_{eva} = 373\text{ K}$;

3. Зажигание сухой высокопористой угольной частицы.

Математическая модель, отражающая описанную физическую концепцию, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений. Область решения для водоугольной частицы условно делится на две части: исходное топливо, насыщенное водой, и сухой угольный каркас (см. рисунок 4.4).



1 – исходное влагонасыщенное топливо, 2 – сухой угольный каркас

Рисунок 4.4 – Область решения задачи зажигания капли ВУТ

На первом этапе решается задача нагрева капли ВУТ до температуры, при которой происходит интенсивное испарение воды. Математическая постановка задачи нагрева выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \theta}{\partial R} \right), \quad (4.2)$$

$$0 \leq Fo \leq Fo_{ews},$$

$$0 \leq R \leq 1.$$

Начальные условия:

$$\theta(R \in 0 \dots 1) = \theta_0. \quad (4.3)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=1} = Bi(1 - \theta) + Sk(1 - \theta^4) \equiv Ki(Fo), \quad (4.4)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=0} = 0. \quad (4.5)$$

После выполнения условий нагрева поверхности частицы ВУТ до температуры 373 К (температура, при которой скорость испарения воды максимальна) наступает второй этап термической подготовки топлива к зажиганию – сушка капли ВУТ. Математическая постановка задача сушки сводится к следующей системе:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial Fo} = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \theta}{\partial R} \right), & \text{– Уравнение энергии для исходной} \\ Fo \leq Fo_{evf} \quad 0 \leq R \leq \xi_{eva}, & \text{(водонасыщенной) части ВУТ.} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\begin{cases} K_a \frac{\partial \theta}{\partial Fo} = R^{-2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \theta}{\partial R} \right), & \text{– Уравнение энергии для сухой части} \\ Fo \geq Fo_{ewf} \quad \xi_{eva} \leq R \leq 1. & \text{ВУТ.} \end{cases} \quad (4.7)$$

Начальные условия:

$$\theta(R \in 0 \dots 1) = \theta(R, Fo_{ews}) = \varphi(R). \quad (4.8)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=1} = Ki(Fo), \quad (4.9)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=0} = 0. \quad (4.10)$$

На границе раздела системы «исходное топливо – сухой уголь» принимается граничное условие 4-го рода (условие равенства тепловых потоков [50] и температур, или условие А.В. Лыкова [134]) с учётом эндотермического эффекта испарения воды:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=\xi_{eva}-0} - K_\lambda \left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=\xi_{eva}+0} = -Ste \frac{d\xi_{eva}}{dFo}. \quad (4.11)$$

После выполнения условия полного влагоудаления ($\xi_{eva} = 0$) наступает следующий этап – непосредственное зажигание угля. Согласно теории теплового взрыва [100], инициирование горения топлива происходит при достижении критических условий воспламенения. Процесс воспламенения описывается уравнением энергии (с источником теплоты), записанным в преобразованных переменных Франк-Каменецкого [89]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} + \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta \theta}\right). \quad (4.12)$$

Начальные условия:

$$\theta(R \in 0 \dots 1) = \theta(R, Fo_{ewf}) = \psi(R). \quad (4.13)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=0} = Ki(Fo), \quad (4.14)$$

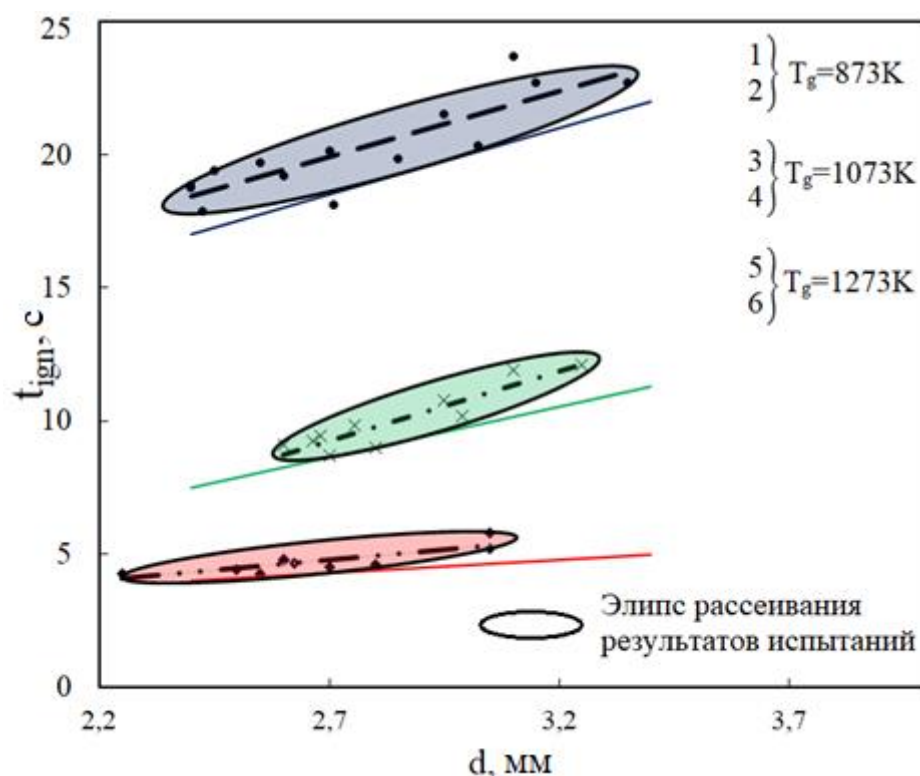
$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=\infty} = 0. \quad (4.15)$$

Задача зажигания (4.2) – (4.15) решается методом «теплового» квазистационарного приближения (ТКП) с выделением асимптотических оценок (аналогично методу, приведённому в главе 3). Вывод общего решения задачи зажигания аналогичен выводу, приведённому в главе 3. Отличие заключается в том, что в уравнениях энергии отсутствует источниковый член, описывающий тепловыделение вследствие поглощения микроволновой энергии. Подробное описание вывода аналитического решения существенно нелинейной задачи зажигания хорошо изложено в [28]. Время задержки зажигания определяется по принципу суперпозиции временных асимптотик каждого отдельного этапа термической подготовки (инертный нагрев, испарение воды, зажигание):

$$t_{ign} = \sum_{i=1}^m t_i = t_{swe} + t_{fwe} + t_{ign}^{awe}. \quad (4.16)$$

На рисунке 4.5 показаны теоретические (определённые по формуле 4.16) и экспериментальные зависимости времён задержки зажигания частиц ВУТ, изготовленных из коксового остатка бурого угля. Сравнительный анализ значений t_{ign} , полученных по результатам математического моделирования и эксперимента,

показал достаточно хорошее соотношение теории и эксперимента. Также можно отметить линейный характер зависимости времени задержки зажигания от характерных размеров частиц ВУТ в заданном диапазоне значений $d = 2.2 \dots 3.4$ мм. При этом угол наклона зависимости $t_{\text{ign}}(d)$ к оси абсцисс с увеличением температуры уменьшается.



1, 3, 5 – экспериментальные значения; 2, 4, 6 – расчётные (по формуле 4.16)
значения времён задержки зажигания

Рисунок 4.5 – Зависимости теоретических и экспериментальных значений времён задержки воспламенения частиц водоугольного топлива, выполненного на основе коксового остатка бурого угля, от характерного размера

Пожалуй, самым перспективным и выгодным (по энергетическим и экологическим критериям) технологическим решением использования органических топлив (уголь, газ, нефть) в рамках производства тепловой и электрической энергии является цикл Алама [135]. Так анализ стратегии развития энергетического сектора будущего, проведённый специалистами MIT [136], показал, что к 2100 году тепло- и электрогенерация будет базироваться (в основном)

на традиционных тепловых электростанциях, работающих по принципу полного секвестирования антропогенных продуктов горения (или по циклу Алама).

Можно отметить, что организация горения природного газа по такому принципу не представляет больших трудностей. В тоже время использование природного газа в качестве «банального» топлива для ТЭС уже в настоящее время экономически нецелесообразно. При этом применение других видов топлив (например, угля) для тепло- и электрогенерации по Аламскому циклу пока встречает значительные технологические трудности. Это связано с тем, что сжигание угля в пылевидном состоянии в камерах сгорания ГТУ (основной элемент технологической цепочки [137]) приводит к мощному эрозийному износу рабочего лопаточного аппарата турбины. На настоящее время использование угля в рамках цикла Алама предполагается в результате сжигания в камерах сгорания турбины синтез-газа [138], формирующегося при газификации угля [138]. Но производство синтез-газа – отдельный сложный технологический процесс, требующий применения металло- и энергоемкого энергетического оборудования. Соответственно, применение такой технологии существенно повышает себестоимость производства единицы энергии (\$/Дж) и, соответственно, существенно снижает все преимущества использования угля. В этих условиях более приемлемо сжигание угля в виде водоугольного топлива в камерах сгорания ГТУ, работающих по циклу Алама. При этом можно отметить, что проведенные ранее компанией General Electric [139] эксперименты по переводу промышленной турбины со сжигания природного газа на водоугольную суспензию показали перспективность этого направления развития газотурбинных технологий. Мощность ГТУ выросла на 11%, при этом температура горения в камере сгорания снизилась только на 15% [139]. Последнее обусловлено водяным паром (образующимся главным образом в результате испарения воды), который приводит к значительному повышению термодинамического потенциала рабочей среды. К недостаткам технологии [139] можно отнести необходимость масштабной реконструкции камеры сгорания с внедрением в последнюю группы

последовательно включенных высокотемпературных фильтров-сепараторов и (несмотря на все усилия) эрозийный износ проточной части ГТУ.

Стоит отметить, что применение водоугольных топлив на основе природных углей в качестве топлива в циклах Алама не имеет смысла, так как при этом, помимо образования диоксида углерода и водяных паров (как результат испарения внутрипоровой влаги), дополнительно будут образовываться группы газообразных продуктов сгорания (например, оксидов серы и азота). Конденсация последних приведет к неоправданно (с экономической точки зрения) высоким капитальным затратам. По этой причине наиболее целесообразно использования для цикла Алама водоугольной суспензии на основе коксового остатка угля.

Следует отметить, что на сегодняшний день отсутствуют систематические экспериментальные и теоретические исследования процессов зажигания и горения водоугольных частиц в условиях высоких температур и давления (то есть в условиях сжигания водоугольного топлива в камерах сгорания газотурбинных установок). Это по большей мере объясняется большим числом факторов, оказывающих влияние на параметры и условия зажигания: температура, давление, начальные размеры капель и другие.

Применение для вышеописанных целей математических моделей (например, [128]) вследствие существенной нелинейности дифференциальных уравнений и большого числа последних не представляется возможным. Наличие достаточно простого инструментария, позволяющего проводить прогностическое моделирование процессов воспламенения капель водоугольного топлива в условиях нагрева, соответствующих камерам сгорания ГТУ, создает предпосылки для моделирования процессов зажигания типичных капель ВУТ в условиях широкого варьирования параметров пространства вариантов сочетаний условий нагрева и характерных размеров частиц. Такую процедуру наиболее эффективно проводить, используя методы распараллеливания вычислений.

На рисунке 4.6 представлены зависимости времён задержки зажигания частиц водоугольного топлива в условиях широкой вариаций условий нагрева: диапазоны температур $873\text{ K} < T_g < 1773\text{ K}$ и давлений $0,1\text{ МПа} < P_g < 25\text{ МПа}$

внешней среды. По результатам расчетов на ЭВМ проанализировано 110000 вариантов сочетаний P_g и T_g . Можно отметить, что в соответствии с канонической теорией горения [55] температура оказывает существенное нелинейное влияние на характеристики и условия зажигания. Время задержки зажигания при всех исследовавшихся давлениях зависит от температуры в соответствии с экспоненциальным законом. При этом можно отметить, что давление оказывает существенно нелинейное и немонотонное влияние на значения t_{ign} . Сначала с ростом P_g (до $P_g = 15,3$ МПа) значения времён задержки зажигания монотонно возрастают, затем при $P_g > 15,3$ МПа с увеличением последнего t_{ign} уменьшаются. Это обусловлено взаимным влиянием двух конкурирующих факторов. С одной стороны, с ростом давления внешней среды растет температура начала интенсивного испарения воды (T_s), соответственно, значительно возрастает и стадия I (инертный нагрев капли ВУТ). Но, с другой стороны, увеличение P_g приводит к существенному снижению теплоты (Q_{eva}), затрачиваемой на непосредственное испарение воды (при $P_g > 24$ МПа $Q_{eva} = 0$). В результате

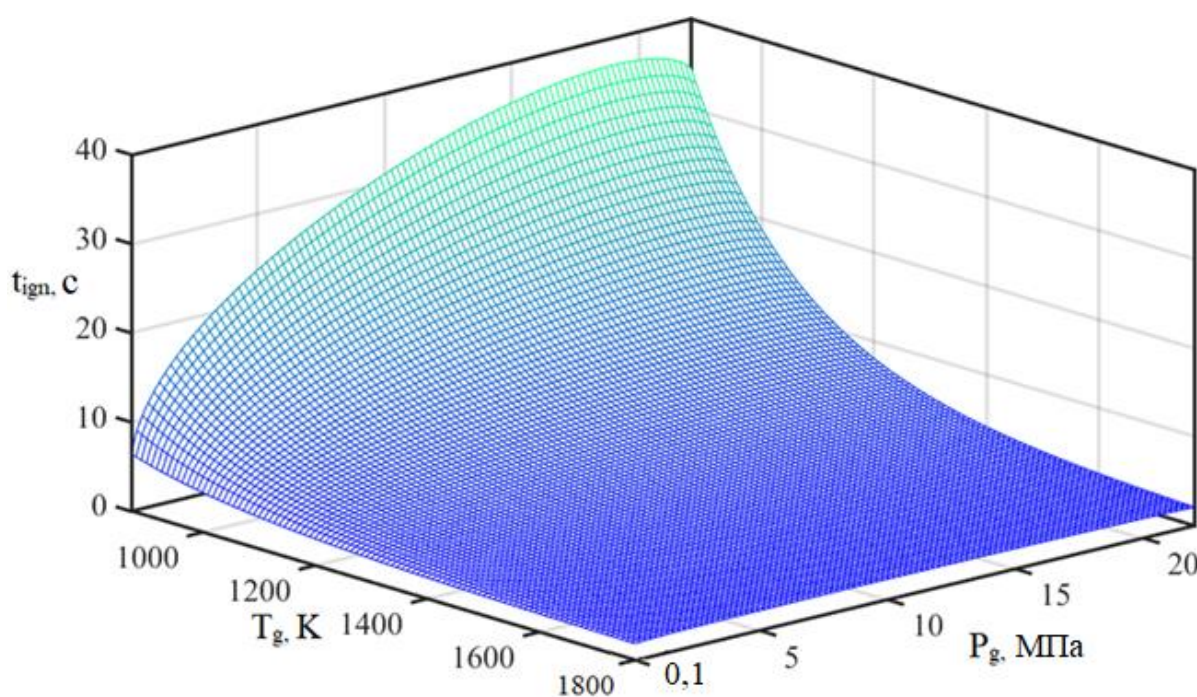


Рисунок 4.6 – Зависимость времени задержки воспламенения частицы водоугольного топлива (с характерным размером $d = 3$ мм) от температуры и давления внешней среды

существенно сокращается по времени стадия сушки частицы ВУТ (стадия II). Соответственно, можно сказать, что в этих условия наиболее целесообразно сжигание ВУТ в специальных камерах горения, способных обеспечить экстремальные условия нагрева (давления окислителя $P_g \approx 22$ МПа и температура $T_g > 1400$ К).

4.2 Математическое моделирование процессов зажигания капель водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания газотурбинных установок (высокие температуры и давления)

Также важно подчеркнуть, что благодаря своим преимуществам водоугольное топливо может использоваться в качестве топлива для парогазовых и газотурбинных энергетических установок. Известно, что КПД газотурбинных установок превышает показатели паросиловых систем по циклу Ренкина [140]. В то же время расходы на сжигание природного газа для энергетических целей считаются слишком высокими из-за его высокой стоимости и важной роли в газохимической промышленности. В перспективе водоугольное топливо рассматривается как возможное альтернативное топливо для двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Согласно исследованиям [141], водоугольное топливо может использоваться в поршневых двигателях, особенно в тихоходных моделях. Анализ режимов подготовки и эксплуатации ВУТ для ДВС представлен в работе [142], а математическая модель зажигания капель водоугольного топлива в таких двигателях подробно описана в [110]. Однако стоит отметить, что до настоящего времени не проводился комплексный анализ влияния внешнего давления на характеристики и условия зажигания этого вида топлива.

Физическая модель процесса зажигания частицы ВУТ в условиях высокого давления окислителя учитывает ранее установленные (неоднократно экспериментально обоснованные [128-131]) закономерности процессов воспламенения капель (при начале нагрева), а затем частиц (после высыхания приповерхностного слоя капли ВУТ) водоугольных топлив, и описывает механизм влияния давления внешней среды (воздуха) на условия и характеристики зажигания.

Математическая модель процесса воспламенения капли ВУТ в условиях высоких температур и давлений окислительной среды соответствует математической модели, подробно описанной в [30]. Задача зажигания решается

численно до достижения критических (по критериям [99-101]) условий. При разработке математической модели приняты следующие упрощающие процедуру решения задачи зажигания допущения:

1. Форма частицы ВУТ – сфера;
2. Задача воспламенения капли ВУТ решается в плоской (2D) постановке;
3. Теплофизические характеристики угля не зависят от давления среды, а зависят только от температуры;
4. Теплота испарения воды и ее теплофизические характеристики зависят от давления и температуры в соответствии с теорией [103];
5. Не учитываются эффекты неравновесного состояния термодинамической системы;
6. Суспензия является изотропной идеально перемешанной структурой.

Область решения задачи нагрева и зажигания капли водоугольного топлива при высоком давлении приведена на рисунке 4.7.

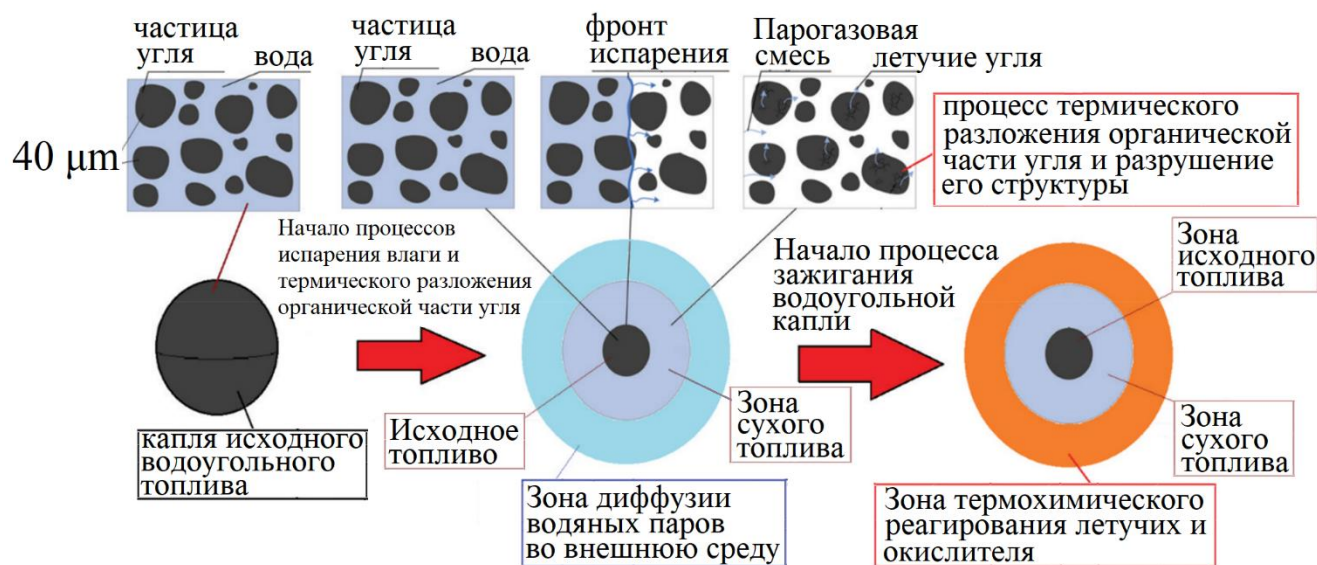


Рисунок 4.7 – Область решения задачи

Математическая постановка задачи основана на системе дифференциальных уравнений в частных производных по переменным Франк-Каменецкого [59]. Уравнение энергии учитывает распределение температуры внутри неоднородной среды, процессы испарения внутрипоровой влаги, термическое разложение

органической части топлива, взаимодействие водяных паров с углеродным остатком, а также тепло- и массоперенос при фильтрации:

$$\begin{aligned} & \bar{C} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \varepsilon \frac{\Lambda(\theta) \cdot L}{M^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2} + \bar{C} \frac{Ho_{gm}}{Dar} \left(\frac{\partial H}{\partial \xi_r} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} + \frac{1}{\xi_r^2} \frac{\partial H}{\partial \xi_\varphi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_\varphi} \right) O(\zeta_{eva}) = \\ & = \frac{K_R}{Fk} \frac{1}{\xi_r^2} \frac{\partial}{\partial \xi_r} \left(\xi_r^2 \Lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} \right) + \frac{K_R}{Fk} \frac{1}{\xi_r^2 \sin \xi_\varphi} \frac{\partial}{\partial \xi_\varphi} \left(\sin \xi_\varphi \Lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} \right) - \frac{Ku(H)}{\Omega} \frac{d\zeta_{eva}}{d\tau} \Delta(\zeta_{eva}) + \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} & + O(\zeta_{eva}) \left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m K_i^j \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta \cdot \theta}\right) \prod_{n=1}^k Y_n + \sum_{i=1}^m K_i^j (1 - \eta) \exp\left(\frac{\theta \gamma_i}{1 + \beta \cdot \theta}\right) \right), \\ & \bar{C} = C(\xi_r, \xi_\varphi, \tau) \cdot P(\xi_r, \xi_\varphi, \tau). \end{aligned} \quad (4.23)$$

Аппроксимация значений теплопроводности, теплоёмкости и плотности проводилась с помощью интерполяционного полинома Лагранжа. Значения λ , C_p , ρ воды, а также теплоты парообразования последней (Q_L) и температуры насыщения (T_s) рассчитывались численно с использованием известных термодинамических соотношений [98]:

$$\{\lambda, C_p, \rho, Q_{eva}, T_s, P_s\} = f(P_g). \quad (4.24)$$

Координата фронта испарения определяется по выражению:

$$R_{eva} = R_{out} - \frac{t}{r_{out}} \int_0^t V_f dt, \quad (4.25)$$

где $V_f = W_{eva}/\rho_{wat}$ – линейная скорость испарения влаги, м/с;

W_{eva} – массовая скорость испарения, кг/(м²·с).

Массовая скорость испарения находится из математического выражения закона Кнудсена-Ленгмюра-Герца [143]:

$$W_{eva} = \frac{A(p_s - p)}{\sqrt{2\pi M k T}}. \quad (4.26)$$

Распределение температуры в пограничном слое частицы моделируется уравнением энергии с учетом экзотермических реакций окисления летучих компонентов кислородом воздуха.

$$\begin{aligned} & \bar{C} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \bar{C} Ho_g \left(U_g \frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} + \frac{V_g}{\xi_r} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_\varphi} \right) = K_a \frac{K_R}{Fk} \left[\frac{1}{\xi_r^2} \frac{\partial}{\partial \xi_r} \left(\xi_r^2 \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} \right) + \frac{1}{\xi_r^2 \sin \xi_\varphi} \frac{\partial}{\partial \xi_\varphi} \left(\sin \xi_\varphi \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} \right) \right] + \\ & + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m K_i^j \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta \cdot \theta}\right) \prod_{n=1}^k Y_n, \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\bar{C} = C(\xi_r, \xi_\varphi, \tau) \cdot P(\xi_r, \xi_\varphi, \tau). \quad (4.28)$$

где U_g, V_g – безразмерные скорости движения парогазовой смеси в радиальном и азимутальном направлениях.

Распределение давления (H) в частице топлива определяется при решении уравнения пьезопроводности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(PH)}{\partial\tau} = & \frac{K_\chi^H}{Le^H} \left[\frac{1}{\xi_r^2} \frac{\partial}{\partial\xi_r} \left(\xi_r^2 X \frac{\partial H}{\partial\xi_r} \right) + \frac{1}{\xi_r^2 \sin\xi_\varphi} \frac{\partial}{\partial\xi_\varphi} \left(\sin\xi_\varphi X \frac{\partial H}{\partial\xi_\varphi} \right) \right] + \frac{Dar}{\Omega^H} \frac{d\zeta_{eva}}{d\tau} \Delta(\zeta_{eva}) + \\ & + O(\zeta_{eva}) \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m Dar \cdot B_{thr}^H \exp\left(\frac{\theta\gamma_i}{1+\beta\theta}\right) \prod_{n=1}^k Y_n + \sum_{i=1}^m Dar \cdot B_{td}^H (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta\gamma_i}{1+\beta\theta}\right). \end{aligned} \quad (4.29)$$

Связь между значениями проницаемости и пористости принимается согласно известному выражению:

$$K_p = \varsigma \frac{Ps^2}{8}. \quad (4.30)$$

Скорости движения газообразных продуктов пиролиза и продуктов термохимического взаимодействия последних с твёрдым углеродным каркасом рассчитывались в соответствии с формулой Дарси:

$$\vec{U} = -\frac{1}{Dar} \frac{dH}{dR}. \quad (4.31)$$

Скорость и давление газа в пристеночном слое капли топлива рассчитывались исходя из аналитического решения задачи Стокса об обтекании шара:

$$H_g = 1 + \frac{3}{2} \gamma \xi_{out} U_g \frac{\cos\Phi}{R^2}, \quad - \text{давление газа}, \quad (4.32)$$

$$U_g = -2U_g^{fl} \cos\Phi \left(\frac{1}{2} - \frac{3\xi_{out}}{4\xi} + \frac{\xi_{put}^3}{4\xi^3} \right), \quad - \text{скорость в радиальном направлении}, \quad (4.33)$$

$$V_g = U_g^{fl} \cdot \sin\Phi \left(1 - \frac{3\xi_{out}}{4\xi} - \frac{\xi_{put}^3}{4\xi^3} \right). \quad - \text{скорость в азимутальном направлении}. \quad (4.34)$$

Процесс термического разложения органической части топлива описывается основным уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial\eta_i}{\partial\tau} = \gamma_i [1 - \eta_i] \left(\frac{\theta \cdot \gamma_i}{1 + \beta \cdot \theta} \right). \quad (4.35)$$

Концентрации основных компонентов смеси газов в пристеночном слое частицы определялись при решении соответствующих уравнений диффузии для компонентов реакции:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(P_g Y_i)}{\partial \tau} + Ho \left[U_g \frac{\partial(P_g Y_i)}{\partial \xi_r} + \frac{V_g}{\xi_r} \frac{\partial(P_g Y_i)}{\partial \xi_\varphi} \right] = \\
& = \frac{K_D}{Le} \left[\frac{1}{\xi_r^2} \frac{\partial}{\partial \xi_r} \left(\xi_r^2 D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} \right) + \frac{1}{\xi_r^2 \sin \xi_\varphi} \frac{\partial}{\partial \xi_\varphi} \left(\sin \xi_\varphi D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_\varphi} \right) \right] + \\
& + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \gamma_i^j \exp \left(\frac{\theta \gamma_j}{1 + \beta \theta} \right) \prod_{n=1}^k Y_n.
\end{aligned} \tag{4.36}$$

Концентрации компонентов парогазовой смеси в пористой структуре топлива также рассчитывались из уравнения диффузии:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(P_g Y_i)}{\partial \tau} - \frac{Ho}{Dar} \left[\frac{\partial H}{\partial \xi_r} \frac{\partial(P_g Y_i)}{\partial \xi_r} + \frac{1}{\xi_r^2} \frac{\partial H}{\partial \xi_\varphi} \frac{\partial(P_g Y_i)}{\partial \xi_\varphi} \right] = \\
& = \frac{K_D}{Le} \left[\frac{1}{\xi_r^2} \frac{\partial}{\partial \xi_r} \left(\xi_r^2 D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} \right) + \frac{1}{\xi_r^2 \sin \xi_\varphi} \frac{\partial}{\partial \xi_\varphi} \left(\sin \xi_\varphi D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_\varphi} \right) \right] + \\
& + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \gamma_i^{get} Y_n \exp \left(\frac{\theta \gamma_j}{1 + \beta \cdot \theta} \right) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \gamma_i^{gf} \exp \left(\frac{\theta \gamma_j}{1 + \beta \theta} \right) \prod_{n=1}^k Y_n + \\
& + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \gamma_i^{td} (1 - \eta) \exp \left(\frac{\theta \gamma_j}{1 + \beta \theta} \right) \prod_{n=1}^k Y_n.
\end{aligned} \tag{4.37}$$

Задача решалась со следующими начальными и граничными условиями:

$$t = 0 \rightarrow \begin{cases} \theta(\xi_r, \xi_\varphi, 0) = \theta_0; & H(\xi_r, \xi_\varphi, 0) = 1 \\ \Pi(\xi_r, \xi_\varphi, 0) = \Pi_0; & \eta(\xi_r, \xi_\varphi, 0) = 0; \end{cases} 0 < \xi_r < \xi_{out}, 0 < \xi_\varphi < \xi_\pi, \tag{4.38}$$

$$\begin{cases} \theta_g(\xi_r, \xi_\varphi, 0) = \theta_g \\ Y_i(\xi_r, \xi_\varphi, 0) = Y_{0i} \end{cases} \xi_{out} < \xi_r < \xi_g, 0 < \xi_\varphi < \xi_\pi.$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} \right|_{\xi_r=0, 0 < \xi_\varphi < \pi} = \left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi_r^2} \right|_{\xi_r=\xi_g, 0 < \xi_\varphi < \pi} = \left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi_\varphi} \right|_{\xi_\varphi=0, 0 < \xi_r < \xi_g} = \left. \frac{\partial H}{\partial \xi_r} \right|_{\xi_r=0, 0 < \xi_\varphi < \pi} = \left. \frac{\partial H}{\partial \xi_\varphi} \right|_{\xi_\varphi=0, 0 < \xi_r < \xi_{out}} = 0, \tag{4.39}$$

$$H|_{\xi_\varphi=\xi_{out}, 0 < \xi_r < \pi} = 1. \tag{4.40}$$

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

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} = K_\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \xi_r} + Sk(\theta) [\theta_g^4 - \theta^4], \tag{4.41}$$

$$\theta|_{R=R_{out}+0} = \theta|_{R=R_{out}-0}, \tag{4.42}$$

$$P_g \cdot \left. \frac{\partial Y_i}{\partial \xi_r} \right|_{\xi_{out}=\xi_{out}, 0 < \xi_\varphi < \pi} = P_{gm} \cdot K_D \cdot \left. \frac{\partial Y_i}{\partial \xi_r} \right|_{\xi_{out}=\xi_{out}}, \tag{4.43}$$

$$\left. \frac{\partial^2 Y_i}{\partial \xi_r^2} \right|_{\substack{\xi_g = \xi_g \\ 0 < \xi_\varphi < \pi}} = \left. \frac{\partial Y_i}{\partial \xi_\varphi} \right|_{\xi_g = \xi_g}. \quad (4.44)$$

Проведение систематических экспериментальных исследований процессов зажигания капель в условиях высоких температур (до 1500 К) и давлений (до 20 МПа) окислителя на современном уровне метрологического обеспечения измерений очень сложно (практически невозможно). Это обусловлено тем, что необходимо помещать частицы водоугольного топлива в «экстремальные» условия (высокие температуры и давления), и при этом необходимо регистрировать с высоким уровнем детализации характеристики процессов тепло- и массопереноса, протекающих в период индукции. На настоящее время экспериментальных стендов, обеспечивающих вышеописанные условия, нет. По этой причине проведены эксперименты по зажиганию капель водоугольного топлива при высокотемпературном нагреве при давлении окислителя $P_g = 0,1$ МПа. Экспериментальная установка по своим методикам проведения эксперимента и регистрации измеряемых величин, а также обработке результатов, соответствует стенду, приведённому в [29, 30].

На рисунке 4.8 представлены экспериментальные [98] и теоретические результаты времени задержки зажигания (t_{ign}) капель водоугольного топлива на основе каменного угля марки Д (длиннопламенный) при потоке высокотемпературного окислителя, зависящие от начального размера частиц. Анализ показал хорошее совпадение теоретических расчетов с экспериментальными – разница не превышает 8,5%, что свидетельствует о высокой точности разработанной модели.

Также отмечается линейная зависимость $t_{ign}(d)$. Анализ показывает, что размер частицы существенно влияет на условия воспламенения водоугольного топлива. Экспериментальные данные подтверждают, что времена задержки воспламенения хорошо описываются простой полиномиальной зависимостью:

$$t_{ign} = 0,13 + 1,52 \cdot d. \quad (4.45)$$

Данная зависимость $t_{ign} = f(d)$ характерна для диффузионного режима горения. На рисунке 4.9 а представлены результаты математического

моделирования зажигания частицы водоугольного топлива в потоке высокотемпературного окислителя. С целью обоснования результатов математического моделирования приведён кадр типичной видеогаммы (рисунок 4.9 б) процесса зажигания (время задержки зажигания составляет $t \approx 9,013$ с).

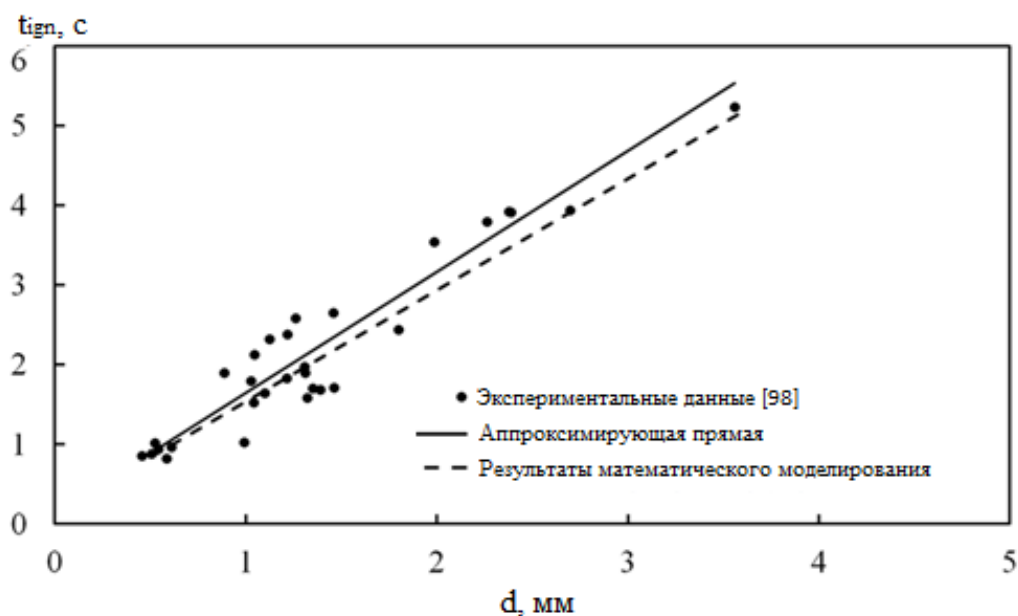


Рисунок 4.8 – Времена задержки зажигания каплей водоугольного топлива на основе каменного угля (марки Д) в потоке высокотемпературного окислителя (воздуха $T_g = 873$ К) в зависимости от начального диаметра частицы

Анализ полученных в результате математического моделирования температурных полей показывает, что воспламенение капли ВУТ протекает в её аэродинамическом следе. Последнее обусловлено уносом газообразных продуктов термического разложения в заднюю полусферу системы «частица ВУТ – высокотемпературный окислитель». Сравнительный анализ результатов численного моделирования (температурных полей в момент воспламенения) и кадров типичной видеогаммы процесса зажигания показывает достаточно хорошее соответствие результатов математического моделирования и экспериментальных исследований.

Исследования по изучению интегральных характеристик зажигания водоугольных топлив проводились для суспензий с массовой концентрацией

компонентов 50% вода, 50% уголь марки Д. Последний нашёл широкое применение на объектах теплоэнергетики в связи с относительной дешевизной и достаточно хорошими эксплуатационными характеристиками (теплота сгорания, выход летучих, зольность и др.). Обоснование выбора соотношения основных компонентов обусловлено рядом объективных причин.

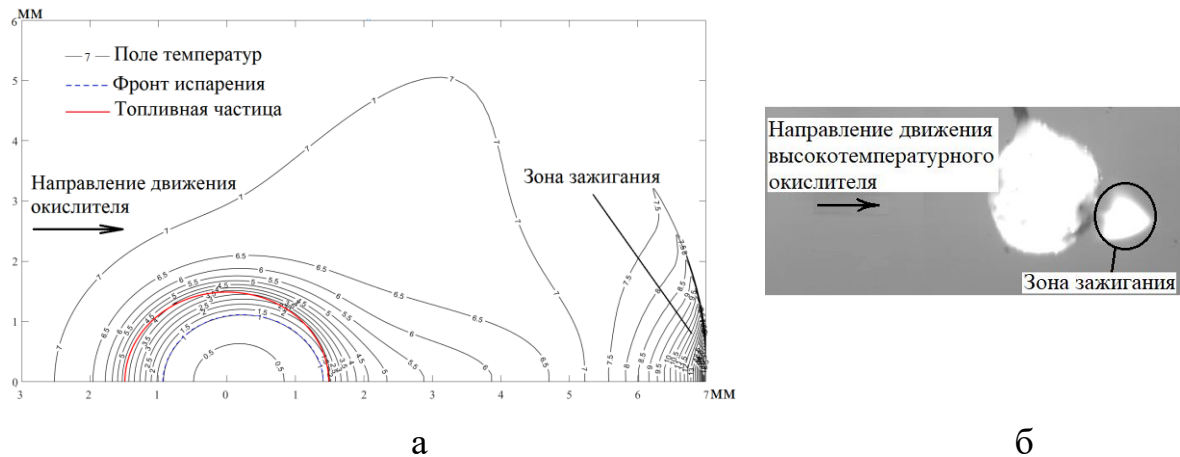


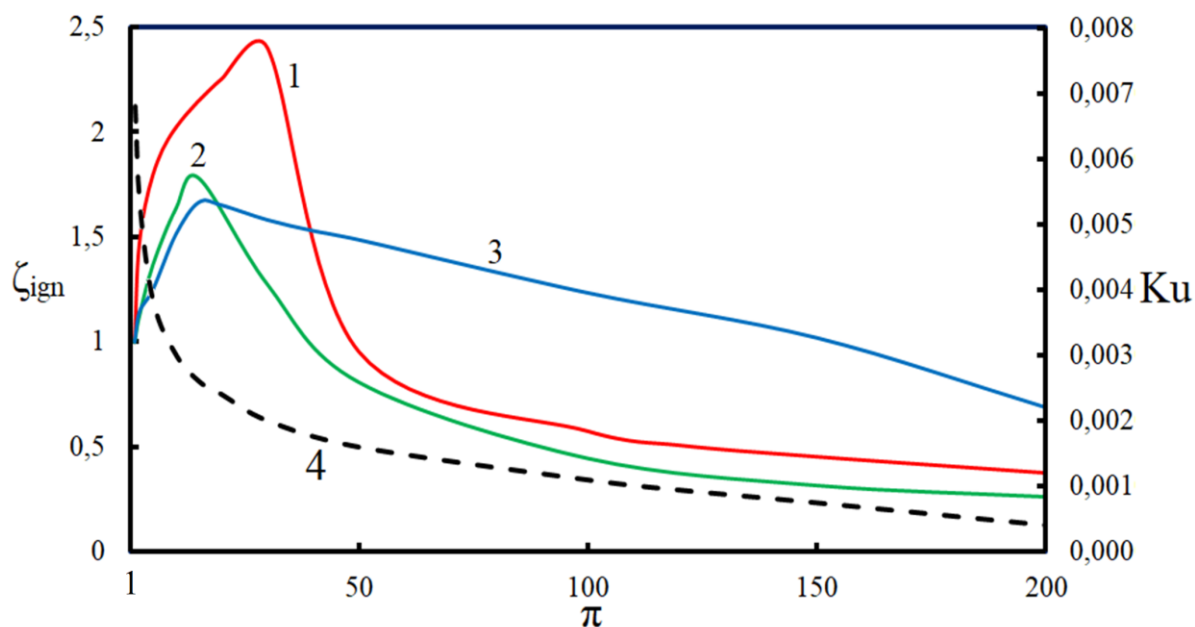
Рисунок 4.9 – Температурные поля (а) и кадр типичной видеограммы (б, эксперимент [30]) в момент воспламенения частицы водоугольного топлива в потоке высокотемпературного окислителя

Во-первых, в водоугольных топливах содержание воды варьируется в пределах от 40% до 60%. Такая большая доля воды обусловлена тем, что при высокой концентрации угля (например, 60-65%) топливо практически невозможно распылить через форсунки, также возникают трудности с транспортировкой по трубопроводам. Это существенно ограничивает возможности варьирования концентраций горючей компоненты в топливе.

С другой стороны, увеличение доли воды в составе топлива свыше 60% приводит к существенному снижению КПД котла, сжигающего такое топливо. Поэтому при моделировании процесса зажигания рассматривалась «классическая» [30] суспензия с концентрацией уголь / вода 50% / 50%.

На рисунке 4.10 представлены зависимости безразмерных значений времён задержки зажигания ($\zeta = t_{ign}/t_{ign}^0$; где t_{ign} – время задержки воспламенения с; t_{ign}^0 – время задержки зажигания при давлении окислителя 101325 Па) и

безразмерного критерия Кутателадзе (Ku характеризует отношение теплоты испарения к теплоте, затрачиваемой на нагрев воды до температуры насыщения) от степени повышения давления ($\pi = p/p_0$; где p – давление окислителя, p_0 – нормальное атмосферное давление $\approx 0,1$ МПа) при различных температурах окислителя, полученные в результате математического моделирования процессов зажигания водоугольных топлив. Анализ приведённых на рисунке 4.10 зависимостей $t_{ign}(\pi)$ показывает, что они существенно нелинейные и ζ_{ign} изменяются немонотонно. При этом изменение значений P_g окислителя в топочном пространстве оказывает существенное влияние на значения ζ_{ign} . Можно отметить, что во всём исследованном диапазоне температур внешней среды увеличение давления окислителя (до $\pi = 30$) сначала приводит к повышению времени задержки зажигания. Дальнейшее (при $\pi > 30$) увеличение P_g приводит к значительному уменьшению времени задержки зажигания. Такой нетривиальный результат обусловлен совместным влиянием на динамику зажигания комплекса взаимосвязанных процессов.



1 – $T_g = 1273$ K, 2 – $T_g = 1073$ K, 3 – $T_g = 873$ K, 4 – критерий Кутателадзе

Рисунок 4.10 – зависимости времён задержки зажигания капель водоугольного топлива от давления окислительной среды при различных температурах внешней среды

Во-первых, увеличение давления внешней среды приводит к росту значения температуры насыщения (температура интенсивного (можно сказать с максимальной скоростью) испарения) воды. Последнее приводит к существенному увеличению периода инертного нагрева капли ВУТ.

Во-вторых, возрастание давления внешней среды приводит к уменьшению теплоты испарения воды [98]. Последнее, очевидно, существенно уменьшает затраты энергии на «сушку» топливной частицы. На рисунке 4.10 приведены зависимости критерия Кутателадзе от значений π . Асимптотический анализ значений Ku показывает, что при малых π эффект повышения T_s оказывает более значимое влияние, чем снижение значений Q_{eva} . Увеличение P_g приводит к существенному уменьшению Q_{eva} , и, соответственно, к уменьшению Ku .

В-третьих, увеличение давления внешней среды приводит к росту плотности газовой смеси. Последнее, соответственно, приводит к интенсификации термохимического реагирования газообразных продуктов пиролиза с окислителем. Это обусловлено тем, что, как известно [45], скорость химического реагирования линейно зависит от концентрации компонентов высокореакционной газовой смеси:

$$W_i = \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) \prod_{j=1}^m \rho_i Y_j = \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) \prod_{j=1}^m m_j. \quad (4.46)$$

Таблица 4.2 – Теплофизические свойства воды при давлении насыщения [144]

Р, бар	λ , Вт/(м·К)	C_p , кДж/(кг·К)	r , кДж/(кг·К)	T_s , К
1	0.677	4.217	2257	373.1
5	0.683	4.316	2106	425.5
15	0.664	4.489	1944	472.1
50	0.599	5.043	1635	537.9
100	0.523	6.167	1309	585.1
150	0.454	8.692	987.2	616.4
200	0,171	56,2	438.4	360

На рисунках 4.11 а-е показаны зависимости безразмерных температур поверхности (осреднённой по поверхности сферы) и центра частицы $\mathcal{R}$ (где $\mathcal{R}=T/T_g$; T – температура, К; T_g – температура окислителя, К) от безразмерного

времени ζ (где $\zeta = t/t_{\text{ign}}$; t_{ign} – время задержки воспламенения, с) в период индукции при различных давлениях внешней среды. Температуры определялись по формуле:

$$\mathcal{R} = \begin{cases} \mathcal{R}_{\text{sur}} = \frac{1}{T_g S_{\text{sur}}} \int_0^{S_{\text{sur}}} T dS - \text{температура поверхности,} \\ \mathcal{R}_{\text{cent}} = \frac{T(r=0, t)}{T_g} - \text{температура центра частицы.} \end{cases} \quad (4.47)$$

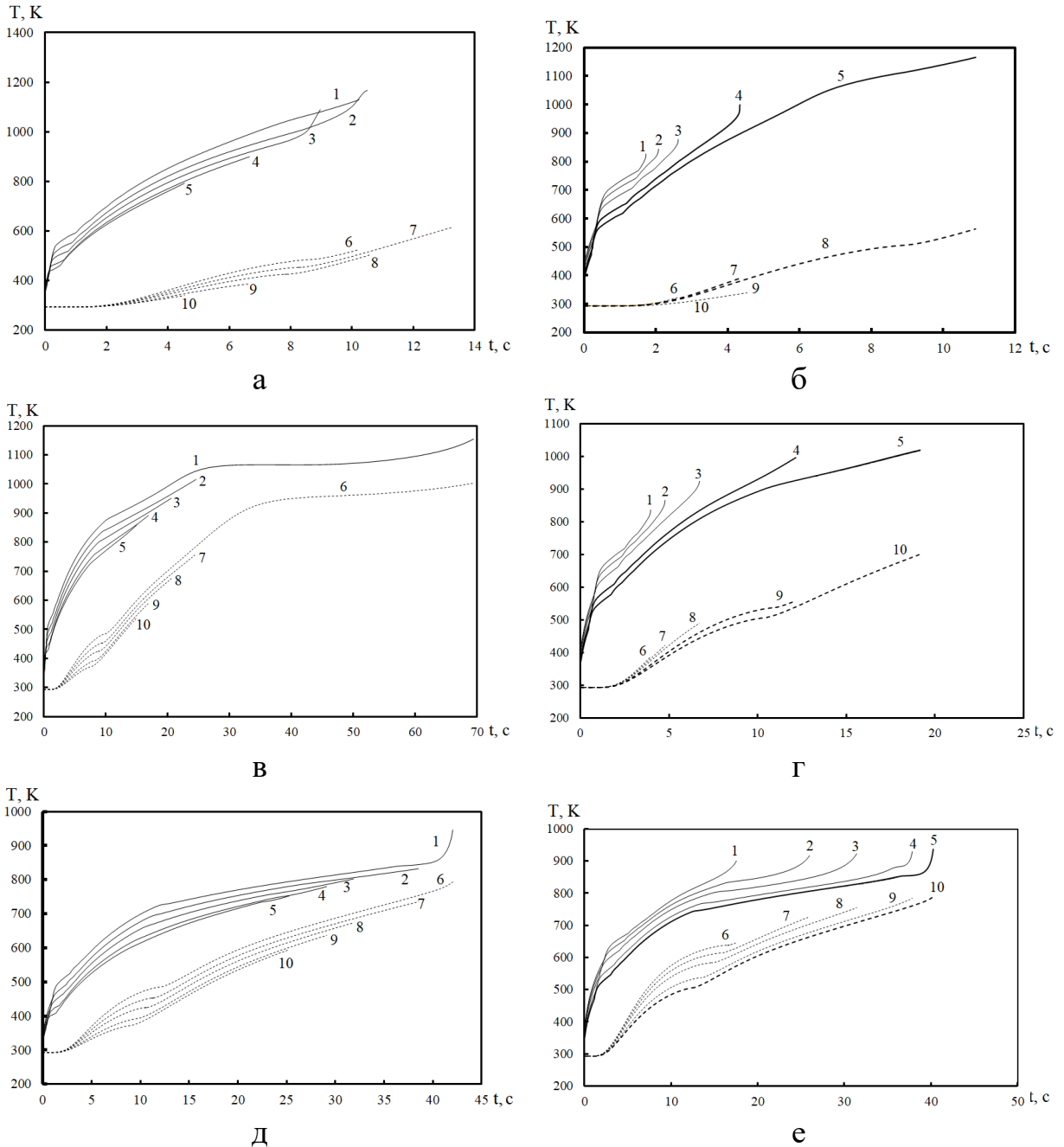
На рисунке 4.11 видно, что давление окружающей среды существенно влияет на динамику процессов термической подготовки, протекающих в условиях фазовых изменений (испарение воды) и термохимических реакций (реагирование продуктов пиролиза с окислителем).

Увеличение значений коэффициента повышения давления с $\pi = 1$ до $\pi = 30$ приводит к повышению скорости нагрева. Это обусловлено, скорее всего, тем, что рост давления внешней среды приводит к росту температуры насыщения воды. Соответственно, весь комплекс процессов термической подготовки (испарение внутрипоровой влаги, термическое разложение органической массы угля, воспламенение) протекает при более высоких температурах. Дальнейшее увеличение давления (при $P_g > 3$ МПа) приводит к уменьшению скорости нагрева Ω . Это обусловлено тем, что, как уже говорилось выше, дальнейший рост значений π приводит к тому, что теплота испарения воды существенно снижается и процесс термической подготовки протекает значительно интенсивнее.

Высокое давление газов в пристенной области частицы также тормозит процесс фильтрации смеси газообразных продуктов пиролиза угля (летучих) и водяных паров к поверхности топлива. В результате эти горючие газы нагреваются при движении через пористую структуру до существенно более высоких температур, которые незначительно отличаются от температур поверхности частицы.

Интересным результатом является и то, что (как видно из анализа зависимостей, приведённых на рисунках 4.11 а-е) при давлениях $0,1 \leq P_g \leq 3$ МПа зажигание, как правило, протекает в газовой фазе. В условиях высоких давлений внешней среды ($5 \leq P_g \leq 20$ МПа) воспламенение происходит на поверхности

частицы. Скорее всего последнее обусловлено тем, что в условиях высоких давлений плотность смеси горючее/окислитель и температура газообразных продуктов пиролиза настолько высокие, что интенсивное термохимическое



Рисунки а, в и д: 1,6 – $\pi=20$; 2, 7 – $\pi=10$; 3, 8 – $\pi=5$; 4, 9 – $\pi=2$; 5,10 – $\pi=1$. рисунки б, г и е: 1,6 – $\pi=200$; 2, 7 – $\pi=150$; 3, 8 – $\pi=100$; 4, 9 – $\pi=50$; 5, 10 – $\pi=1$. Температура внешней среды на рисунках: а, б – $T_g=1273K$; в, г – $T_g=1073K$; д, е – $T_g=873K$

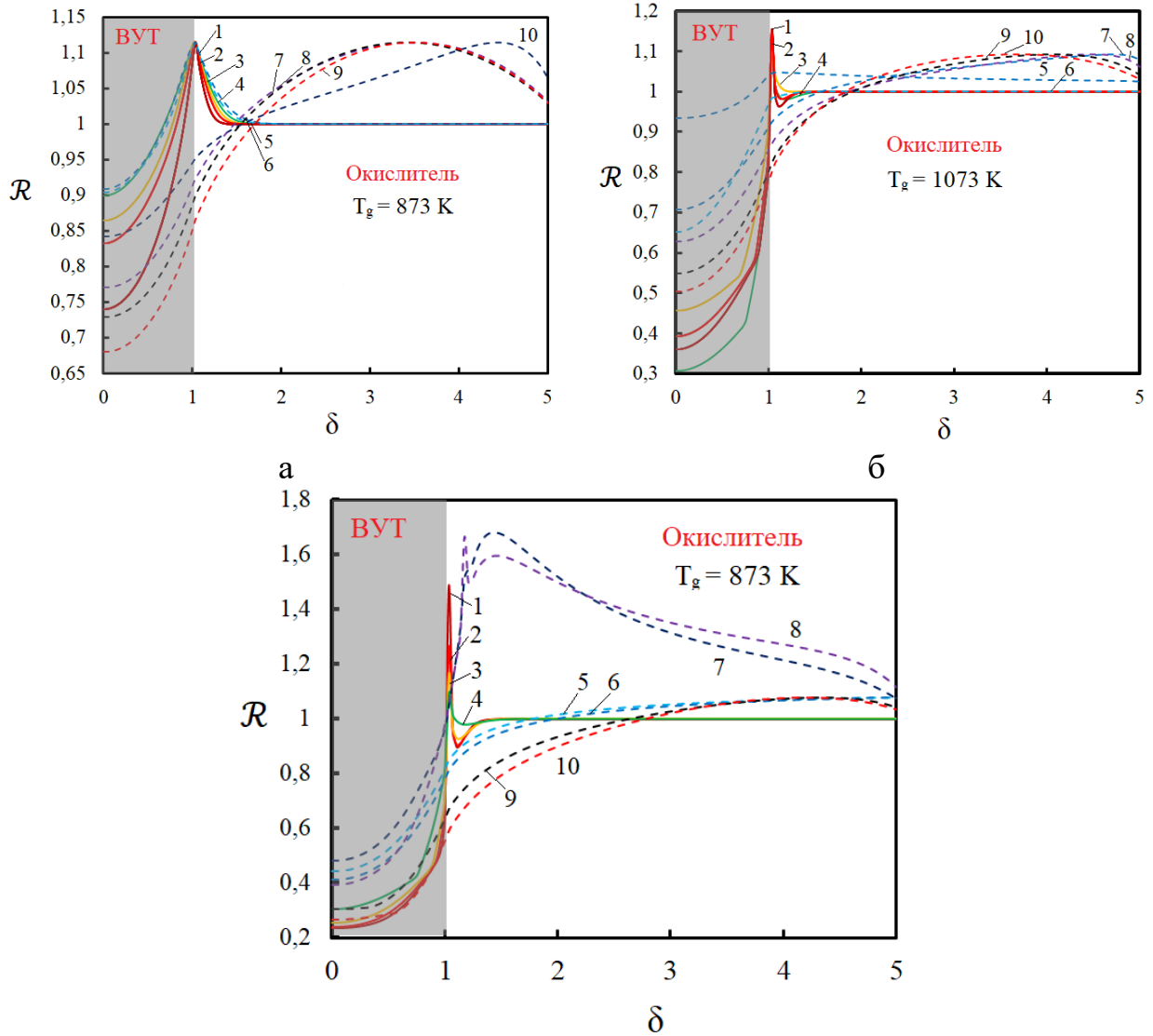
Рисунок 4.11 – Зависимости температур поверхности частицы (зависимости 1-5) и ее центра (кривые 6-10) от времени при различных давлениях внешней среды

реагирование кислорода воздуха и газообразного горючего (другими словами, газофазное зажигание) происходит сразу после выхода последних на поверхность (в зону открытых для внешней газовой среды срезу пор) топлива.

На рисунках 4.12 а-в приведены типичные распределения безразмерных температур $\mathcal{R}$ ($\mathcal{R}=T/T_g$) в системе «частица топлива – окислитель» в момент воспламенения капли ВУТ при различных давлениях и температурах внешней среды (на рисунках параметр $\delta=r/r_{out}$ – безразмерная координата). Можно отметить существенные отличия характеристик процессов зажигания, протекающих при давлениях $P_g \leq 3$ МПа и $P_g \geq 5$ МПа: в условиях относительно низких давлений ($P_g \leq 3$ МПа) зажигание протекает, как правило, в газовой фазе на некотором расстоянии от частицы, в то же время при $P_g > 5$ МПа воспламенение топлива происходит, как правило, на поверхности.

Результаты проведённых исследований дают основания говорить о том, что времена задержки воспламенения капель (на начальной стадии), а затем частиц (после высыхания приповерхностного слоя) ВУТ с ростом давления внешней среды до 20 МПа могут уменьшаться в 2.5-3 раза по сравнению с режимами зажигания в условиях умеренных давлений в топках паровых и водогрейных котлов. Это позволяет сделать вывод о необходимости дальнейшего анализа технологических режимов сжигания водоугольных топлив в камерах сгорания газотурбинных и паротурбинных установок. На рисунке 4.13 представлены зависимости времени задержки воспламенения водоугольных капель от их размера при различных давлениях окружающей среды.

Видно (рисунок 4.13), что увеличение размера капель топлива ведёт к росту времени задержки зажигания капель. Стоит отметить, что представленные зависимости отличаются от описанных ранее [29, 30, 128-131], которые, как правило, имеют экспоненциальный вид.



в

а – $T_g = 873$ K, б – $T_g = 1073$ K, в – $T_g = 1273$ K.

1 – $P_g = 20$ МПа; 2 – $P_g = 15$ МПа; 3 – $P_g = 10$ МПа; 4 – $P_g = 5$ МПа;

5 – $P_g = 3$ МПа; 6 – $P_g = 2$ МПа; 7 – $P_g = 1$ МПа; 8 – $P_g = 0,5$ МПа;

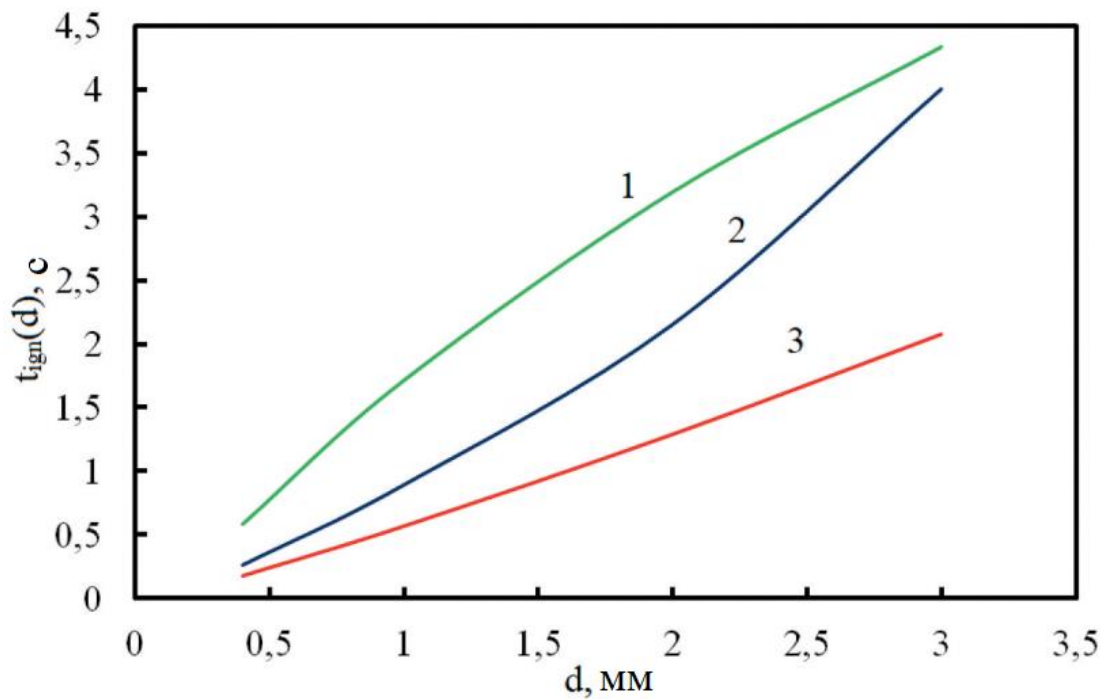
9 – $P_g = 0,2$ МПа; 10 – $P_g = 0,1$ МПа;

Обозначения:

$\mathcal{R} = T/T_g$ – безразмерная температура; где T_g – температура внешней среды,

$\delta = r/r_{out}$ – безразмерная координата; где r_{out} – радиус частицы топлива.

Рисунок 4.12 – Типичные распределения температур в малой окрестности частицы водоугольного топлива в момент воспламенения при различных температурах и давлениях внешней среды



Давление окислителя: 1 – $P_g = 0,1$ МПа, 2 – $P_g = 5$ МПа, 3 – $P_g = 15$ МПа

Рисунок 4.13 – Зависимость времени задержки воспламенения капель водоугольного топлива от их размера

Выводы по главе 4

1. Проведённые эксперименты показали, что экологические характеристики процессов горения капель водоугольного топлива, выполненных на основе природного угля и коксового остатка угля, существенно отличаются. Установлено, что при горении водоугольных топлив, изготовленных из коксового остатка, в продуктах сгорания топлива образуется значительно меньше антропогенных продуктов сгорания, чем при горении ВУТ, изготовленного из природного угля;

2. Показано, что механизмы зажигания капель водоугольных топлив, выполненных на основе природного угля и коксового остатка угля, существенно отличаются. Зажигание ВУТ на основе природного угля протекает в диффузионном режиме (в газовой фазе), воспламенение же ВУТ на основе коксового остатка угля происходит на поверхности частицы;

3. Сравнительный анализ времени задержки зажигания показал, что водоугольные топлива на основе коксового остатка угля начинают гореть с некоторой задержкой по сравнению с аналогичными частицами из природного угля, отличающимися по размеру и виду топлива. При этом при высокотемпературном нагреве (при $T_g \geq 1273$ К) разница между теоретическими и экспериментальными значениями t_{ign} не превышает 2%;

4. Разработана математическая модель, которая с высокой точностью позволяет предсказывать процессы воспламенения капель водоугольного топлива, изготовленного на основе коксового остатка, в условиях камер сгорания энергетического оборудования;

5. С использованием метода квазистационарного «теплого» приближения с выделением асимптотических оценок в сочетании с преобразованиями Лапласа получено аналитическое решение существенно-нелинейной задачи зажигания;

6. Создана новая, существенно отличающаяся от известных моделей, математическая модель, подробно описывающая комплекс термохимических и теплофизических процессов, протекающих при воспламенении частицы водоугольного топлива в условиях высоких давлений окружающей среды;

7. Теоретические исследования подтвердили, что давление окислителя оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения частицы ВУТ. Обнаружено, что зависимость времени задержки зажигания от давления окислителя является немонотонной: при диапазоне P_g от 0,1 МПа до 3 МПа (в зависимости от температуры) увеличение давления приводит к монотонному росту времени задержки зажигания, тогда как при давлениях $P_g \geq 5$ МПа оно начинает снижаться;

8. Теоретические исследования показали значительное влияние давления окружающей среды на процесс зажигания: при P_g менее 3 МПа зажигание происходит преимущественно в газовой фазе. При этом в условиях высоких давлений ($P_g = 5-20$ МПа) воспламенение протекает в основном на поверхности частицы ВУТ.

Результаты исследований, приведённые в главе 4, опубликованы в [28, 30].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Наиболее значимые результаты исследований, представленные в диссертации, перечислены ниже:

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

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

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

4. Создана математическая модель, которая описывает совокупность основных теплофизических процессов, происходящих при нагреве и зажигании влажных древесных частиц биомассы в условиях сложного радиационно-конвективного и микроволнового нагрева. Кроме того, разработано приближенно-аналитическое решение этой сложной задачи. Сравнение времён задержки зажигания, полученных теоретически и экспериментально, продемонстрировало их хорошее совпадение;

5. Показано, что применение микроволнового излучения при низкотемпературном ($T_g = 650-850$ K) нагреве в окислительной среде влажной древесной биомассы приводит к значительному сокращению времени задержки

зажигания. По результатам математического моделирования установлено, что при температурах внешней среды $T_g < 700$ К использование СВЧ-излучения снижает время задержки зажигания более чем на 50%;

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

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fenga, J., Feng, L. Evaluation of the onshore wind energy potential in mainland China – based on GIS modeling and EROI analysis / J. Fenga, L. Feng, J. Wang, C.W. King // *Resour. Conserv. Recycl.* – 2020. – Vol. 152. – Art. no. 104484;
2. Ruggeri B., Gomez-Camacho C.E. N. Georgescu-Roegen's production model for EROI evaluation. Case study: electrolytic H₂ production using solar energy / B. Ruggeri, C.E. Gomez-Camacho // *Energy Convers. Manag.* – 2023. – Vol. 283. – Art. no. 116915;
3. Shi X., Li S. Numerical study on the impact of wave-current interaction on wave energy resource assessments in Zhoushan sea area, China / X. Shi, S. Li, B. Liang, J. Zhao, Y. Liu, Z. Wang // *Renew. Energy.* – 2023. – Vol. 215. – Art. no. 119017;
4. Соколов, Ю.И. Проблемы и риски возобновляемых источников энергии / Ю.И. Соколов // *Проблемы анализа риска.* – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 28-47;
5. Уголь занимает важное место в электроэнергетике ЕАЭС [Электронный ресурс]. – Евразийская экономическая комиссия., 2020. – Режим доступа: <https://eec.eaeunion.org/comission/departament/energ/informatsionnyy-blok/107944/>;
6. Волобуев, А. Глобальная энергетика возвращается к угольной генерации [Электронный ресурс] / А. Волобуев, В. Милькин // *Ведомости.*, 2022. – Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/04/26/919731-globalnaya-energetika-vozvrashaetsya-k-ugolnoi-generatsii>;
7. Васильева, Н.В. Угольная промышленность России – локомотив развития экономики страны / Н.В. Васильева // *Образование и право.* – 2020. – № 5. – С. 99-104;
8. Гордеев, Д. Межтопливная конкуренция в электрогенерации: уголь или газ / Д. Гордеев // *Экономическое развитие России.* – 2016. – № 4. – С. 55-59;
9. Oil, natural gas and coal prices by region, 2010 – 2021 [Электронный ресурс]. – IEA50., 2021. – Режим доступа: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/oil-natural-gas-and-coal-prices-by-region-2010-2021>;

10. Сидорова, Г.П. Проблемы радиационной опасности в угольной энергетике / Г.П. Сидорова, Д.А. Крылов // ГИАБ. – 2017. – № 11. – С. 200-209;
11. International Energy Outlook 2016 [Электронный ресурс]. – U.S. Energy Information Administration. – 2016. – Режим доступа: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf);
12. International Energy Outlook 2017, [Электронный ресурс]. – U.S. Energy Information Administration. – 2017. – Режим доступа: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf);
13. Харитоновский, А.А. Экология угольной промышленности: состояние, проблемы, пути решения / А.А. Харитоновский, А.Н. Калушев, В.Н. Васева, Е.И. Симанова // Вестник Научного центра. – 2018. – № 2. – С. 70-81;
14. Онучин, Е.М. История развития и перспектива технологий и технических средств заготовки и переработки древесины энергетического назначения / Е.М. Онучин, П.Н. Анисимов // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2013. – № 37. – С. 136-142;
15. Сажин, В.С. Древесина – возобновляемый источник энергии / В.С. Сажин, А.Н. Новиков, В.П. Чулков // Resour. Technol. – 2003. – С. 115-116;
16. Oh, J. Exploring the import allocation of wood pellets: Insights from price and policy influences under the renewable portfolio standard / J. Oh, D.H. Suh // Forest Policy and Economics. – 2024. – Vol. 161. – Art. no. 103180;
17. Mola-Yudego, B. Wood biomass potentials for energy in northern Europe: Forest or plantations? / B. Mola-Yudego, J. Arevalo, O. Díaz-Yáñez, I. Dimitriou, A. Haapala, A.C. Ferraz Filho, M. Selkimäki, R. Valbuena // Biomass and Bioenergy. – 2017. – Vol. 106. – P. 95-103;
18. Юшкевич, Д.П. Экологическая безопасность при использовании вторичного древесного сырья в деревообрабатывающей промышленности / Д.П. Юшкевич // МНИЖ. – 2020. – № 5-1 (95). – С. 176-180;
19. Horvat, I. Numerical and experimental methods in development of the novel biomass combustion system concept for wood and agro pellets / I. Horvat, D. Dović, P. Filipović // Energy. – 2021. – Vol. 231. – Art. no. 120929;

20. Четвертнева, И.А. Продукты переработки древесины как альтернатива углеводородам нефти / И.А. Четвертнева, О.Х. Каримов, Г.А. Тептерева, Р.А. Исмаков // НефтеГазоХимия. – 2019. – № 3-4. – С. 35-40;
21. Преснякова, Е.А. Утилизация отходов древесного производства / Е.А. Преснякова // Вестник магистратуры. – 2014. № 11-1 (38). – С 15-18;
22. Брюханова, Е.С. Проблемы утилизации мягких отходов древесины и отходов животноводства / Е.С. Брюханова, Г.В. Ушаков, А.Г. Ушаков // АЭЭ. – 2010. – № 5. – С. 71-82;
23. Савельев, М.С. Биотопливо на основе древесных отходов / М.С. Савельев // Российский внешнеэкономический вестник. – 2007. – № 12. – С. 4-9;
24. Чуваева, А.И. Использование биотоплива с точки зрения утилизации отходов лесопильного производства / А.И. Чуваева, И.В. Божко // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2007. – № 18. – С. 156-159;
25. Шишулькин, С.Ю. Газификация древесины с последующей выработкой электрической энергии / С.Ю. Шишулькин, С.Л. Буянтуев, И.В. Старинский // Вестник БГУ. Химия. Физика. – 2017. – № 2-3. – С. 75-82;
26. Рыжкова, Т.В. Энергетическое использование древесных ресурсов / Т.В. Рыжкова // Вестник МГУЛ. – Лесной вестник. – 2002. – № 4. – С. 159-163;
27. Kuznetsov, G.V. Analysis of the possibility of solid-phase ignition of coal fuel / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, M.V. Purin, V.A. Karelin, N.A. Nigay, S.A. Yankovsky, S.A. Isaev // Energy. – 2024. – Vol. 288. – Art. no. 129579;
28. Kuznetsov, G.V. Ignition and combustion characteristics of coal-water fuels based on coal & semi-coke / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, D.Y. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.V. Purin, S.A. Yankovsky // Combustion and Flame. – 2022. – Vol. 246. – Art. no. 112430;
29. Kuznetsov, G.V. Analysis of the influence of the type of heat transfer on the dynamics of the ignition processes of wood biomass particles under complex heating conditions / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, Zh.A. Kostoreva, N.A. Nigay, M.V. Purin, V.A. Karelin, V.V. Salomatov // Combustion and Flame. – 2024. – Vol. 262. – Art. no. 113353;

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

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

32. 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;

33. Frank-Kamenetsky, D.A. Combustion of coal / D.A. Frank-Kamenetsky // *Adv. Chem.* – 1938. – Vol. 7. – P. 1277-1311;

34. Zhang, T. The ignition modes transformation and critical parameters for single coal particle under O₂/CO₂ atmospheres / T. Zhang, Y. Zhou, Z. Hu // *Fuel Process. Technol.* – 2023. – Vol. 247. – Art. no. 107749;

35. Penchala, M.R. Computational analysis of influence of particle size, oxygen concertation, and furnace temperature on the ignition characteristics of pulverized high ash and high moisture coal particle / M.R. Penchala, A.S. Singh, V.R. Mahendra, A. Elwardany, H. Reddy // *Alexandria Eng. J.* – 2022. – Vol. 61. – P. 6169-6180;

36. Yang, W. Ignition predictions of isolated coal particles by different ignition criteria and devolatilization models / W. Yang, Y. Zhang, B. Liu, K. Xu, H. Zhang // *Fuel*. – 2022. – Vol. 314. – Art. no. 122772;

37. Sutardi, T. Numerical Investigation on Kinetic Parameter of Coal Devolatilization Reaction by Identifying Ignition Delay Parameter / T. Sutardi, M.C.

Paul, N. Karimi // World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS '18). – San Francisco, CA, USA, 23-25 Oct 2018. – P. 476-481;

38. Brewster, B.S. Treatment of coal devolatilization in comprehensive combustion modeling / B.S. Brewster, L.L. Baxter, L.D. Smoot // Energy Fuels. – 1988. – Vol. 2, № 4. – P. 362-370;

39. Иванов, В.М. Топливные эмульсии и суспензии / В.М. Иванов, Б.В. Канторович. – М.: Металлургия, 1963. – 214 с;

40. Лисичкин, С.М. Энергетические ресурсы мира / С.М. Лисичкин. – М.: Недра, 1977. – 328 с;

41. Делягин, Г.Н. Водные дисперсные системы на основе бурых углей как энергетическое и технологическое топливо / Г.Н. Делягин, А.П. Петраков, Г.С. Головин, Е.Г. Горлов // Российский химический журнал. – 1997. – № 6. – С. 72-77;

42. Горлов, Е.Г. Усовершенствование технологии создания водоугольного топлива из бурых углей / Е.Г. Горлов, Г.С. Головин, О.В. Зотова // Химия твердого топлива. – 1994. – № 6. – С. 117-125;

43. Демидов, Ю.В. Улучшенный состав твердого топлива для водоугольной суспензии на основе бурых углей Канско-Ачинского бассейна / Ю.В. Демидов, Г.Г. Бруер, С.М. Колесников и др. // Химия твердого топлива. – 1995. – № 5. – С. 3-6;

44. Широков, В.П. Высококонцентрированные угольные суспензии – новое топливо для электростанций / В.П. Широков, Г.Г. Бруер // Электрические станции. – 1992. – № 11. – С. 33-39;

45. Саломатов, В.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. 1 / В.В. Саломатов, И.В. Кравченко // Горение и плазмохимия. – 2007. – Т. 5, вып. 3. – С. 178-188;

46. Саломатов, В.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. 2. Стадия испарения / В.В. Саломатов, И.В. Кравченко // Горение и плазмохимия. – 2007. – Т. 5, вып. 3. – С. 189-197;

47. Саломатов, В.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. 3. Стадия воспламенения / В.В. Саломатов, И.В. Кравченко // Горение и плазмохимия. – 2008. – Т. 6, № 1. – С. 56-59;

48. Саломатов, В.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. 4. Стадия выгорания / В.В. Саломатов, И.В. Кравченко // Горение и плазмохимия. – 2008. – Т. 6, № 3. – С. 171-178;

49. Сыродой, С.В. Зажигание водоугольной частицы лучисто-конвективным теплом / С.В. Сыродой, В.В. Саломатов // Горение и плазмохимия. – 2011. – Т. 9, № 1. – С. 29-34;

50. Huang, Z. Theoretical analysis of CWM drop combustion history / Z. Huang et al. // Proc. 8th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. – USA, Orlando. Part 1. – 1986. – P. 343-358;

51. Matthews, K.J. The effect of coal composition on coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics / K.J. Matthews, A.R. Jones // Proc. 8th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. – USA, Orlando. – Part 1. – 1986. – P. 388-407;

52. Salomatov, V.V. Modelling of heat and mass transfer to solve the problem of particle ignition water-coal fuel / V.V. Salomatov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 66. – Art. no. 012040;

53. Делягин, Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха / Г.Н. Делягин // Сжигание высокообводнённого топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 45-55;

54. Kolb, T. The Contribution of Radiation to the Ignition of a Confined Turbulent Coal-Water Slurry Diffusion Flame / T. Kolb, W.F. Farmayan, P.M. Walsh, J.M. Beer // Combustion Science and Technology. – 1988. – Vol. 58. – P. 77-95;

55. Сполдинг, Д.Б. Горение и массообмен / Д.Б. Сполдинг. – М.: Машиностроение, 1958. – 320 с;

56. Kijo-Kleczkowska, A. Combustion of coal-water suspensions / A. Kijo-Kleczkowska // Fuel. – 2011. – Vol. 90, № 2. – P. 865-877;

57. Кузнецов, Г.В. Влияние условий теплообмена на характеристики зажигания частиц водоугольного топлива / Г.В. Кузнецов, В.В. Саломатов, С.В. Сыродой // Теплоэнергетика. – 2015. – № 10. – С. 16-24;

58. Syrodoy, S.V. Influence of particle shape on the characteristics of ignition of hydrocarbon fuel / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2015. – Vol. 51. – P. 28-34;
59. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 502 с;
60. Сполдинг, Д.Б. Основы теории горения / Д.Б. Сполдинг. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 320 с;
61. Glushkov, D.O. Mathematical model simulating the ignition of a droplet of coal water slurry containing petrochemicals / D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, S.V. Syrodoy // *Energy*. – 2018. – Vol. 150. – P. 262-275;
62. Choi, G.H. Investigation of coal-water slurry fuel combustion in reciprocating, internal combustion engine / G.H. Choi, S.R. Bell // *KSME Journal*. – 1994. – Vol. 8. – P. 356-363;
63. Badgley, P.R. Combustion Optimization of High Speed Coal-Water Slurry Fueled Diesel Engine / P.R. Badgley, D.C. Doup // *Energy Sources Technology Conference and Exhibition, ASME ICE*. – 1991. – Vol. 14. – P. 17-22;
64. Kakwani, R.M. Study for Coal-Water Slurry Fuel Combustion in a High-Speed Diesel Engine / R.M. Kakwani, R.E. Winsor // *Energy Sources Technology Conference and Exhibition, ASME ICE*. – 1992. – Vol. 16. – P. 25-32;
65. Bell, S.R. Numerical simulation of a Coal-Fueled Compression Ignition Engine / S.R. Bell, J.A. Caton // *Fuel*. – 1988. – Vol. 67. – P. 474-481;
66. Markovic, M. Experimental investigation of wood combustion in a fixed bed with hot air / M. Markovic, E.A. Bramer, G. Brem // *Waste Management*. – 2014. – Vol. 34, № 1. – P. 49-62;
67. Мурашка, В.В. Экспериментальное исследование горения древесины при использовании пассивной защиты / В.В. Мурашка, Е.Ю. Мирясов, Ю.Д. Моторыгин // *Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*. – 2011. – С. 168-172;

68. Кудрявцева, Л.А. Изучение особенностей горения древесных опилок / Л.А. Кудрявцева, П.М. Мазуркин // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 6-3. – С. 85-90;
69. Амельчугов, С.П. Горение древесины при пожаре: учебное пособие / С.П. Амельчугов, Р.Г. Шубкин, А.В. Антонов, С.В. Романов, М.А. Никулин. – Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, 2022. – 148 с;
70. Kruglov, E.Yu. Flameless combustion of wood: charring and heat release characteristics / E.Yu. Kruglov, R.M. Aseeva // Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety. – 2021. – Vol. 30, № 5. – P. 30-41;
71. Гришин, А.М. Математическое моделирование процесса зажигания древесины / А.М. Гришин, А.С. Якимов // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20, № 4. – С. 473-486;
72. Гришин, А.М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины / А.М. Гришин // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех. – 2010. – № 2. – С. 60-70;
73. Blijderveen, M.V. Modelling spontaneous ignition of wood, char and RDF in a lab-scale packed bed / M.V. Blijderveen, E.A. Bramer, G. Brem // Fuel. – 2013. – Vol. 108. – P. 190-196;
74. Гришин, А.М. Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.П. Зима, Д.А. Крючков, В.В. Рейно, А.Н. Субботин, Р.Ш. Цвык // Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34, № 3. – С. 14-22;
75. Боровиков, А.М. Справочник по древесине / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев. – М.: Лесн. пром-сть, 1989. – 296 с;
76. Соколов, П.В. Сушка древесины: учебник для техникумов / П.В. Соколов. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. – 423 с;
77. Рахманкулов, Д.Л. Применение микроволнового излучения для сушки дерева и пиломатериалов / Д.Л. Рахманкулов, С.Ю. Шавшукова, И.Н. Вихарева // Баш. хим. ж. – 2008. – № 1. – С. 46-52;
78. Новая технология сушки бревен и бруса [Электронный ресурс] // СВЧ технологии в деревообработке. – Режим доступа: <http://www.svch-tehnologii.ru/>;

79. Гареев, Ф.Х. Сушка древесины электромагнитными волнами / Ф.Х. Гареев // Лесная промышленность. – 2004. – № 9. – С. 74;
80. Адамович, А.Л. Нагрев и сушка пиломатериалов в макетном образце СВЧ-установки / А.Л. Адамович, Ю.Г. Грозберг, О.А. Кизина // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 11. – С. 82-84;
81. Мелехов, В.И. Контроль процесса сушки пиломатериалов в СВЧ-лесосушильной камере резонаторного типа / В.И. Мелехов, В.А. Шульгин // Лесной журнал. – 2016. – № 1. – С. 122-130;
82. Мелехов, В.И. Резонансные явления в процессе СВЧ-сушки древесины / В.И. Мелехов, В.А. Шульгин // Лесной журнал. – 2015. – № 5. – С. 135-145;
83. Hwang, J. Microwave-assisted plasma ignition in a constant volume combustion chamber / J. Hwang, C. Bae, J. Park, W. Choe, J. Cha, S. Woo // Combustion and Flame. – 2016. – Vol. 167. – P. 86-96;
84. Kanilo, P.M. Microwave plasma combustion of coal / P.M. Kanilo, V.I. Kazantsev, N.I. Rasyuk, K. Schünemann, D.M. Vavriv // Fuel. – 2003. – Vol. 82, – № 2. – P. 187-193;
85. Vecten, S. Hydrogen-rich syngas production from biomass in a steam microwave-induced plasma gasification reactor / S. Vecten, M. Wilkinson, N. Bimbo, R. Dawson, B.M.J. Herbert // Bioresource Technology. – 2021. – Vol. 337. – Art. no. 125324;
86. Arpia, A.A. Microwave-assisted gasification of biomass for sustainable and energy-efficient biohydrogen and biosyngas production: A state-of-the-art review / A.A. Arpia, T.B. Nguyen, W.H. Chen, C.D. Dong, Y.S. Ok // Chemosphere. – 2022. – Vol. 287, Part 1. – Art. no. 132014;
87. Zhang, L. Microwave-assisted catalytic transfer hydrogenation of biodiesel at constant microwave power / L. Zhang, Z. Xin, Z. Liu, Y. Ou, Z. Ye, Z. Li, G. Wei // Fuel. – 2020. – Vol. 270. – Art. no. 117510;

88. Карелин, В.А. Исследование тепломассопереноса в слое угля при воздействии СВЧ-излучения: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.14 / Карелин Вадим Александрович. – Новосибирск, 2023. – 150 с;
89. Франк-Каменецкий, Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – 4-е изд. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 407 с;
90. Paea, S. Coal pyrolysis distribution / S. Paea. – Victoria University of Wellington, 2008. – 210 p;
91. Dogonchi, A.S. Entropy generation and heat transfer performance analysis of a non-Newtonian NEPCM in an inclined chamber with complicated heater inside / A.S. Dogonchi, N.S. Bondareva, M.A. Sheremet, S. El-Sapa, A.J. Chamkha, N.A. Shah // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 72. – Art. no. 108745;
92. Bondareva, N.S. Influence of metal foam and nanoparticles on convective melting in a rectangular cavity under heating of bottom wall / N.S. Bondareva, M.A. Sheremet // International Journal of Thermofluids. – 2023. – Vol. 19. – Art. no. 100374;
93. Гольдин, В.Я. О численном моделировании задач радиационной газовой динамики / В.Я. Гольдин, Б.Н. Четверушкин. – М.: Ин-т прикл. математики АН СССР, 1973. – 24 с. – (Препринт / ИПМ; № 17. 1973);
94. Chen, Y. A study to investigate pyrolysis of wood particles of various shapes and sizes / Y. Chen, K. Aanjaneya, A. Atreya // Fire Safety Journal. – 2017. – Vol. 91. – P. 820-827;
95. Galgano, A. Modeling the propagation of drying and decomposition fronts in wood / A. Galgano, C. Di Blasi // Combustion and Flame. – 2004. – Vol. 139. – P. 16-27;
96. Бондарев, А.Е. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша / А.Е. Бондарев. – М., 2008. – 16 с. – № 073;
97. Kuznetsov, G.V. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions. Ignition stage / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, D.Yu. Malyshev, N.Yu. Gutareva, N.A. Nigay // Appl, Therm, Eng. – 2020. – Vol. 170. – Art. no. 115034;

98. 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. – Vol. 180. – P. 196-206;
99. Зельдович, Я.Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика / Я.Б. Зельдович. – М.: Наука, 1984. – 374 с;
100. Семёнов, Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов / Н.Н. Семёнов // *Успехи физических наук*. – 1940. – Т. 24, № 8. – С. 433-486;
101. Виллюнов, В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ / В.Н. Виллюнов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 192 с;
102. Агроскин, А.А. Теплофизика твердого топлива / А.А. Агроскин. – М.: Недра, 1980. – 256 с;
103. Грязнов, Н.С. Пиролиз углей в процессе коксования / Н.С. Грязнов. – М.: Металлургия, 1983. – 184 с;
104. Агроскин, А.А. Физические свойства угля / А.А. Агроскин. – М.: Металлургиздат, 1961. – 308 с;
105. Прохоров, А.М. Пойнтинга вектор / А.М. Прохоров // *Большая российская энциклопедия*. – М., – 1992. – Т. 3. – С. 671;
106. Yee, K. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* / K. Yee. – 1966. – Vol. 14, № 3. – P. 302-307;
107. Кузнецов, Г.В. Математическое моделирование зажигания древесноугольной пеллеты при комбинированном нагреве / Г.В. Кузнецов, С.В. Сыродой, М.В. Пурин // *Тезисы XVII Всероссийского симпозиума по горению и взрыву*. – 2024. – С. 140-141;
108. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 416 с;
109. Мурко, В.И. Результаты исследования вредных выбросов при сжигании суспензионного угольного топлива / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко, Д.А. Дзюба // *Журнал СФУ. Техника и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 512-519;

110. Валиева, Л.Е. Экспериментальное исследование и математическое моделирование процессов термической подготовки и зажигания частицы водоугольного топлива / Л.Е. Валиева, С.В. Сыродой // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: Труды Томского государственного университета. – Томск. – 2019. – С. 68-78;

111. Сыродой, С.В. Зажигание частиц древесной биомассы в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве / С.В. Сыродой, Д.Ю. Малышев, Ж.А. Косторева, А.А. Косторева, А.А. Омаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 5. – С. 159-167;

112. Косторева, А.А. Обоснование параметров диспергированной древесины в качестве топлива котельных установок: дис. ... канд. техн. наук: 2.4.6 / Косторева Анастасия Андреевна. – Томск, 2023. – 180 с;

113. Саломатов, В.В. Методы расчета нелинейных процессов теплового переноса. Ч. 1 / В.В. Саломатов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1976. – 22 с;

114. Саломатов В.В. Методы расчета нелинейных процессов теплового переноса Ч. 2 / В.В. Саломатов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1976;

115. Саломатов, В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях / В.В. Саломатов. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 852 с;

116. Salomatov, V. Mathematical and physical modeling of the coal-water fuel particle ignition with a liquid film on the surface / V. Salomatov, G. Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva // Energy Reports. – 2020. – Vol. 6. – P. 628-643;

117. Пузырев, Е.М. Закономерности нестационарного теплообмена при лучистом нагреве ламинарного потока жидкости в длинных каналах / Е.М. Пузырев, В.В. Саломатов // ТВТ. – 1974. – Т. 12, вып. 4. – С. 769-774;

118. Krasnov, M.L. Operational calculus. Movement stability / M.L. Krasnov, G.I. Makarenko. – М.: Nauka, – 1964. – 103 p;

119. Саломатов, Вл.В. Математическое моделирование СВЧ-нагрева угольного полумассива / Вл.В. Саломатов, Вас.В. Саломатов, С.Э. Пащенко, С.О. Сладков // Ползуновский Вестник. – 2012. – № 3-1. – С. 31-33;

120. Шилова, Г.Е. Математический анализ (функции одного переменного) / Г.Е. Шилова. – М.: Наука, 1969. – 320 с;
121. Гусак, А.А. Справочник по высшей математике: в 2 т. / А.А. Гусак, Г.М. Гусак, Е.А. Бричикова. – Минск: Тетрасистемс, 1999. – Т. 1. – 640 с;
122. Тодес, О.М. Кинетика процессов образования новой фазы: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.00.00 / Тодес Оскар Моисеевич. – М., 1944. – 377 с;
123. Patsias, A.A. Calcium-based sorbents for simultaneous NO_x/SO_x reduction in a down-fired furnace / A.A. Patsias, W. Nimmo, B.M. Gibbs, P.T. Williams // Fuel. – 2005. – Vol. 84. – P. 1864-1873.
124. Ладыженский, Б.Н. Литейное производство / Б.Н. Ладыженский, В.Д. Орешкин, Ю.С. Сухарчук. – М.; Свердловск: Машгиз, 1953. – 208 с;
125. Гиршович, Н.Г. Чугунное литье / Н.Г. Гиршович. – Л.: Машиностроение, 1935. – 156 с;
126. Yao, H.F. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal / H.F. Yao, B.S. He, G.C. Ding, W.X. Tong, Y.C. Kuang // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 156. – P. 708-721;
127. Vershinina, K.Yu. Experimental study of ignition sources of pre-coal fuels based on coke and semi-coke / K.Yu. Vershinina, D.O. Glushkov, P.A. Strizhak // Koks & chemistry. – 2017. – № 1. – P. 29-38;
128. Kuznetsov, G.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. – Vol. 9. – Art. no. 104741;
129. Kuznetsov, G.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. – Vol. 239. – Art. no. 121677;
130. Syrodoy, S.V. Ignition of bio-water-coal fuel drops / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva, M.V. Purin // Energy. – 2020. – Vol. 203. – Art. no. 117808;

131. Syrodoy, S.V. Flame propagation characteristics in the boundary layer of the bio-water-coal fuel particle during its ignition / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, D.Yu. Malyshev, Zh.A. Kostoreva, M.V. Purin // *Combustion Science and Technology*. – 2022. – Vol. 195(12). – P. 2909-2932;
132. Syrodoy, S.V. Mathematical modeling of the thermochemical processes of sequestration of SO_x when burning the particles of the coal and wood mixture / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N. Yu. Gutareva, N.A. Nigay (Ivanova) // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 185. – P. 1392-1409;
133. Syrodoy, S.V. Mathematical modeling of the thermochemical processes of nitrogen oxides sequestration during combustion of wood-coal mixture particles / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N. Yu. Gutareva, N.A. Nigay // *Journal of the Energy Institute*. – 2021. – № 96. – P. 280-293;
134. ЛЫКОВ, А.В. Теория теплопроводности / А.В. ЛЫКОВ. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с;
135. Allam, R. Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture / R. Allam, S. Martin, B. Forrest, J. Fetvedt, X. Lu, D. Freed, G.W. Brown-Jr., T. Sasaki, M. Itoh, J. Manning // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 114. – P. 5948-5966;
136. Xin, T. Thermodynamics Study of a Solar Hybrid Allam Cycle Integrated with Methane Reforming / T. Xin, C. Xu, X. Liu, S. Li, Y. Yang // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2303. – Art. no. 080008;
137. Lu, X. Integration and Optimization of Coal Gasification Systems with a Near-Zero Emissions Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle / X. Lu, B. Forrest, S. Martin, J. Fetvedt // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbine Technical Conference and Exposition*. – Seoul, South Korea, 2016;
138. Allam, R.J. Allam Cycle Path to Coal / R.J. Allam et al. – Prepared for the UK Department of Energy and Climate Change, 2013. – 45 p;
139. Wenglarz, R.A. Coal-Water Slurry Testing of an Industrial Gas Turbine / R.A. Wenglarz, C. Wilkes, R.C. Bourke, H.C. Mongia // *The American Society of Mechanical Engineers*. – 1992. – № 92-GT-260;

140. Стерман, Л.С. Тепловая часть атомных электростанций / Л.С. Стерман. – М.: Госатомиздат, 1963. – 158 с;
141. Suh, H.K. A review on atomization and exhaust emissions of a biodieselfueled compression ignition engine / H.K. Suh, C.S. Lee // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 58. – P. 1601-1620;
142. Zeng, W. Atomization and vaporization for flash-boiling multi-hole sprays with alcohol fuels / W. Zeng, M. Xu, G. Zhang, Y. Zhang, D.J. Cleary // Fuel. – 2012. – Vol. 95. – P. 287-297;
143. Langmuir, I. Die Dissoziation des Wasserstoffs in Atome. III. Der Reaktionsmechanismus / I. Langmuir // Zeits. Elektrochem. – 1920. – Vol. 26. – P. 197;
144. Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных – 2-е изд., перераб. и доп. / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с. с ил.;
145. Samarskii, A.A. Local one-dimensional difference schemes on non-uniform nets / A.A. Samarskii // USSR Comput. Math. Math. Phys. – 1963. – Vol. 3. – P. 572-619;
146. Samarskii, A.A. Numerical methods / A.A. Samarskii, A.V. Gulin. – Moscow, 1989. – 320 p;
147. Samarskii, A.A. Introduction to numerical methods / A.A. Samarskii. – Moscow, 1982. – 280 p;
148. Zivanovic, S.S. A subgridding method for the Time Domain Finite-Difference Method to solve Maxwell's equations / S.S. Zivanovic, K.S. Yee, K.K. Mei // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1991. – Vol. 38. – P. 471;
149. Формалёв, В.Ф. Теплоперенос в анизотропных твердых телах. Численные методы, тепловые волны, обратные задачи / В.Ф. Формалёв. – М.: Физматлит, 2015. – 274 с;
150. Самарский, А.А. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана / А.А. Самарский, Б.Д. Моисеенко // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1965. – Т. 5, № 5. – С. 816-827;

151. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во Томского университета, 2007. – 172 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ
ПОСТАВЛЕННЫХ В РАБОТЕ ЗАДАЧ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ
ПЕЛЛЕТИЗИРОВАННОГО (ГЛАВА 2) И ВОДОУГОЛЬНОГО (ГЛАВА 4,
ПАРАГРАФ 4.2) ТОПЛИВ**

Задачи зажигания топливных частиц, приведённые в разделах 2.1 и 4.2, решены методом конечных разностей [145]. Для численного решения поставленных в диссертационном исследовании задач зажигания использована консервативная шеститочечная разностная схемы [146]. Двумерные уравнения энергии, движения, диффузии и пьезопроводности аппроксимированы методом переменных направлений [146]. Конвективные члены уравнений энергии, диффузии и уравнения Навье-Стокса были реализованы с помощью монотонной разностной схемы Самарского [147]. Система уравнений Максвелла решена методом конечных разностей во временной области [148]. Например, уравнение энергии, описывающее распределение температур в прилегающей к пеллете газовой среде, аппроксимируется следующим образом [149, 150]:

При проведении процедуры прогонки в направлении оси OR:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Ho \left(\frac{\partial (U_g \theta)}{\partial R} + \frac{\partial (V_g \theta)}{\partial Z} \right) + \frac{A_g}{M_g^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2} &= \frac{K_R^2}{Fk} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R A_g \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{K_R^2}{Fk} \frac{\partial}{\partial Z} \left(A_g \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \right] + Po + \nabla \Gamma \rightarrow \quad (A.1) \\
 \frac{\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i,j}^n}{0,5h_\tau} + Ho U_{g,i,j}^n \frac{\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r} - Ho |U_{g,i,j}^n| \frac{\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r} + \\
 + Ho V_{g,i,j}^n \frac{\theta_{i,j+1}^n - \theta_{i,j-1}^n}{2h_z} + \frac{A_c}{M_c^2} \frac{\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\theta_{i,j}^n + \theta_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{0,25h_\tau^2} = \\
 = \frac{K_r^2}{Fk h_r R_i} \left(1 + |U_{g,i,j}^n| \frac{h_r Fk R_i}{2 K_r^2} \right)^{-1} \left[R_{i+\frac{1}{2}} A_{c,i+\frac{1}{2},j} \frac{\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_r} - R_{i-\frac{1}{2}} A_{c,i-\frac{1}{2},j} \frac{\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_r} \right] + \\
 + \frac{K_r^2}{Fk h_z^2} \left(A_{c,i,j+\frac{1}{2}} (\theta_{i,j+1}^n - \theta_{i,j}^n) - A_{c,i,j-\frac{1}{2}} (\theta_{i,j}^n - \theta_{i,j-1}^n) \right) + \int_{R-\frac{1}{2}}^{R+\frac{1}{2}} Po_{i,j} dR + \\
 + \frac{1}{R_i} \left(R_{i+\frac{1}{2}} \frac{\Gamma_{i+1,j}^n - \Gamma_{i,j}^n}{h_r} - R_{i-\frac{1}{2}} \frac{\Gamma_{i,j}^n - \Gamma_{i-1,j}^n}{h_r} \right),
 \end{aligned}$$

где

$$R_{i+\frac{1}{2}} = \frac{R_{i+1} + R_i}{2};$$

$$R_{i-\frac{1}{2}} = \frac{R_i + R_{i-1}}{2};$$

$$A_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{A_{i+1,j} + A_{i,j}}{2};$$

$$A_{i-\frac{1}{2},j} = \frac{A_{i,j} + A_{i-1,j}}{2};$$

$$A_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{A_{i,j+1} + A_{i,j}}{2};$$

$$A_{i,j-\frac{1}{2}} = \frac{A_{i,j} + A_{i,j-1}}{2}.$$

При проведении процедуры прогонки в направлении оси OZ:

$$\begin{aligned} & \frac{\theta_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{0,5h_\tau} + Ho \left(V_{g,i,j}^n \frac{\theta_{i,j+1}^{n+1} - \theta_{i,j-1}^{n+1}}{2h_z} - |V_{g,i,j}^n| \frac{\theta_{i,j+1}^{n+1} - 2\theta_{i,j}^{n+1} + \theta_{i,j-1}^{n+1}}{2h_z} + U_{g,i,j}^n \frac{\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_z} \right) + \\ & + \frac{A_c}{M_c^2} \frac{\theta_{i,j}^{n+1} - 2\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \theta_{i,j}^n}{0,25h_\tau^2} = \\ & = \frac{K_R^2}{Fk h_z} \left(1 + |V_{g,i,j}^n| \frac{Fk h_z}{2K_R^2} \right)^{-1} \left[A_{c,i,j+\frac{1}{2}} \left(\frac{\theta_{i,j+1}^{n+1} - \theta_{i,j}^{n+1}}{h_z} \right) - A_{c,i,j-\frac{1}{2}} \left(\frac{\theta_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j-1}^{n+1}}{h_z} \right) \right] + \\ & + \frac{K_R^2}{h_r R_i} \left[R_{i+\frac{1}{2}} A_{c,i+\frac{1}{2},j} \left(\frac{\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_r} \right) - R_{i-\frac{1}{2}} A_{c,i-\frac{1}{2},j} \left(\frac{\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_r} \right) \right] + \int_{z-\frac{1}{2}}^{z+\frac{1}{2}} P o_{i,j} dR + \frac{\Gamma_{i,j+1}^n - \Gamma_{i,j}^n}{h_z}. \end{aligned} \quad (A.2)$$

Разностные уравнения решались методом прогонки [146]. Конечно-разностное уравнение приводим к трёхточечному каноническому виду:

$$A_i \theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_i, \quad (A.3)$$

$$A_j \theta_{i,j+1}^{n+1} - B_j \theta_{i,j}^{n+1} + C_j \theta_{i,j-1}^{n+1} = F_j. \quad (A.4)$$

В этом случае прогоночные коэффициенты $A_m, B_m, C_m, F_m|_{m=i,j}$ имеют вид:

$$A_i = \frac{K_R^2}{Fk h_r R_i} \left(1 + |U_{i,j}^n| \frac{h_r Fk R_i}{2 K_R^2} \right)^{-1} \frac{R_{i+\frac{1}{2}} A_{c,i+\frac{1}{2},j}}{h_r} + \frac{Ho}{2h_r} (|U_{g,i,j}^n| - U_{g,i,j}^n), \quad (A.5)$$

$$\begin{aligned} B_i &= \frac{K_R^2}{Fk h_r R_i} \left(1 + |U_{g,i,j}^n| \frac{h_r Fk R_i}{2 K_R^2} \right)^{-1} \left(\frac{R_{i+\frac{1}{2}} A_{c,i+\frac{1}{2},j}}{h_r} + \frac{R_{i-\frac{1}{2}} A_{c,i-\frac{1}{2},j}}{h_r} \right) + \\ &+ \frac{2}{h_\tau} + \frac{Ho |U_{g,i,j}^n|}{h_r} + \frac{A_c}{0,25M_c^2 h_\tau^2}, \end{aligned} \quad (A.6)$$

$$C_i = \frac{K_r^2}{Fk h_r R_i} \left(1 + |U_{g,i,j}^n| \frac{h_r Fk R_i}{2 K_r^2} \right)^{-1} \frac{R_{i-\frac{1}{2}} A_{c,i-\frac{1}{2},j}}{h_r} + \frac{Ho}{2h_r} (|U_{g,i,j}^n| + U_{g,i,j}^n), \quad (A.7)$$

$$F_i = -\frac{2\theta_{i,j}^n}{h_\tau} + \frac{Ho V_{g,i,j}^n}{2h_z} (\theta_{i,j+1}^n - \theta_{i,j-1}^n) + \frac{A_c}{M_c^2} \left(\frac{\theta_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} - 2\theta_{i,j}^n}{0,25h_\tau^2} \right) -$$

$$-\frac{K_r^2}{Fk h_z^2} \left(A_{c,i,j+\frac{1}{2}} (\theta_{i,j+1}^n - \theta_{i,j}^n) - A_{c,i,j-\frac{1}{2}} (\theta_{i,j}^n - \theta_{i,j-1}^n) \right) -$$

$$-\int_{R-\frac{1}{2}}^{R+\frac{1}{2}} Po_{i,j} dR + \frac{1}{R_i} \left(R_{i+\frac{1}{2}} \frac{\Gamma_{i+1,j}^n - \Gamma_{i,j}^n}{h_r} - R_{i-\frac{1}{2}} \frac{\Gamma_{i,j}^n - \Gamma_{i-1,j}^n}{h_r} \right), \quad (A.8)$$

$$A_j = \frac{K_r^2}{Fk h_z} \left(1 + |V_{g,i,j}^n| \frac{Fk h_z}{2K_r^2} \right)^{-1} \frac{A_{c,i,j+\frac{1}{2}}}{h_z} + \frac{Ho}{2h_z} (|V_{g,i,j}^n| - V_{g,i,j}^n), \quad (A.9)$$

$$B_j = \frac{K_r^2}{Fk h_z} \left(1 + |V_{g,i,j}^n| \frac{Fk h_z}{2K_r^2} \right)^{-1} \left(\frac{A_{c,i,j+\frac{1}{2}} + A_{c,i,j-\frac{1}{2}}}{h_z} \right) + \frac{2}{h_\tau} + \frac{Ho |V_{g,i,j}^n|}{h_z} + \frac{A_c}{0,25M_c^2 h_\tau^2}, \quad (A.10)$$

$$C_j = \frac{K_r^2}{Fk h_z} \left(1 + |V_{g,i,j}^n| \frac{Fk h_z}{2K_r^2} \right)^{-1} \frac{A_{c,i,j-\frac{1}{2}}}{h_z} + \frac{Ho}{2h_z} (|V_{g,i,j}^n| + V_{g,i,j}^n), \quad (A.11)$$

$$F_j = -\frac{2\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_\tau} + \frac{Ho U_{g,i,j}^n}{2h_r} \left(\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) + \frac{A_c}{M_c^2} \left(\frac{\theta_{i,j}^n - 2\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{0,25h_\tau^2} \right) -$$

$$-\frac{K_r^2}{h_r^2 R_i} \left[R_{i+\frac{1}{2}} A_{c,i+\frac{1}{2},j} \left(\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) - R_{i-\frac{1}{2}} A_{c,i-\frac{1}{2},j} \left(\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right] -$$

$$-\int_{Z-\frac{1}{2}}^{Z+\frac{1}{2}} Po_{i,j} dZ + \frac{\Gamma_{i,j+1}^n - \Gamma_{i,j}^n}{h_z}. \quad (A.12)$$

Уравнения энергии, движения, пьезопроводности и диффузии, приведённые далее в тексте, аппроксимировались аналогично. Далее уравнения решались хорошо зарекомендовавшим себя методом прогонки [150]. Суть последнего сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$\mathfrak{R}_i = \alpha_i \mathfrak{R}_{i+1} + \beta_i, \quad (A.13)$$

где $\mathfrak{R}_i \in \{\theta, \Omega, H, Y\}$ – искомая функция,

α_i, β_i – прогоночные коэффициенты.

Прогоночные коэффициенты имеют следующий рекуррентный вид:

$$\alpha_i = \frac{A_m}{B_m - C_m \alpha_{i-1}}, \quad (A.14)$$

$$\beta_i = \frac{C_m \beta_{i-1} - F_m}{B_m - C_m \alpha_{i-1}}. \quad (\text{A.15})$$

Вся процедура решения сводится следующему алгоритму: на первом этапе с помощью прямой прогонки определяются прогоночные коэффициенты α_i, β_i , после чего методом обратной прогонки устанавливаются значения искомой функции $\mathfrak{R}_i$ [151].

ПРИЛОЖЕНИЕ В. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Размерные величины:

T – температура, К;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴);

$\varepsilon(T)$ – интегральная степень черноты, зависящая от температуры;

p – давление, Па;

η – степень пиролиза топлива;

r – радиальная координата, м;

Φ – угловая координата, рад.;

x, y – координаты;

k – предэкспонент гетерогенной (м/с) или гомогенной (1/с) реакции;

u – скорость движения смеси водяных паров и газообразных продуктов пиролиза в порах топлива в радиальном (в направлении оси x – в декартовой системе координат) направлении, м/с;

v – скорость движения смеси водяных паров и газообразных продуктов пиролиза в порах в азимутальном (в направлении оси y – в декартовой системе координат) направлении, м/с;

M^{daf} – содержание летучих;

K_p – коэффициент проницаемости угля, м²;

ω – динамическая вязкость, Па·с;

Q – тепловой эффект, Дж/кг;

λ – коэффициент теплопроводности Вт/(м·К);

c – теплоемкость, Дж/(кг·К);

$\chi = K_p/(\omega\beta\Pi_0)$ – коэффициент пьезопроводности, м²/с;

ρ – плотность, кг/м³;

$a = \lambda/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, м²/с.

h_s – параметр трансформации фронта испарения, м;

s – характерный размер поры м;

t – время, с;

$t_{hw} = (r^*)^2/a^*$ – характерное время распространения волны теплового возмущения по радиусу r^* , с.

β – коэффициент сжимаемости жидкости, Па⁻¹;

I_R – интенсивность излучения, Вт/м²;

$t_a = \frac{R\dot{T}^2}{E^*} \frac{c^*}{Q^*k^*} \exp\left(\frac{E}{R\dot{T}}\right)$ – адиабатический период реагирования, с;

$x_a = \sqrt{at_a}$ – адиабатическая толщина, м;

Безразмерные величины:

$\theta = (T - T_0)/\Delta T$ – температура; $\Delta T = T_{eva} - T_0$ – температура нагрева до начала процесса парообразования, К; T_{eva} – максимально возможная температура испарения = 373К; T_0 – температура в начальный момент времени.

$\theta = \frac{E^*}{RT^2} (T - T^*)$ – температура в переменных Франк-Каменецкого;

$\tau = t/t^*$ – время;

$\tau = t/t_a$ – время;

m – пористость;

$C = c/c^*$ – теплоемкость;

$P = \rho/\rho^*$ – плотность;

$\Lambda = \lambda/\lambda^*$ – коэффициент теплопроводности;

$U = u/u^*$ – скорость в радиальном направлении;

$V = v/u^*$ – скорость в азимутальном направлении;

$R = r/r^*$ – радиус;

$X = x/r^*$ – координата оси x;

$Y = y/r^*$ – координата оси y;

$\xi_x = x/x_a$ – координата оси x;

$\xi_y = y/x_a$ – координата оси y;

$\Pi = m/m^*$ – пористость;

$H = p/p^*$ – давление парогазовой смеси в пористой структуре частицы;

$X = \chi/\chi^*$ – коэффициент пьезопроводности;

$D_i = d_i/d_i^*$ – коэффициент диффузии;

$\Gamma = \frac{I_R}{\sigma T^4}$ – интенсивность излучения;

Y_i – массовая концентрация i -го компонента газовой смеси;

$\Psi(\xi) = O(\xi)$ – функция Хевисайда;

Ψ – функция тока;

$\delta(\xi) = \Delta(\xi)$ – функция Дирака;

Ω – направление полета фотона.

Ω – функция;

$\gamma_i = \frac{T - G_i \dot{T}}{T - \dot{T}}$; – безразмерный параметр;

$G_i = \frac{E_i}{\dot{E}}$ – безразмерная энергия активации;

$\hbar = a_p x_a$ – характерная оптическая толщина;

$R_K = L/x_a$;

Безразмерные комплексы и критерии:

$Arr = \frac{E}{RT}$ – критерий Аррениуса;

$\Upsilon = \frac{\omega u^*}{p^* r^*}$ – параметр торможения;

$\Upsilon = \frac{k_i \rho_i}{k^* \rho^*} \frac{RT^2}{\dot{E}} \frac{c^*}{Q^* k^*} \exp[E/(R\dot{T})]$ – безразмерный критерий выгорания;

$Da = Dar = \frac{\omega r^* u^*}{K_p p^*}$ – критерий Дарси;

$Da^{III} = \frac{Q_i}{c^* \Delta T}$ – третье число Дамкёлера;

$Bo = N_R Pe$ – критерий Больцмана;

$Bo = \frac{u^* \rho^* c^*}{\sigma T_g^4} \frac{R\dot{T}^2}{\dot{E}}$ – критерий Больцмана;

$Ku = \frac{Q_{eva}}{\Delta T c^*}$ – критерий Кутателадзе;

$Ki = \frac{qr^*}{\lambda \Delta T}$ – критерий Кирпичева;

$Ste = \frac{\Delta T c^*}{Q_{eva}}$ – критерий Стефана;

$\Omega = \frac{\rho_{wat}(r^*)^3}{a^* s t^* \rho^*}$ – безразмерный параметр;

$K_{td} = kt^*$ – постоянная процесса термического разложения;

$$K_{\lambda} = \frac{\lambda_g}{\lambda_{wcf}} - \text{комплекс, характеризующий интенсивность перетока теплоты из}$$

пограничного слоя частицы в слой топлива;

$$K_a = \frac{a_g}{a_{wcf}} - \text{симплекс нестационарности для уравнений энергии;}$$

$$K_H = \frac{\chi_c}{\chi_w} - \text{симплекс нестационарности для уравнений пьезопроводности;}$$

$$K_D = \frac{d_i^{ip}}{d_i} - \text{симплекс нестационарности для уравнений диффузии;}$$

$$K_j^n = \frac{Q\rho k}{Q^*\rho^*k^*} - \text{симплекс тепловой мощности;}$$

$$Fo = \frac{a^*t^*}{(r^*)^2} - \text{критерий Фурье;}$$

$$Fo_H = \frac{\chi t^*}{m(r^*)^2} - \text{аналог критерия Фурье в уравнении пьезопроводности;}$$

$$Fo^{dif} = \frac{d_i^{dif} t^*}{(L)^2} - \text{диффузионный критерий Фурье;}$$

$$Fk = \frac{Q^*\rho^*k^*}{\lambda^*} \frac{E}{RT^2} L^2 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) - \text{число Франк – Каменецкого;}$$

$$Pe = \frac{u^*r^*}{a^*} - \text{критерий Пекле;}$$

$$Po = \frac{Q_i W_i(r^*)^2}{\lambda^* \Delta T} = \frac{Q_i k_i \rho(r^*)^2}{\lambda^* \Delta T} - \text{критерий Померанцева для } i\text{-й химической}$$

реакции;

$$Po_i^H = \frac{W_i(r^*)^2 \omega}{\rho_{gm} p^* K_p^*} = \frac{k_i \rho(r^*)^2 \omega}{\rho_{gm} p^* K_p^*} - \text{аналог критерия Померанцева (уравнение}$$

пьезопроводности) для химических реакций (термическое разложение, взаимодействие водяных паров и углерода коксового остатка);

$$Po_{eva}^i = \frac{W_{eva}(r^*)^2 \omega}{s \rho_{gm} p^* K_p^*} - \text{аналог критерия Померанцева (уравнение}$$

пьезопроводности) для процесса испарения;

$$Po_i^{dif} = \frac{W_i(r^*)^2}{\rho_g d^*} = \frac{k_i \rho(r^*)^2}{\rho_g d^*} - \text{аналог критерия Померанцева (уравнение}$$

диффузии);

$$Ki_{C+O_2} = \frac{Q_{C+O_2} W_{C+O_2} r^*}{\lambda^* \Delta T} - \text{критерий Кирпичева для реакции горения углерода;}$$

$$Ki = \frac{E}{RT^2} \frac{\chi_a}{\lambda} \varepsilon I_R \text{ — критерий Кирпичева;}$$

$$Sk(\theta) = \frac{\varepsilon(T)\sigma\Delta T^3}{\lambda^*} \text{ — критерий Старка;}$$

$$Sh = \frac{L}{\tau^* u^*} \text{ — число Струхалю;}$$

$$Re = \frac{U^* L}{\nu} \text{ — число Рейнольдса;}$$

$$Ri = \frac{gL\beta_{sp}\Delta T_g}{\nu^2} \text{ — число Ричардсона;}$$

$$N_R = \frac{\sigma T^4 r^*}{\lambda^*} \text{ — радиационно-кондуктивный параметр (для газовой среды);}$$

$$N_R = \frac{\sigma T_g^4 \chi_a}{\lambda^*} \frac{E}{RT^2} \text{ — радиационно-кондуктивный параметр (для газовой среды);}$$

$$N_{rc} = \frac{13.5\sigma T^3 s}{\varepsilon \lambda^*} \text{ — радиационно-кондуктивный параметр (для внутрипоровой}$$

структуры топлива);

$$N = \frac{\rho^* u^* r^*}{d^* \rho_g};$$

$$\zeta = \frac{(r^*)^2}{K_p};$$

$$\Gamma = \frac{\lambda_s L^2}{\lambda^* s^2};$$

$$\Omega^\theta = \frac{\Delta T_g \rho_c a_c s t^*}{\Delta T_{eva} \rho_w L^3};$$

$$\Omega^H = \frac{(r^*)^2}{s u t^*};$$

$$\Omega^H = \frac{s m \beta \nu u^*}{K_p};$$

$$\Omega^\theta = \frac{RT^2 \rho_c s}{\Delta T_{eva} E \rho_w \chi_a};$$

$$B^H = \frac{a_c \rho_c}{\rho_w u^* L^*};$$

$$B^H = \frac{K_p}{\rho_w u^* m \nu \chi_a} \frac{k_i \rho_i c^*}{Q^* k^*} \frac{RT^2}{E};$$

Нижний индекс:

0 – начальный момент времени;

1 – область исходного (водонасыщенного) топлива;

2 – участок сухого топлива;

g – высокотемпературный газ;

gm – смесь водяного пара и газообразных продуктов пиролиза;

c – уголь;

i – номер реакции;

eva – граница системы «влажное топливо – сухой каркас»;

etd – окончание процесса термического разложения;

ign – зажигание;

oxy – окислитель (воздух);

sur – поверхность;

td – процесс термического разложения;

wat – вода.

Верхний индекс: * – масштаб.