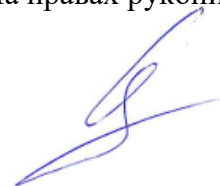


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Сыродой Семён Владимирович

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

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора технических наук

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

Томск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЯ | 22 |
| 1.1 Использование топливных композитов на основе угля в качестве топлива ТЭС | 22 |
| 1.2 Воспламенение капель водоугольного топлива..... | 23 |
| 1.3 Воспламенение частиц влажной древесной биомассы..... | 28 |
| 1.4 Воспламенение частиц древесно – угольных топливных смесей | 32 |
| 1.5 Воспламенение частиц био – водоугольных и органоводоугольных топлив | 36 |
| Выводы по первой главе | 38 |
| ГЛАВА 2 ЗАЖИГАНИЕ КАПЕЛЬ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ КАМЕРАМ СГОРАНИЯ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ..... | 40 |
| 2.1 Зажигание частицы водоугольного топлива в условиях интенсивного радиационно – конвективного нагрева..... | 41 |
| 2.2 Влияние гетерогенности структуры на характеристики и условия воспламенения частиц водоугольного топлива в высокотемпературной среде | 53 |
| 2.3 Математическое и физическое моделирование воспламенения водоугольной топливной частицы с пленкой воды на поверхности в неподвижном высокотемпературном окислителе..... | 66 |
| 2.4 Зависимости характеристик и условий воспламенения капель водоугольного топлива от степени метаморфизма угля | 77 |
| 2.5 Влияние радиационного теплопереноса на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива..... | 82 |
| 2.6 Зажигание частиц водоугольного топлива в потоке высокотемпературного газа | 87 |
| 2.7 Условия диспергирования капель водоугольного топлива при их воспламенении в условиях высокотемпературного нагрева | 98 |
| 2.8 О выборе кинетической схемы реакций окисления газообразных продуктов пиролиза угля в период индукции при зажигании частиц водоугольного топлива | 105 |
| Выводы по второй главе | 112 |
| ГЛАВА 3 ЗАЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ..... | 116 |

| | |
|--|-----|
| 3.1 Условия и характеристики зажигания частиц древесины в потоке высокотемпературных газов..... | 116 |
| 3.2 Влияние формы частицы влажной древесной биомассы на характеристики ее воспламенения в высокотемпературной среде..... | 123 |
| 3.3 Влияние механизма пиролиза на прогностические характеристики процесса воспламенения частицы древесной биомассы..... | 131 |
| 3.4 Воспламенение частиц древесной биомассы в условиях приповерхностной фрагментации топливного слоя..... | 139 |
| Выводы по третьей главе..... | 152 |
| ГЛАВА 4 ЗАЖИГАНИЕ КАПЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЯ (ОРГАНО – ВОДОУГОЛЬНЫХ И БИО – ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ)..... | 155 |
| 4.1 Зажигание био – водоугольных топлив..... | 156 |
| 4.1.1 Математическое моделирование процессов зажигания капель био – водоугольного топлива на основе угля и типичных отходов деревообработки в условиях высокотемпературного нагрева..... | 156 |
| 4.1.2 Математическое моделирование зажигания частиц био – водоугольного топлива на основе угля и лесного горючего материала..... | 168 |
| 4.2 Зажигание органо – водоугольных (нефте – водоугольных) топлив..... | 180 |
| 4.2.1 Анализ основных закономерностей процесса воспламенения суспензионных органо-водоугольных топлив..... | 181 |
| 4.2.2 Математическая модель газофазного зажигания капли органо – водоугольного топлива..... | 188 |
| 4.2.3 Двумерная математическая модель для прогнозирования режимов физико – химических превращений при нагревании капель органо-водоугольных топлив..... | 201 |
| 4.2.4 Обоснование возможности переработки автомобильных шин в составе водоугольных композитов..... | 216 |
| Выводы по четвертой главе..... | 230 |
| ГЛАВА 5 ЗАЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ СУХИХ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ УГОЛЬ/БИОМАССЫ..... | 233 |
| 5.1 Воспламенение био – угольных смесей на основе угля и лесного горючего материала..... | 234 |

| | |
|---|-----|
| 5.2 Влияние расстояния между частицами древесины и угля на характеристики их совместного зажигания | 246 |
| Выводы по пятой главе | 257 |
| ГЛАВА 6 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К СЕКВЕСТИРОВАНИЮ ОКСИДОВ АЗОТА И СЕРЫ ПРИ ВОСПЛАМЕНЕНИИ ЧАСТИЦ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ | 259 |
| 6.1 Математическое моделирование термохимических процессов секвестрования оксидов серы при горении частиц смеси угля и древесины..... | 259 |
| 6.2 Математическое моделирование термохимических процессов секвестирования оксидов азота при горении частиц древесно – угольной смеси..... | 272 |
| 6.3 Математическое моделирование теплофизических и термохимических процессов, приводящих к секвестрованию оксидов азота при сжигании угольного и водоугольного топлив | 281 |
| Выводы по шестой главе | 289 |
| ГЛАВА 7 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА..... | 291 |
| Выводы по седьмой главе | 303 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 304 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 307 |
| Приложение А. Исходные данные для расчетов | 349 |
| Приложение Б. Вывод аналитического решения задачи зажигания частицы водоугольного топлива, покрытой водяной пленкой..... | 364 |
| Приложение В. Методы решения | 380 |
| Приложение Г. Условные обозначения..... | 386 |
| Приложение Д. Свидетельства о регистрации программ | 391 |
| Приложение Е. Справки и акты внедрения результатов диссертационной работы | 402 |

ВВЕДЕНИЕ

История развития человечества неразрывно связана с использованием угля. Его примитивная добыча велась в древних Китае и Греции, а виллы древнеримских патрициев отапливались им же [1]. Долгое время уголь использовался в основном для отопления домов и в кузнечном деле [2]. Новый толчок к увеличению потребления угля в качестве топлива дала промышленная революция, произошедшая в Европе в период XVIII – XIX веков [3,4]. Уголь являлся источником энергии для паровой машины и доменных печей, что позволило существенно увеличить объемы выпускаемой продукции (стали, чугуна, сукна и т.д.). Но главное – уголь остается второе столетие основным топливом для тепловых электрических станций [5], сталелитейных комбинатов [6] и коксохимических предприятий [7]. При этом анализ эконометрических прогностических моделей показывает [8], что до 2040 года доля угольного топлива в общем балансе тепло – и электрогенерации будет только возрастать и составит от 35 до 45%. Последнее связано с существенными преимуществами угля перед другими ископаемыми энергоносителями (нефть, природный газ).

Во – первых, стоит сказать, что после масштабной аварии на АЭС «Фукусима» по всему миру существенно сократилось финансирование программ по вводу новых атомных энергоблоков [9].

Во – вторых, не поддающаяся прогнозированию динамика ценообразования на нефтепродукты, обусловленная существенной ценовой [10, 11] турбулентностью на торговых площадках энергоносителей (таких как NYMEX), создает предпосылки для поиска альтернатив сырой нефти и продуктам ее переработки. Стоит отметить, что нефть, как правило сконцентрирована на ограниченных территориях [12, 13] планеты. Последнее способствует формированию на этих территориях гибридных петрократических режимов [14 – 16], использующих нефтяные ресурсы в качестве инструмента внутренней и внешней политики. Уголь же более равномерно распространён на планете и поэтому может стать одним из существенных стабилизирующих внешнеполитическую обстановку фактором и сгладить турбулентную динамику ценообразования на жидкие углеводороды.

Но экстенсивный рост потребления угля привел к существенному загрязнению атмосферы планеты антропогенными оксидами азота (NO_x [17 – 26]) и серы (SO_x [27 – 35]), а также диоксидом углерода CO_2 [36 – 40]. Последний (по мнению многих специалистов в области физики климата, например, [41 – 45]) является основным парниковым газом [46, 47] и ответственным за глобальное изменение климата [48 – 50]. Такая ситуация способствует разработке, развитию и внедрению в энергетику новых, так называемых «экологич-

ных» угольных технологий, позволяющих использовать угольное топливо с высокой эффективностью с минимальным экологическим негативным воздействием. К последним можно отнести сжигание угля в циркулирующем кипящем слое (ЦКС [51 – 57]), в высоко – [58 – 60] и низкотемпературном [61 – 63] вихре, сжигание угля в условиях плазменной [64 – 67] или микроволновой [68 – 71] подсветки факела. Однако стоит сказать, что вышеперечисленные технологические решения являются весьма дорогостоящими и требуют использования дорого и металлоемкого оборудования. Например, при применении технологии ЦКС котельная установка комплектуется высокотемпературным вихревым циклоном – сепаратором [72, 73]. Также при сжигании угля в циркулирующем кипящем слое необходимо применять высоконапорные и дутьевые вентиляторы с большой подачей воздуха [74, 75]. При применении плазменной или микроволновой подсветки существенно возрастают расходы электроэнергии для питания электродов плазматрона [76] или магнетрона [77] микроволнового излучателя. К последнему стоит добавить, что время бесперебойной работы плазматрона существенно ограничено (не более 4 000 часов [78]), вследствие эрозийного износа электродов. По этой причине основные финансовые и интеллектуальные ресурсы многих государств направлены на разработку новых структурно – неоднородных топливных композиций на основе угля разной степени метаморфизма. Как правило такие смесевые топлива представляют собой смеси угольного топлива с различными добавками, улучшающими экологические и энергетические характеристики процесс горения угля – главного компонента смеси.

К таким композиционным топливам можно отнести водоугольные (смеси мелко – диспергированного (с размером фракций ≈ 40 мкм) угля и воды) [79 – 92] и нефтеугольные (смесь угля и тяжелых углеводородов) [93 – 103] суспензионные топлива; сухие смеси уголь/биомасса [104 – 109]; био – водоугольные (смесь угля, биомассы и воды) [109 – 115]; органо – водоугольные суспензии (уголь/нефтепродукты – вода) [116 – 118].

Разработка новых композиционных топлив является сложной и достаточно трудоемкой задачей [119]. Проведение систематических экспериментальных исследований процессов горения смесевых топлив в условиях работы камер сгорания промышленных котельных установок при варьировании всех возможных комбинаций составов композиций (как по виду компонент, так и по их концентрациям), условиям теплообмена (по температуре внешней среды, скорости движения несущего газа), составу окислителя (обогащение дутьевого воздуха кислородом, парами воды или аммиака) на настоящее время просто не выполнимо в реальной практике. Последнее связано с невозможностью (по крайней мере на существу-

ющем уровне развития экспериментального оборудования) регистрации основных характеристик процессов зажигания и горения топливных композиций в условиях работы топочных устройств паровых и водогрейных котлов [120]. На настоящее время невозможно разместить средства высокоскоростной видеофиксации с высоким разрешением в экстремальных условиях (температура $1000 \leq T_g \leq 1500\text{K}$ [121, 122] и давление (в случае работы газотурбинных установок [123]) внешней среды $P_g \approx 3\text{МПа}$) камер сгорания тепло – и электрогенерирующего оборудования. При этом даже если это удастся, то регистрировать временные характеристики термической подготовки и воспламенения отдельных частиц топлива на фоне пламени факела также не представляется возможным вследствие засветки. По этой причине разработка математических моделей процесса горения структурно – неоднородных топливных смесей, обеспечивающих высокий уровень прогнозов основных характеристик этого процесса (время задержки зажигания, температура воспламенения), является наиболее приемлемым методом проведения исследований.

Стоит отметить, что современные и перспективные топливные композиции представляют собой существенно гетерогенные и неоднородные структуры, состоящие из множества компонент (как горючих, так и негорючих), находящиеся в разных фазовых состояниях (жидкость, твердое вещество, газ) [124]. Соответственно в период термической подготовки в частице топлива протекает процесс фазового перехода (испарение или плавление) жидкой компоненты топлива [125]. Последнее существенно усложняет проведение процедуры математического моделирования процессов горения таких топливных систем. Это связано с тем, что фазовый переход протекает с очень большим эндо – или экзотермическим (в зависимости от процесса [126]) тепловым эффектом в очень узкой, постоянно перемещающейся зоне (так называемом – фронте фазового перехода [127]). Скорость движения фронта зависит, как правило, от температуры его поверхности [128]. В этих условиях в топливной частице в период ее термической подготовки возникает несколько зон, разделенные фронтом фазового перехода, с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками [129]. Для решения такой задачи, как правило, используют балансные (или «нульмерные») математические модели [130]. Но их применение не гарантирует достоверность прогнозов временных характеристик процессов зажигания и горения с приемлемым коэффициентом значимости. При этом стоит отметить, что асимптотики процессов испарения и зажигания существенно отличаются. Испарение медленный процесс [130], зажигание – быстрый [131]. Последнее существенно усложняет разработку алгоритмов решения соответствующих задач зажигания.

Также необходимо добавить, что при термической подготовки смесового топлива к сжиганию всегда происходит термическое разложение основных его компонентов. Последнее сопровождается выделением газообразных (летучие) и твердых (кокс) продуктов пиролиза. Фильтрация паров жидкости и летучих сквозь пористую структуру топлива приводит к охлаждению каркаса и повышению внутриворного давления. Последнее может приводить к диспергированию основного слоя топлива. При этом вдув летучих во внешнюю газовую область приводит к турбулизации пограничного слоя и формирует в пристенной зоне высокорреакционную парогазовую смесь, которая воспламеняется при прогреве до критических температур и концентраций [132 – 134]. Выделяющиеся в результате термического разложения летучие состоят, как правило из нескольких горючих (самыми значимым являются: водород (H_2), метан (CH_4), окись углерода (CO), синильная кислота (HCN), сероводород (H_2S)) и негорючих компонентов (например, диоксид углерода (CO_2), водяные пары (H_2O)). Стоит сказать, что воспламенение каждого из этих компонентов – сложный физико – химический процесс протекающий, как правило в несколько последовательно – параллельных стадий. Например, кинетическая схема термохимического реагирования водорода с кислородом представляет собой группу из более чем 40 реакций [135]. Также стоит сказать, что выделившиеся в результате термического разложения негорючие компоненты летучих вступают в термохимическое реагирование с газообразными и твердыми продуктами пиролиза. В результате в малой окрестности топливных частиц и в их пористой структуре протекает очень сложный комплекс взаимосвязанных термохимических реакций, экспериментальное исследование которых просто невозможно. Поэтому математическое моделирование таких процессов является наиболее приемлемым вариантом прогнозирования основных характеристик процессов горения и зажигания капель и частиц существенно неоднородных композиционных топлив.

Стоит сказать, что разработка математических и физических моделей такого сложного комплекса физико – химических процессов, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений в период термической подготовки, и зажигания топлива является сложной и нерешенной до настоящего времени задачей. Скорее всего по этой причине до настоящего времени практически нет примеров задокументированных научных результатов с описанием единой физической теории и математической базы прогнозирования характеристик процессов зажигания и горения капель и частиц композиционных топлив в условиях, соответствующих камерам сгорания энергетического оборудования тепловых электрических станций и промышленных предприятий. Разработка та-

ких моделей позволит проводить прогностическое моделирование процессов горения сложных составных топливных композитов на основе угля и позволит существенно снизить затраты на разработку новых технологий сжигания. Последнее (в перспективе) создает предпосылки для создания фундаментальных основ производства новых высокоэффективных камер сгорания. Это в свою очередь приведет к созданию энергетически и экологически эффективного тепло – и электрогенерирующее оборудование и, соответственно, существенно снизит цену за единицу произведенной продукции (Руб./МВт) для конечного потребителя (металлургические предприятия, высокотехнологическое производство полупроводниковой техники, предприятия сферы услуг).

На основании анализа известных задокументированных теоретических результатов по зажиганию капель и частиц композиционных топлив можно сделать обоснованный вывод, что на сегодняшний день крупной проблемой науки о горении является не развитость основных элементов теории процессов тепло – и массопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений в период термической подготовки и зажигания. Представляется перспективным разработка нового (отличающегося от известных, детальным описанием теплофизических и термохимических процессов) подхода к моделированию процессов, протекающих при воспламенении капель и частиц композиционных топлив. Эта работа содержит результаты, существенно расширяющие современные представления о процессах воспламенения существенно неоднородных, многокомпонентных топливных композитов.

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

Экспериментальные исследования выполнены для большой группы топливных композитов: капля (на начальном этапе термической подготовки) – частицы (после подсушивания приповерхностного слоя топлива) водоугольной суспензии; аналогично, капля – частица систем уголь/биомасса – вода и уголь/нефтепродукты – вода; частицы смесового топлива уголь/биомасса; частица древесины. Экспериментальные исследования проведены на оборудовании, обеспечивающем низкий уровень систематической (не более 0,01%) и случайной погрешности (не более 13%).

Теоретические исследования в общем случае выполнены для двух систем: «частица топлива (водоугольного, био – водоугольного, органо – водоугольного, биомасса) – высокотемпературный окислитель»; «частиц угля – частица биомассы – окислитель».

Достижения сформулированной цели диссертации предполагает решение следующих фундаментальных задач:

1. Разработка физической теории процессов воспламенения и горения частиц существенно неоднородных и высокообводнённых топливных смесей на основе угля в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов ТЭС, отличающиеся от известных (например [135 – 137]) детальным описанием комплекса физико – химических и теплофизических процессов, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы, взаимодействие газообразных и твердых продуктов пиролиза между собой и с окислителем) превращений.
2. Разработка математического аппарата, детально описывающего процессы зажигания и горения частиц неоднородных композиционных топлив на основе угля, в условиях высокотемпературного радиационно – конвективного нагрева в рамках моделей механики сплошной среды, описывающих: радиационно – конвективно – кондуктивный теплоперенос, фильтрацию газообразных продуктов пиролиза и водяных паров сквозь пористую структуру топлива, фазовые переходы (испарение воды и жидкого горючего), термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы (в условиях сложноразветвлённой кинетики), диффузию летучих в малой окрестности топливных частиц, газофазное воспламенение парогазовой смеси (с учетом сложности кинетической схемы реагирования), гетерогенное окисление углерода кокса.
3. Адаптация методов численного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных с малым параметром у старшей производной к программной реализации на ЭВМ.
4. Разработка алгоритмов решения поставленных краевых существенно нелинейных задач.
5. Установление предельных условий инициирования горения структурно – неоднородных высокообводнённых топливных систем в условиях высокотемпературного радиационно – конвективного нагрева, а также выявление характерных режимов зажигания.
6. Проведение анализа влияния группы значимых факторов (температуры внешней среды; характерных размеров и формы частицы топлива; теплофизических и термохимиче-

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

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

Научная новизна основных положений работы:

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

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

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

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

– Впервые решена задача совместного зажигания частиц биомассы и угля в условиях интенсивного высокотемпературного нагрева. При постановке задачи учтены структурная неоднородность по пространству в системе «уголь – биомасса – высокотемпературный

окислитель»; фазовые переходы, протекающие при испарении влаги (как в частице угля, так и в частице древесины); термическое разложение обоих компонент топливной смеси; радиационный теплоперенос в газовой среде; термохимическое взаимодействие продуктов пиролиза (твердых и газообразных) с окислителем и между собой, с учетом существенно разветвлённой кинетической схемы реагирования. Показано, что в идентичных условиях нагрева частицы биомассы воспламеняются всегда быстрее (на 50%) угольных.

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

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

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

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

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

Практическая значимость. Разработанные математические модели и алгоритмы решения задач зажигания существенно структурно – неоднородных топливных композиций

на основе угля применимы при проведении опытно – конструкторских работ по разработке новых высокоэффективных и экологоперспективных котельных установок. Для проведения прогностического моделирования условий и характеристик зажигания существенно неоднородных топливных смесей разработаны программные коды для ЭВМ (получено 11 свидетельств (Приложение Г) о государственной регистрации программ). Также получено 2 акта о внедрении результатов научно-исследовательской деятельности на практике (Приложение Е).

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

Разработаны математические модели, описывающие процессы термической подготовки, воспламенения и горения структурно – неоднородных топливных композиций на базе угля, с учетом образования антропогенных оксидов, а также соответствующие алгоритмы решения существенно нелинейных сингулярно – возмущенных краевых задач.

Впервые установлены предельные режимы зажигания частиц композиционных топлив на основе угля. Теоретически проанализировано оказываемое на характеристики и условия зажигания влияние группы значимых факторов: характерный размер и форма частиц топлива, теплофизические и термохимические характеристики угля, фильтрационное охлаждение угольного каркаса, диспергация приповерхностного слоя топлива, радиационный теплоперенос, кинетическая схема термического разложения древесины, а также кинетика термохимического реагирования летучих с окислителем, приповерхностной пленки. По результатам численного моделирования обоснован механизм секвестирования оксидов серы и азота в период зажигания и горения частиц древесно – угольного топлива.

Методы исследования. При проведении процедуры моделирования процессов тепло – и массопереноса с учетом фазовых и термохимических превращений, а также интенсивного химического реагирования горючего с окислителем использован метод конечных разностей [138] решения дифференциальных уравнений в частных производных. Решение нелинейных задач проводилось с применением метода простой итерации [139]. Аппроксимация уравнений в частных производных с разрывными коэффициентами проводилась в соответствии с монотонной консервативной разностной схемой Самарского – Тихонова [140, 141] с использованием неявного четырехточечного разностного шаблона. Дискретизация многомерных уравнений математической физики проводилась в соответствии с изотропной локально – одномерной схемой Самарского [142] и схемой дробных шагов Яненко [143]. Решение уравнения переноса энергии излучения проводилось S_n – методом [144].

Необходимо отметить, что асимптотики процессов воспламенения и испарения существенно отличаются: испарение – медленно протекающий процесс; зажигание – быстрый процесс. При этом, так как скорость движения фронта фазового перехода (ФФП) существенно зависит от температуры его поверхности, то в многомерной постановке форма ФФП существенно нелинейная (форма ФФП не поддается полиномиальной аппроксимации) и зависит от распределения тепловых потоков внутри топливной частицы. Поэтому для решения задачи зажигания топлива в условиях продолжающегося испарения разработан специальный алгоритм на основе квази неявного выделения фронта испарения в сочетании с экономичной разностной схемой Самарского – Моисеенко [145].

Для решения задачи определения положения фронта фазового перехода было разработано два алгоритма: первый основан на методе накопления шага по времени; второй алгоритм базируется на основных элементах теории перколяции [146] в сочетании с численным методом Монте – Карло [141], кластеризация ячеек проводилась в соответствии с алгоритмом Хошена – Копельмана [148].

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

Для разработки приближенно – аналитического решения задачи зажигания применен разработанный профессором В.В. Саломатовым [149, 150] метод теплового квазистационарного приближения с выделением асимптотической оценки с использованием основных элементов теории операционного исчисления и преобразования Лапласа.

Экспериментальные исследования комплекса быстропротекающих физико – химических и теплофизических процессов выполнены с использованием высокоскоростных и

высокоточных средств видеофиксации, включающих в себя высокоскоростную монохроматическую камеру Photron FASTCAM SA4, программное обеспечение Photron FASTCAM Viewer (PFV).

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

1. Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): 16 – 38 – 00217 мол_a (*мой первый грант*) «Разработка основных элементов теории воспламенения новых эколого – и энергоэффективных топливных композиций на основе водоугольной суспензии»; 18 – 29 – 24099 мк «Обоснование по результатам экспериментальных и теоретических исследований эффективности сжигания отходов деревообрабатывающих производств в составе топливных смесей на основе угля и древесины»; 17 – 58 – 44020 Монг_a «Исследование и совершенствование технологии циркулирующего кипящего слоя для сжигания монгольских углей с целью повышения энергоэффективности и улучшения экологических показателей».
2. Российского научного фонда (РНФ): 15 – 19 – 10003 «Разработка основных элементов теории зажигания существенно неоднородных по структуре капель органоводоугольных топлив»; 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».
3. Совета по грантам Президента Российской Федерации: Грант президента для научных школ НШ – 7538.2016.8 «Физическое и математическое моделирование тепловых режимов объектов теплоснабжения, работающих при использовании систем лучистого отопления для локального нагрева рабочих зон в крупногабаритных производственных помещениях».
4. Государственных заданий: Гос. задания "Наука" проект № FSWW – 2020 – 0022. Гос. задания "Наука" проект № 8.13264.2018/8.9

Также диссертационная работа проводилась в рамках стратегического плана развития Национального исследовательского Томского политехнического университета как одного из ведущих университетов мира. Установленные в результате выполнения диссертационной работы теоретические следствия, а также разработанные алгоритмы решения задач термической подготовки, зажигания и горения топливных композитов используются в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке магистров техники и технологии по направлениям: «Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей», «Тепловые и атомные электрические станции», а

также кандидатов наук по специальностям: «01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника», «01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества», «01.04.07 – Физика конденсированного состояния», «05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика», «05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».

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

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

Представление изложенных в диссертационной работе и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами. В совместных разработках роль автора преобладающая.

Основные положения, выносимые на защиту:

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

мосвязанных процессов сопряженного радиационно–конвективно–кондуктивного теплопереноса, фазовых переходов (испарение воды и жидкого горючего), фильтрационного теплопереноса в пористой структуре топлива, диффузии газообразных продуктов пиролиза, смешанной конвекции парогазовой смеси в малой окрестности частицы топлива, газофазного и гетерогенного зажигания газообразных и твердых продуктов пиролиза (с учетом цепного характера термохимических реакций).

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

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

Эксперименты проводились на сертифицированном оборудовании, обеспечивающем низкий уровень систематической погрешности (не более 0,01%). Экспериментальные исследования процессов воспламенения проводились в идентичных условиях для каждого топлива. Обработка результатов экспериментов проводилась в соответствии с апробированными методами математической статистики [143 – 145].

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на XXXIII, XXXIV, XXXV и XXXVI Сибирском Теплофизическом Семинаре (Новосибирск, 2017, 2018, 2019, 2020); на IX и X Всероссийских конференциях с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015, 2018); на II и III Международных конференциях «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва 2019, 2020); на XV и XVI Минском международном форуме по тепло – массообмену (Минск 2016, 2020); на 9 – ом Международном семинаре по структуре пламени (Новосибирск, 2017); на II, III, IV Всероссийских научных конференциях «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2017, 2018, 2019); на V Минском международном коллоквиуме по физике ударных волн, горению и детонации (Минск, 2017); на The International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion and Atmospheric Phenomena (Sochi 2018); на 7 – ой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ – 7) (Москва, 2018); на XXII Школе – семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Москва, 2018); на Всероссийской научная конференция с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (Санкт – Петербург, 2019); на XV Всероссийском симпозиуме по горению и взрыву (Москва, 2020); на 21 – й Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам, (Алушта, 2019); на XXI Международной научной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2019); на VI Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2016); на XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXVI конференциях «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019); на III, IV и V Международных молодежных форумах «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2015, 2016, 2017); на XXI и XXII Российской научно – технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2016, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 70 работ (например [151 – 191]), в том числе 14 статей в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискании ученой степени доктора наук: Физика горения и взрыва (переводная версия Combustion, Explosion and Shock Waves) [178 – 182]; Теплофизика и Аэромеханика (переводная версия Thermophysics and Aeromechanics) [183 – 187]; Химия твердого топлива (переводная

версия Solid Fuel Chemistry) [188 – 190]; Теплоэнергетика (переводная версия Thermal Engineering) [191]; 11 свидетельств о регистрации программы для электронных вычислительных машин (Приложение Д); 26 статей в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и/или Web of Science (Combustion and Flame [151, 152]; Energy [153 – 156]; Fuel [157, 158]; Applied Thermal Engineering [159, 160]; Renewable Energy [161, 162]; Fuel Processing Technology [163]; Journal of Environmental Chemical Engineering [164]; Energy Reports [165]; Journal of the Energy Institute [166 – 170]; Energy & Fuels [171, 172]; Combustion Science and Technology [173 – 176]; Thermal Science and Engineering Progress [177]; 19 статей в прочих журналах, материалах всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. В состав текста диссертации входят введение, семь глав, заключение, шесть приложения и список литературы из 535 наименований; содержит 403 страницы, 186 рисунков, 33 таблицы.

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, сформулированы темы диссертации, цель и задачи исследования, практическая и теоретическая значимости, научная новизна результатов.

Первая глава отражает современное состояние теории и практики процессов термической подготовки, зажигания и горения существенно неоднородных и многофазных топливных композитов на основе угля: водоугольные, био– и органо–водоугольные а также древесно – угольные топлива. Проведен обширный анализ разработанных до настоящего времени математических моделей и результатов экспериментальных исследований процессов зажигания частиц композиционных топлив. Большой вклад в расширение данной области знания внесли: Делягин Г.Н., Бабий В.И., Саломатов В.В., Бурдуков А.П., Щинников П.А., Овчинников Ю.В., Кураев Ю.Ф., Ходаков Г.С., Мурко В.И., Сенчурова Ю.А. Стрижак П.А., Пинчук В.А., Agnieszka Kijo–Kleczkowska, Kook Young Ahn, Seung Wook Baek, Chang Tun Choi, FU Wei – Biao, Wei Jing – Bin, Han Hong – Qiao, Zhang Yan – Ping, Kolb T., Farmanyan W.F., Walsh P.M., J.M. Beer., Tavangar S., Hashemabadi S.H., Saberimoghadam A., Hu Ch., Yan Gong, Guo Q., Huang Z., Matthews K.J., Jones A.R. и др.

По результатам анализа опубликованных на настоящее время статей установлено отсутствие систематизированных знаний о теоретических подходах к изучению процессов воспламенения и горения частиц неоднородных и высокообводненных топливных композитов на основе угля с учетом совместного (другими словами одновременного) протекания комплекса теплофизических и термохимических процессов.

Во второй главе приведены результаты численного моделирования процессов тепло – и массопереноса, протекающих в период индукции частицы водоугольного топлива. Решена задача зажигания капли (в начальной стадии нагрева), а затем частицы (после подсушивания приповерхностного слоя) ВУТ в условиях, соответствующих (по температуре внешней среды) камерам сгорания котельных агрегатов ТЭС. В явном виде учтены существенно отличающиеся по своим асимптотикам процессы: испарение (медленный процесс) и окисление горючего (быстропротекающий). При моделировании принята многостадийная кинетическая схема реагирования основных компонентов летучих с окислителем. Выполнен анализ влияния основных значимых факторов на характеристики и условия воспламенения капель ВУТ: температура внешней среды; характерные размеры частицы топлива; тепло – отток через держатель (при проведении экспериментов); скорость обтекания частицы внешнем высокотемпературным потоком; толщина приповерхностной пленки воды; математическая модель свойств гетерогенной структуры водоугольной суспензии; радиационный теплоперенос в малой окрестности частицы топлива; диффузия продуктов пиролиза в пограничном слое топливной частицы; вид угля; фильтрационный теплоперенос в пористой структуре топлива. Установлены предельные режимы разрушения частиц ВУТ вследствие взаимодействия фильтрационных и термических напряжений.

Третья глава содержит основные результаты математического моделирования процессов зажигания частиц влажной древесной биомассы в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов ТЭС. Представлена самая подробная (на настоящее время) математическая модель воспламенения частицы древесной биомассы. Проанализирована группа факторов, влияющих на характеристики и условия зажигания: вид древесной биомассы; форма и характерные размеры частицы; диффузия смеси газообразных продуктов пиролиза основных компонентов биомассы в приповерхностной зоне частицы; диспергация приповерхностного слоя топлива; кинетическая схема пиролиза древесины. Показано, что приповерхностная фрагментация частицы биомассы существенно влияет на времена задержки зажигания. Увеличение площади тепло – и массообмена препроводит к существенному ускорению процесса воспламенения.

Четвертая глава посвящена описанию результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов зажигания и горения частиц многокомпонентных суспензионных топлив на основе угля: био – водоугольные композиции и органико – водоугольные топлива в условиях их высокотемпературного радиационно – конвективного нагрева. Приведены математические модели, учитывающие существенную пространственную неоднородность

родность частицы топлива, обусловленную испарением внутрипоровой воды и жидкого горючего (в случае зажигания частиц ОБУТ) в период термической подготовки. Учтены процессы совместного пиролиза органической части угля и основных компонентов биомассы. При постановке задачи зажигания принята цепная схема реагирования основных компонентов летучих с кислородом воздуха. Проанализировано влияние кинетической схемы гетерогенного реагирования углерода кокса с окислителем на прогностические характеристики математической модели. Показано, что при воспламенении частиц ОБУТ фронты испарения воды и жидкого горючего движутся с существенно отличающимися скоростями.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследования и математического моделирования процессов совместного воспламенения частиц угля и биомассы в высокотемпературной окислительной среде. Представлена самая подробная на сегодняшний день математическая модель процесса зажигания частиц смесового топлива древесина/уголь. Проанализированы характеристики воспламенения био – угольных смесей в зависимости от температуры внешней среды, степени метаморфизма угля. Установлены расстояния между частицами угля и древесины, при которых времена задержки зажигания последних минимальны.

Шестая глава посвящена теоретическому описанию процессов секвестрования оксидов серы и азота при воспламенении и горении частиц древесно – угольного смесового топлива по сравнению с горением однородного угля. Представлена математическая модель воспламенения и горения частиц угля и биомассы с учетом формирования в малой окрестности топливных частиц топлива антропогенных оксидов азота и серы. Приводятся доказательства, на основании результатов математического моделирования, гипотезы о существенной роли водяных паров в снижении концентрации SO_x и NO_x в продуктах сгорания древесно – угольных топлив.

В седьмой главе приведены результаты обоснования экономической эффективности сжигания водоугольного топлива по сравнению с однородным углем. Приведены результаты численного моделирования процесса теплопередачи от внутрикамерной среды к теплоносителю (вода или водяной пар). Показано, что несмотря на низкие (относительно горения сухого угля) температуры горения водоугольного топлива, последнее выгоднее по сравнению с однородным углем за счет низкой скорости шлакования поверхностей нагрева.

В заключении изложены основные результаты и выводы диссертационной работы.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЯ

1.1 Использование топливных композитов на основе угля в качестве топлива

ТЭС

Энерго – и экологоэффективное использование угольного топлива на тепловых электрических станциях и в тяжелом машиностроении является одним из приоритетных направлений развития национальных экономик большинства развитых государств (например, США, Китай, страны Европейского Союза). Анализ результатов прогностического эконометрического моделирования [192] показывает, что потребление угольного топлива в ближайшем и в отдаленном будущем (по крайней мере до 2040 года) будет только возрастать. Поэтому разработка новых инновационных технологических решений по экологичному и эффективному сжиганию угля является актуальнейшей задачей современности. Самой перспективной технологий на настоящее время является сжигание угля в виде смесевых топливных композитов.

Стоит сказать, что процессы сжигания и горения композиционных топлив является одним из основных направлений развития научной мысли в науке о горении на сегодняшний день. В настоящее время процессы горения различных топливных систем, как однородных (например, сухой уголь [193], биомасса [193, 194] и др.), так и существенно неоднородных (например, водоугольные [195 – 199], органо – водоугольные [200 – 203], био – водоугольные [204] и смесевые биомасса/уголь [205]) топлив, являются неотъемлемой частью производственных процессов во многих сферах современной промышленности. К последним относятся энергетическое [206] и транспортное [207] машиностроение, черная металлургия [208]. По этой причине достаточно объемные финансовые и интеллектуальные ресурсы многих государств направлены на разработку все новых высокоэффективных способов сжигания различных топлив. Если проводить библиографический анализ научных публикаций (на основе данных приведенных международных баз данных Scopus и Web of Science), то можно отметить, что только за последние 10 лет в международной научной периодике опубликовано более 100 000 статей с описанием результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов зажигания и горения конденсированных и газообразных топлив. Такое число публикаций указывает на два факта: во – первых, изучение

процессов горения топлив является актуальным направлением в современной научной парадигме; во – вторых, такое пристальное внимание к науке о горении топлив скорее всего обусловлено множеством не решенных до настоящего времени проблем в этой области знаний.

Поэтому большинство современных тепловых электрических станций стран Западной Европы [209] и Северной Америки [210], а также Китая [211] работают на угольном топливе. Однако при сжигании последнего в атмосферу выбрасывается много антропогенных оксидов азота (NO_x) и серы (SO_x), а также углекислого газа (CO_2), последний является парниковым газом [212]. Соответственно главной проблемой, на решение которой направлены усилия — это разработка новых эколого – (с низкими значениями концентрации SO_x , NO_x и CO_2 в продуктах горения) и энергоэффективных способов сжигания угольного топлива в камерах сгорания энергетического оборудования тепловых электрических станций. Как было указано выше самым перспективным направлением в развитии технологической мысли является технология сжигания угля в составе топливных композитов: водоугольное топливо, органо – и био – водоугольное топливо, древесно – угольные смеси.

1.2 Воспламенение капель водоугольного топлива

Первые попытки проведения систематических экспериментальных исследований по изучению процессов воспламенению суспензионных топлив на основе угля проводились еще в конце тридцатых и начале сороковых годов прошлого века [213, 214]. Но настоящий прорыв в исследованиях процессов зажигания и горения существенно неоднородных водоугольных композиций осуществлен сотрудниками Института горючих ископаемых АН СССР (ИГИ АН СССР) под руководством Г.Н. Делягина [215 – 217, 219 – 221].

По результатам экспериментов [215] установлены основные этапы термической подготовки и зажигания капель ВУТ, выполненных из углей различной степени метаморфизма. Так в [215] приведены результаты экспериментов по изучению процессов зажигания в неподвижной газовой окислительной среде (воздух) капель ВУТ, выполненных на основе углей марок Г, Д, ОС и А. Характерный размер капель варьировался в диапазоне от 1 до 3,5 мм. Доля влаги в ВУТ варьировалась в диапазоне от 0,45 до 0,8.

Установлено [215], что в период термической подготовки частицы водоугольного топлива в ее малой окрестности формируется сложная картина температурных полей, обусловленная комплексным воздействием процессов фазовых переходов и вдува водяных па-

ров в пограничный слой топливной частицы. Показано, что весь процесс термической подготовки можно условно разделить на три последовательных стадии [172]. На первом этапе, после ввода капли ВУТ в высокотемпературную среду начинается процесс испарения воды с поверхности топлива (по аналогии с [174]). В дальнейшем фронт испарения продвигается вглубь частицы, при этом (как показали данные осциллографа) температура частицы практически не меняется и соответствует предельной температуре (при давлении в камере $P = 1$ атм) фазового перехода $T_{\text{vap}} = 373\text{K}$. В тоже время температура газа вокруг частицы непрерывно снижается. В результате, как установлено [215], капля суспензионного топлива трансформируется в существенно неодородную и многофазную структуру, состоящую из жидкого (исходного) ядра и твердой высокопористой оболочки (угольного каркаса).

После прогрева приповерхностного сухого слоя угля начинается термическое разложение его органической части с выделением тепла и газообразных продуктов пиролиза. Вокруг частицы формируется парогазовая смесь, которая воспламеняется. На этом заканчивается вторая стадия термической подготовки.

В результате (это уже начинается третья стадия) зажигания летучих формируется сфера пламени, которая «обволакивает» частицу. Как утверждается [215, 216] весь комплекс процессов термоподготовки приводит к формированию коксового остатка с высокой пористостью. Последнее способствует существенному увеличению площади реагирования и, соответственно, значительному увеличению степени выгорания топлива.

Аналогичные результаты получены группой под руководством Бабия В.И. [218]. На экспериментальной установке [218], которая обеспечивает условия нагрева, соответствующих внутритопочному пространству типичных котельных агрегатов (высокотемпературный радиационно – конвективный нагрев). По результатам, проведенных экспериментов установлено, что весь процесс зажигания капель ВУТ состоит из взаимосвязанных этапов термической подготовки: нагрев капли, испарение внутрипоровой влаги топлива, термическое разложение органической части угля, газофазное воспламенение летучих в малой окрестности частицы, гетерогенное зажигание угля [180]. Авторами [218] установлены длительности характерных этапов термической подготовки и зажигания капель ВУТ. По результатам проведенных экспериментов выведены полиномиальные эмпирические зависимости времен испарения воды, задержки воспламенения и горения от температуры.

Можно отметить результаты исследований [219] по изучению процессов горения слоя водоугольной суспензии. Эксперименты проводились на установке, представляющей собой футерованный изнутри металлический стакан, который заполнялся водоугольной

суспензией. После этого инициировалось зажигание приповерхностного слоя топлива. Температура в слое контролировалась комплексом термопар. Показано, что при горении слоя ВУТ внутри пористой структуры последней протекает низкотемпературное окисления угля водяными парами. При этом, вследствие повышения давления, обусловленное фильтрацией водяных паров сквозь пористый каркас, температура испарения также возрастает.

Из зарубежных авторов можно отметить работы [222], проводимые в середине 80-х китайской академии наук по сжиганию высококонцентрированных водоугольных суспензий. Авторы [222] получили аналогичные Делягину [215 – 217] и Бабию [218] результаты. Весь процесс условно разделен на стадии термической подготовки: прогрев, испарение внутрипоровой влаги, термическое разложение, воспламенение. Установлено более низкая концентрация оксидов азота в продуктах сгорания ВУТ по сравнению с горением мазута. Установлены [210] предельные режимы зажигания капель топлива. По результатам экспериментов [210] показано, что при температурах внешней среды $T_g < 870\text{K}$ частицы топлива практически не воспламеняются.

Также большие достижения в результате экспериментальных исследованиях процессов зажигания и горения получены в институте теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН под руководством А.П. Бурдукова [223 – 226]. При этом инициирование горения частиц водоугольного топлива проводилось излучением углекислотного лазера (длина волны $\nu = 10,6$ мм; мощность $N = 25\text{Вт}$). Аналогично [215] установлено, что процесс зажигания капель водоугольного топлива состоит из ряда взаимосвязанных этапов, характеризующиеся доминированием одного из процессов термической подготовки. Фотоэлектрическим детектором установлены два этапа зажигания частицы ВУТ: сначала воспламеняются летучие, после этого (через некоторый промежуток времени) зажигается кокс.

Стоит сказать, что работы [215 – 226] посвящены, как правило, изучению процессов воспламенения и горения одиночных частиц водоугольного топлива. Поэтому можно отдельно выделить экспериментальные исследования процессов [227 – 231] горения группы (или потока) частиц водоугольных топлив. Первые такие эксперименты стали проводиться в ИГИ под руководством Делягина Г.Н. (например, [233]). Сжигание водоугольной суспензии приводилось в экспериментальной установке, представляющей собой теплоизолированный вертикальный цилиндр (диаметром $D = 0,154$ м и длиной $L = 2,250$ м), в полости которого распылялась водоугольная суспензия. Установлено, что водоугольное топливо может стабильно сжигаться в факельном режиме. При этом показано, что в топочном объеме формируется зона термической подготовки топлива характеризующаяся низкими (по отношению к внутрикамерному пространству) температурами топливо – воздушной смеси.

Показано, что избыток воздуха практически не оказывает значимого влияния на длину факела ВУТ.

Также можно выделить работы, проводимых в Центральном Электрогенерирующем центре Англии (Central Electricity Generating Board (CEGB)) [234, 235]. Исследовалось сжигание водоугольного топлива в топочном устройстве тепловой мощностью $N = 0.5$ МВт. Определены характеристики золоотложения при горении ВУТ, выполненных на основе углей различной степени метаморфизма [235].

В [236] приведены результаты сравнительного анализа сжигания бурого угля в виде водоугольного топлива и в пылевидном состоянии. Эксперименты проводились в камере сгорания тепловой мощностью $N = 316$ МДж/ч. По результатам проведенных экспериментов установлено, что органически связанный кальций играет существенную роль в образовании смешанных алюмосиликатов в период выгорания полукокса. Также можно отметить результаты [237] оценки влияния форм частиц сухого угля и водоугольных частиц на характеристики их сжигания. Эксперименты проводились в вышеописанной камере сгорания. Установлено, что форма частиц угля не оказывает существенного влияния на размер и форму золowego остатка. В тоже время показано, что для водоугольных капель размер и форма частиц угля, из которого было приготовлено ВУТ, оказывает достаточно значимое влияние на геометрическую конфигурацию золowego остатка.

Высокая степень выгорания углерода кокса при сжигании турецких углей различной степени метаморфизма в виде водоугольного топлива установлена в [238]. В [239] показано существенное снижение концентрации оксидов серы и азота в продуктах сгорания водоугольного топлива по сравнению с процессами горения сухого угля. Достаточно большие достижения в расширении теории воспламенения и горения частиц водоугольного топлива сделаны Российскими авторами (например [240 – 244]).

Как показано ранее [179], разработанные к настоящему времени математические модели зажигания капель ВУТ [248, 246] не позволяют в полной мере проводить прогностическое моделирование процессов воспламенения таких жидких (по существу) в исходном состоянии топлив. Математические модели зажигания, как правило, базируются на существенных допущениях. Так в [245] приведены математические модели, основанные на решении уравнений, при записи которых предполагалось, что температурное поле частицы однородно, а испарения протекает на поверхности частицы топлива. При этом критерием воспламенения в [245] являлось условие нагрева частицы до температуры воспламенения

известной из эксперимента. В [245] получены аналитические выражения для расчета характеристик и условий зажигания ВУТ. Но установлено [247], что применение таких моделей возможно только в случае сжигания частиц ультрамалой диспергаии ($\delta \leq 1 \cdot 10^{-4}$ м)

Разработанные же в [248, 137] существенно более сложные математические модели сформулированы при на допущении о дискретизации всего процесса термической подготовки на ряд последовательных и взаимосвязанных стадий (инертный нагрев, испарение воды, пиролиз топлива, зажигание углерода кокса). Но, не трудно догадаться, что в период индукции все теплофизические (нагрев капли по средствам радиации и конвекции, испарение воды) и термохимические (пиролиз угля, взаимодействие водяных паров и углерода) процессы протекают совместно. Поэтому применение моделей [237, 238] при прогнозировании процессов воспламенения капель ВУТ в условиях, соответствующих камерам сгорания недостаточно обосновано [179].

Авторы [181], особо отмечают математические модели [178, 182], которые наиболее подробно описывают физикохимические процессы, которые протекают в период термической подготовки частиц топлива. Модели [178, 182] представляет собой систему нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, в которой, учитываются основные теплофизические и термохимические процессы, протекающих совместно в индукционный период в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, воспламенение летучих) превращений. С использованием модели [178, 182] проанализировано влияние достаточно большой группы основных значимых при расчете времени задержки воспламенения факторов (например, условий теплообмена [185], формы частицы [182], гетерогенности пористой структуры топлива [151]) на условия и характеристики зажигания водоугольного топлива. При решении задач [178] предполагалось, что процесс зажигания летучих протекает непосредственно на поверхности топлива. При этом изменения во времени и в пространстве концентрации продуктов пиролиза в малой окрестности частицы не моделировалось. В то же время как известно из работ Д.А. Франк – Каменецкого [249] и Д.Б. Сполдинга [250] известно, что при зажигании твердых топлив основную роль в процессе инициирования горения горючих газов играет диффузия.

Онако, в тоже время (как показано авторами [181]) можно отметить постановку [251], которая описывает процесс воспламенения водоугольной частицы в малой окрестности над поверхностью. При этом учитываются: испарение воды, термическое разложение органической части угля, выход летучих, диффузия продуктов пиролиза во внешней газовой среде. Однако фазовый переход (парообразование) рассматривается в рамках гипотезы

о равновесности процесса. В то же время достаточно давно [252] установлено, что скорость испарения жидкости зависит от температуры фронта фазового перехода и концентрации паров у поверхности парообразования.

Отдельно можно отметить, математическую модель, описанную в [253], разработанные сотрудниками Новосибирского государственного университета под руководством профессоров Ю.В. Овчинниковом и П.А. Щинниковым. Математическая модель представляет собой комбинированную систему, состоящую из обыкновенных дифференциальных уравнений и аналитических зависимостей. Такой подход позволил разработать методику расчета основных конструктивных характеристик камер сгорания сжигающих водоугольные топлива.

Обобщая вышеизложенное можно сказать, что разработанные на настоящее математические модели основаны на допущении о незначительности влияния внешней аэродинамики топливной частицы на характеристики и условия ее воспламенения. Но известно [254], что в топочном пространстве капли топлива, движутся по средствам сил аэродинамического сопротивления от натекающего на них потока газовой среды. При этом вокруг частицы формируется сложный аэродинамический спектр [161]. При этом уже экспериментально установлено, что воспламенение газообразных продуктов пиролиза угля протекает, как правило, в аэродинамическом следе частицы [255]. Это обусловлено «сдувом» летучих в область аэродинамической тени капли ВУТ. На настоящее время теоретически не проанализировано влияние набегающего на частицу топлива потока окислителя на механизмы и условия ее воспламенения. Последнее обусловлено большими сложностями моделирования неравномерного прогрева капли топлива в условиях интенсивных фазовых превращений (испарение воды). Это обусловлено формированием в частице динамически изменяющейся и узкой (практически бесконечно тонкой) зоны с интенсивным сконцентрированным эндотермическим эффектом (фронт испарения). При этом геометрическая форма последнего может быть существенно нелинейной и зависеть от поля тепловых потоков внутри капли ВУТ. Механизмы и условия воспламенения частицы водоугольного топлива в таких условиях могут существенно отличаться от аналогичных характеристик при зажигании частиц в условно неподвижной среде.

1.3 Воспламенение частиц влажной древесной биомассы

Анализ мировой научной периодики, показывает, что биомасса в качестве топлива в последние годы начинает набирать все большую «популярность». Предлагается сжигать

биомассу как самостоятельное топливо (например [256]) так и в составе древесно – угольных смесей [257]. Это обусловлено рядом преимуществ биомассы по сравнению с традиционным углем. Как предполагает Джонсон [258] биомасса является относительно углеродо – нейтральным топливом. Также стоит сказать, что по результатам экспериментальных исследований [259] при совместном сжигании биомассы с углем существенно снижаются выбросов оксидов азота и серы по сравнению с однородным углем. При этом установлено, что при добавлении биомассы к углю происходит снижение концентрации CO_2 в продуктах сгорания. По этим причинам на настоящее время внедрение биомассы в баланс тепло – электрогенерации является все усиливающимся трендом развития современной энергетики в мире. Например, на сегодняшний день в странах Европейского союза на более чем 100 электрических станциях проведены попытки совместного с углем или самостоятельного сжигания биомассы в топочных устройствах паровых котлов [260]. Но при этом, полноценное энергетическое использование биомассы внедрено только на четырех ТЭС. Последнее связано с рядом объективных и субъективных причин. К последним относятся сложности в организации топливоподачи двух разных видов топлив (угля и древесины) с заданными (по условиям технологии сжигания) соотношениями к камерам сгорания котельных агрегатов. К объективным относятся причины, связанные с недостаточной изученностью процессов тепло – и массопереноса, протекающих при зажигании и горении частиц смеси двух разных, существенно – отличающихся топлив. Последнее косвенно подтверждается большим числом публикаций (за последние 10 лет опубликовано около 10 000 статей) в ведущих мировых изданиях научной периодики (например [261]), в том числе и в журналах уровня Nature [262], посвященных проблемам энергетики и науки о сжигании топлив.

Так в [263] опубликованы результаты сжигания биомассы в слоевой топке в условиях обогащения дутьевого воздуха кислородом (концентрация $Y_{\text{O}_2} = 20, 30, 40, 60, 80, 100\%$). По результатам экспериментов установлены скорости потери массы древесных образцов при их горении в высокотемпературных условиях нагрева при различных концентрациях окислителя. Показано, что с увеличением концентрации кислорода в дутьевом воздухе температурный режим горения смещается в область более низких температур окислителя ($800 < T_g < 1000\text{K}$).

В [264] приведены результаты экспериментальных исследования процессов горения отдельных частиц биомассы при нагреве последних электрическим проволочным нагревателем сопротивления. По результатам выполненных экспериментов установлено, что влаж-

ность биомассы оказывает существенное влияние на характеристики воспламенения древесины (даже при ее кондуктивном нагреве). Увеличение влагосодержания в топливе приводит к затягиванию всех этапов термической подготовки.

Также можно отметить работу [265]. В последней приведены результаты экспериментов по зажиганию и горению топливных брикетов из биомассы. Показано, что при горении брикетов концентрация диоксида углерода, кислорода и окиси углерода в продуктах сгорания меняется стохастически. Последнее скорее всего обусловлено турбулентными пульсациями окислителя.

В [266, 267] приведены результаты экспериментального исследования процессов горения древесной биомассы в неподвижном слое. Авторами [266, 267] установлены типичные значения концентраций диоксида углерода в продуктах сгорания биомассы. Исследован состав минеральной части золы остатка. Установлено высокое содержание оксидов кремния и кальция. Показано, что введение в активную зону горения вторичного дутья приводит к существенному повышению эффективности сгорания (степень окисления углерода кокса 95 – 96%).

Результаты экспериментальных исследований горения одиночных частиц биомассы приведены в [268, 269]. Установлены времена задержки зажигания в зависимости от размеров частиц и влагосодержания древесины. По результатам экспериментов установлены времена горения летучих древесины, а также гетерогенного горения полукокса. При этом аналогично [264] установлено, что увеличение влажности древесины приводит к существенному затягиванию всех процессов термической подготовки, зажигания и горения частиц древесины. Проанализировано [268] влияние формы частиц древесины на характеристики и условия воспламенения. По результатам проведенных исследований разработана прогностическая модель, основанная на системе балансных «нульмерных» уравнений теплопроводности.

В [270] приведены результаты экспериментов по зажиганию биомассы на основе соломы в условиях высокотемпературного нагрева. Исследовалось зажигание брикетов биомассы в виде цилиндров (диаметром $D = 20$ мм и длиной $L = 120$ мм). Температура на оси цилиндра измерялась термопарой. Установлены концентрации окиси углерода и диоксида углерода в период горения биомассы. Показано, что при зажигании биомассы в брикете формируется сложный спектр температурных полей, обусловленных интенсивным термическим взаимодействием углерода кокса с окислителем.

Обширные экспериментальные исследования по изучению процессов воспламенения и горения частиц древесной биомассы выполнены в Бостонском Северо – восточном

университете под руководством Левиндеса Я.А. [271, 272]. Исследовано зажигание частиц биомассы в условиях высокотемпературного радиационно – конвективного нагрева топливных частиц. Исследовалось зажигание большой группы видов биомассы: оливковый и тростниковый жмых, сосновые опилки. Установлено, что зажигание топливных частиц протекает, как правило, в несколько стадий: на первом этапе происходит нагрев, после этого термическое разложение с выделением летучих, газофазное зажигание, горение газообразных продуктов пиролиза, зажигание и горение кокса.

По результатам [271, 272] установлено существенное влияние концентрации кислорода в окислителе на характеристики и условия зажигания. Показано [271], что во всем исследуемом диапазоне температур ($900 \leq T_g \leq 1400\text{K}$) зажигание происходит в два этапа: на первой стадии происходит газофазное воспламенение древесины, за тем зажигается кокс.

В [273] приведены результаты экспериментального исследования влияния состава древесины (соотношения компонентов в системе целлюлоза/гемицеллюлоза/лигнин) на устойчивость воспламенения частиц биомассы. Установлена существенное влияние содержания целлюлозы в биомассе температуры горения топлива. Показано [273], что скорость прогрева существенно зависит от концентрации лигнина.

Достаточно большие достижения в развитии теории горения частиц древесной биомассы сделаны в [274]. В [274] приведены полученные по результатам экспериментов времена задержки воспламенения цилиндрических пеллет (диаметром $d = 9 \text{ mm}$ и длиной $h = 10 \text{ mm}$), выполненных из двух видов биомассы: рисовой шелухи и коры сосны. Установлены времена задержки зажигания в различных условиях теплообмена. Проанализировано влияние концентрации кислорода на интегральные характеристики зажигания пеллет. В [275] приведены экспериментально установлена минимальная температура воспламенения частиц древесной биомассы. Эксперименты проводились в цилиндрической горелке Маккена.

Приведенный выше анализ показывает, что несмотря на обширные исследования, приведённые учеными в разных странах мира по исследованию процессов зажигания и горения частиц древесной биомассы, на настоящее время не исследовано влияние достаточно большой группы факторов: влажность частиц биомассы; диффузия продуктов пиролиза в пристенной области частицы; диспергация приповерхностного слоя древесной биомассы и др. В связи с вышесказанным, совокупность новых теоретических и экспериментальных следствий процессов зажигания частиц древесной биомассы, приведенных в данной диссертационной работе, позволяет замкнуть физическую и математическую теории процессов воспламенения частиц влажной биомассы.

1.4 Воспламенение частиц древесно – угольных топливных смесей

На настоящее время уже становится очевидным, что будущее топливной энергетики жидется на широкомасштабные замены однородного угольного топлива на эколого – и энергоэффективные топливные смеси. Самыми перспективными (на настоящее время) являются топливные смеси уголь/биомасса. Последнее обусловлено рядом несомненных преимуществ таких смесей по сравнению с однородным углем. Так по результатам экспериментов [259] установлено, что при сжигании угля совместно с биомассой (мелко диспергированная рисовая или кукурузная шелуха) существенно снижаются концентрации оксидов азота (NO_x) и серы (SO_x) в продуктах сгорания по сравнению с однородным углем. При этом в [259] показано, что тепловая эффективность котельного агрегата, сжигающего смесевое топливо, не снижается, а в некоторых случаях даже увеличивается.

Одним из существенных преимуществ древесно – угольных смесей является возможность переоборудования (с относительно небольшими финансовыми затратами) существующих пылеугольных котельных агрегатов на сжигание древесно – угольных смесей. В [276] приведены результаты совместного сжигания пиролизированной биомассы (опилки на основе хвойной древесины) и каменного угля (Колумбийский угольный бассейн) в камере сгорания котельного агрегата мощностью 1 МВт. Установлено, что при добавлении биомассы к углю существенно снижается температура во внутритопочном пространстве. Последнее приводит к увеличению механического недожога угля. При этом установлены повышение концентрации окиси углерода в продуктах сгорания топлива.

В [277] приведены результаты исследования сжигания биомассы совместно с углем в псевдосжиженном кипящем слое. При этом дутье камеры сгорания [277] дополнительно обогащалось кислородом. По результатам экспериментов установлено, что совместное сжигание угля и биомассы в условиях кислородного дутья является перспективным и эффективным способом снижения антропогенного воздействия тепловых электрических станций на окружающую среду.

Авторами [278] проведены экспериментальные исследования воспламенения и горения частиц измельченной кукурузной соломы и рисовой шелухи. По результатам экспериментов определены оптимальные (по условиям совместного сжигания с углем) степени диспергирования каждого из исследовавшихся видов биомассы. Также в [278] установлены времена задержки воспламенения и времена горения полидисперсного потока частиц биомассы. При этом в [278] установлено значения t_{ign} только отдельных (не в потоке древесно – угольной смеси) частиц биомассы и угля. В то же время, очевидно, что в период нагрева

частиц топливной смеси (другими словами при совместном сжигании) происходит одновременное термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы, при этом возможно термохимическое взаимодействие твердых и газообразных продуктов пиролиза обоих компонент топливной смеси между собой. По этой причине результаты [278] не полностью описывают воспламенение древесного угля. Соответственно, применение результатов [278] на практике при разработке методик и отраслевых стандартов расчета конструктивных характеристик топочных пространств котельных агрегатов невозможно.

Целью работ [279] было сравнение временных характеристик основных стадий термической подготовки и зажигания (инертный нагрев, пиролиз и зажигание) частиц угля и биомассы. Установлены времена задержки воспламенения частиц угля и биомассы. Совместное воспламенение частиц этих двух топлив в одной камере сгорания в [279] не исследовалось.

В [280] представлены результаты экспериментальных исследований воспламенения угольных частиц и сельскохозяйственных отходов (стеблей кукурузы) в условиях нагрева в кислородно – азотной и кислород – пароводяной среде. По результатам экспериментов установлены времена задержки воспламенения отдельных частиц угля и диспергированных стеблей кукурузы. Показано, что уголь, как правило, воспламеняется примерно на 30% быстрее, чем биомасса. В работе [280] также установлено, что в среде кислород – водяной пар процессы окисления протекают более интенсивно, чем в среде кислород – азот (воздух). Авторы [280] делают вывод, что это связано с термохимической реакцией взаимодействия углерода с водяным паром и, соответственно, образованием горючих продуктов реакции ($C+H_2O = CO+H_2$). Показано, что концентрация кислорода (Y_{O_2}) оказывает значимое влияние на скорость воспламенения частиц топлива. При этом установлено, что температура горения при уменьшении Y_{O_2} также существенно снижается.

Стоит сказать, что в [280] представлены результаты исследований процессов воспламенения только отдельных частиц топлива (угля или биомассы). В тоже время очевидно, что на практике процессы воспламенения древесно – угольных смесевых топлив происходят в условиях взаимодействия (термохимического, кинетического, теплового) компонент топливной смеси между собой. Соответственно, применять результаты [280] при проведении опытно – конструкторских работ по проектированию топочных устройств необходимо с осторожностью.

В работах [281], приведены результаты анализа концентраций диоксида углерода, оксида азота, диоксида углерода и хлористого водорода, образующегося при сгорании топливных смесей на основе рисовой соломы и угля с высоким содержанием серы. Установлено [281], что при совместном сжигании биомассы с углем содержание углекислого газа в продуктах сгорания значительно снижается (по сравнению с окислением гомогенного угля). Такая же закономерность была установлена при анализе выбросов оксидов азота и серы. Следует отметить, что в [281] времена задержки зажигания не определялись.

В [282] представлены результаты экспериментальных исследований процесса совместного сжигания угольного шлама с мелкоизмельченной соломой в виде пеллет в модельном котельном агрегате. По результатам экспериментов [282] установлены характерные скорости изменения массы древесно – угольных пеллет в период их термической подготовки и горения. Также в [282] установлены характерные скорости горения отдельных компонент топливной смеси. Стоит сказать, что авторы [282] не определяли значения времен задержки зажигания. Но в настоящее время, использование топливных гранул ограничено только малой энергетикой (электростанции не более 1 МВт) [282].

Авторами [283] представлены результаты экспериментальных исследований сжигания целлюлозы, гемицеллюлоза и лигнина на основе отходов лесопиления и бытовых отходов (бумаги). По результатам проведенных экспериментов установлены температуры воспламенения трех компонентов биомассы. Показано, что температура воспламенения соломы пшеницы составляет 523 К. Методом Коутса – Редферда [284] получены кинетические характеристики процесса воспламенения.

В [285, 286] приведены результаты экспериментальных исследований процессов сжигания древесно – угольного топлива в псевдосжиженном слое, в среде окислителя (воздуха, обогащенного кислородом). Проанализировано влияние концентрации кислорода на характеристики горения древесно – угольной смеси. Показано, что состав окислителя оказывает существенно влияние на температурный профиль слоя топлива. Обогащение окислителя кислородом ($O_2 > 25\%$) приводит к существенному снижению концентрации монооксида углерода в продуктах горения топлива. Также показано, что сжигание древесно – угольного топлива в обогащенном кислородом окислителе с высоким содержанием O_2 ($\approx 32\%$) существенно снижаются выбросы оксидов азота. Стоит сказать, что в [285, 286] приведены результаты анализа горения топливных смесей, при этом начальная стадия горения в [285, 286] не рассматривается.

В [287] приведены результаты химического анализ золового остатка, образующееся при совместном сжигании бурого угля и биомассы (соломы или сои). Анализ золы показал,

что сжигание угля совместно с биомассой привело к значительному изменению морфологии золы. Существенно увеличилась адгезионность золового остатка древесно – угольного топлива по сравнению с твердыми продуктами горения однородного угля. Показано, что при совместном сжигании угля и биомассы существенно снижается механический недожог топлива. Но в [286] не анализировались процессы тепло – и массопереноса, протекающие при зажигании.

В [288] приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов совместного сжигания угля и биомассы в слое в модельной камере сгорания мощностью 1 МВт. Установлено незначительное изменение степени выгорания кокса топливных частиц при сжигании однородного угля и древесно – угольной смеси. Автором разработана математическая модель горения слоя частиц и угля, описывающая процессы горения с учетом фильтрации воздуха сквозь пористую структуру слоя древесно – угольной смеси. Показано существенное влияние конструктивных характеристик камеры сгорания на выгорание коксовых (как угля, так и биомассы) частиц. Однако в [288], в основном, рассматривались только процессы горения смеси угля и биомассы. Результатов исследований зажигания частиц древесно – угольного топлива в [288] нет. Результаты численного моделирования процесса совместного сжигания угля и биомассы в кипящем слое приведены в [289]. Решена [289] сложная существенно нелинейная задача математической физики. Достаточно подробно описана кинетическая схема образования оксидов азота, при этом принята простая кинетическая схема процесса горения газообразных продуктов пиролиза (метан – CH_4 ; водород – H_2 ; окись углерода – CO) с брутто реакциями. Стоит сказать, что динамика воспламенения отдельных частиц древесины и угля не изучена.

В [290] приведены результаты компьютерного моделирования процесса воспламенения и горения смесей угля и биомассы в модельном котельном агрегате мощностью 550 МВт. Показано, что при добавлении биомассы к углю температура факела снижается. По результатам теоретических исследований [290] установлено, что увеличение концентрации биомассы в топливной смеси приводит к росту числа несгоревших частиц углерода в продуктах сгорания. В [290] не изучены процессы горения, протекающие на начальной стадии термической подготовки.

Определение кинетических характеристик процессов окисления топливных частиц смесевых топлив древесина/уголь – одна из наиболее актуальных задач на настоящее время. Последнее обусловлено существенно отличающимися скоростями термических реакций пиролиза (термическое разложение целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина древе-

сины и органической части угля) компонент топливной смеси в период термической подготовки и воспламенения. По этой причине определение эффективной кинетики процессов воспламенения частиц угольного топлива является актуальной и нерешенной задачей.

Можно отметить результаты теоретических исследований [291] кинетических характеристик процессов горения смеси угля и биомассы. Установлены [291] значения энергии активации (E_{com}) и предэкспоненты (k_{com}) реакции горения древесно – угольных смесей. В [291] показано, что значения E_{com} и k_{com} смеси существенно отличаются от ожидаемых средневзвешенных значений от каждого элемента смеси.

Также можно выделить работу [292], авторы которой установили, что при соотношении в системе уголь/древесина 90/10 кинетические характеристики воспламенения смешанного топлива соответствуют характеристикам воспламенения однородного угля. При воспламенении частиц такого смешанного топлива не было обнаружено заметного взаимодействия между частицами угля и биомассы.

1.5 Воспламенение частиц био – водоугольных и органоводоугольных топлив

Как известно, зажигание типичных частиц ($d \approx 3 - 4$ мм) водоугольных топлив протекает, как правило, при достаточно больших (от 5 до 30 секунд) значениях периода индукции. Последнее создает предпосылки разработки методов повышения реакционной способности (снижения времени задержки зажигания) топлива. На настоящее время есть два главных направления решения этой проблемы: первый – разработка новых высокоэффективных способов топливосжигания (например, в режиме детонации [293, 294], при микроволновой [295] или плазменной [296] подсветке факела); второй способ – внедрение в состав водоугольных топлив, ускоряющих процесс зажигания и горения высокореакционных добавок (биомасса, нефть или продукты ее переработки). Это уже не просто водоугольная суспензия, а многокомпонентный топливный композит: для смеси уголь/биомасса/вода – био – водоугольное топливо; для смесей уголь/вода/нефть (или продукты перегонки нефти) – органоводоугольное (или нефть – водоугольное) топливо. Разработка математической базы прогнозирования процессов воспламенения таких многокомпонентных и существенно неоднородных топлив является одной из главных нерешенных проблем современной топливной энергетики.

К настоящему времени опубликовано немного работ посвященных изучению процессов зажигания капель (в начальный период времени процесса термической подготовки), а затем (после высушивания приповерхностного слоя топлива) частиц био – водоугольного

топлива. В основном современные научные публикации (например, [297 – 299]) посвящены изучению реологических свойств Био – ВУТ. В тоже время процессы тепло – и массопереноса, протекающие совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение внутриводородной и адсорбционно – связанной влаги) и термодимических (термическое разложение органической частиц угля и древесины, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, газозавное воспламенение продуктов пиролиза) превращений практически не исследованы. Можно отметить работу [300], в которой приведены результаты экспериментального изучения влияния добавления древесной пыли на характеристики и условия зажигания капель органоводородных топлив. Однако стоит отметить, что теоретических исследований (разработка математической модели процессов воспламенения, и решение соответствующих задач) в [300] проведено не было. Также, можно отметить достаточно большие (до $\approx 40\%$) значения доверительных интервалов (погрешностей) результатов экспериментов по определению времен задержки воспламенения.

Стоит отметить, что на настоящее время в мировой научной периодике нет примеров описания результатов экспериментальных исследований физико – химических процессов, протекающих при газозавном и гетерогенном зажигании частиц био – водородного топлива в условиях высокотемпературного нагрева. Недостаточная информация о процессах воспламенения капель Био – ВУТ обусловлена, скорее всего, сложными механизмами процесса зажигания и влиянием группы значимых факторов (вид древесины и угля, влажность, форма частицы и др.) на динамику воспламенения одиночных древесных частиц. Системные экспериментальные исследования зажигания таких топлив является сложными и на их проведение необходимы большие материальные и временные ресурсы. По этой причине на настоящее время нет разработанной общей теории термической подготовки, воспламенения и горения частиц био – водородного топлива.

Другая ситуация наблюдается при изучении процессов воспламенения частиц органоводородных топлив. Большие достижения в развитии теории воспламенения частиц органоводородных топлив сделаны группой авторов (например [301 – 303]) в Томском политехническом университете. Экспериментально [301 – 303] установлены интегральные характеристики процессов воспламенения. Однако при этом стоит сказать, что до настоящего времени нет примеров статей с описанием математических моделей процессов тепло и массопереноса, протекающих совместно при воспламенении и горении капель (в начальной стадии нагрева), а затем частиц (после подсыхания приповерхностного слоя топлива) органоводородных топлив в условиях, соответствующих камерам сгорания типичных ко-

тельных агрегатов ТЭС. По этой причине разработка математической базы процессов воспламенения капель ОБУТ является актуальной и нерешенной задачей современной энергетики.

Выводы по первой главе

1. Проведенный анализ показал, что в настоящее время в теории горения многокомпонентных структурно – неоднородных водоугольных топлив в основном распространены балансные (или «нульмерные») модели воспламенения частиц ВУТ. Разработанные же более сложные математические модели базируются на ряде существенно упрощающих процедуру моделирования допущениях таких как: дискретизация всего процесса зажигания по времени и пространству; выделение одного доминирующего (над остальными) процесса; решение задачи влагоудаления в рамках гипотезы о равновесности основных термодинамических параметров на границе раздела фаз (фронт испарения); использование в качестве критерия зажигания прогрев поверхности топливной частицы до экспериментально установленной «некой» температуры зажигания.

2. На настоящее время практически не разработаны математические модели, описывающие процессы тепло – и массопереноса, протекающие при воспламенении частиц влажной древесной биомассы. Принятые подходы к моделированию, как правило, базируются на допущениях о равномерном (с нулевым градиентом) распределении температуры в топливных частицах. При этом разработанные математические модели, в основном описывают зажигание сухих частиц древесной биомассы. Теоретическое описание зажигание влажной древесины изучено слабо.

3. На настоящее время не разработано математического аппарата, описывающего процессы весь комплекс процессов тепло – и массопереноса, протекающих в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений в период термической подготовки и зажигания существенно неоднородных многокомпонентных топливных композиций (био – водоугольного и органо – водоугольное топливо).

4. Актуальной проблемой современной энергетики является отсутствие описанных в изданиях мировой научной периодике результатов систематических экспериментальных исследований интегральных характеристик процессов совместного зажигания частиц мелко диспергированного смесового топлива на основе угля и древесной биомассы. Не разрабо-

тано фундаментальной базы обоснования использования в энергетических установках биотоплива на основе типичных отходов лесопиления и жизнедеятельности леса (лесной горючий материал).

5. Анализ результатов, приведенных в мировой научной периодике показал, что на настоящее время отсутствуют математические модели, описывающие теплофизические и физико – химические процессы, протекающие в структуре и малой окрестности топливных частиц в период термической подготовки и зажигания смесевых древесно – угольных топлив.

6. Представляет интерес вопрос фундаментального обоснования (по результатам моделирования процесса теплопередачи от внутритопочной среды к теплоносителю с учетом процесса шлакования труб конвективно – радиационных поверхностей нагрева) экономических преимуществ использования водоугольного топлива в качестве базового для энергетических котельных агрегатов по сравнению с однородным углем.

ГЛАВА 2 ЗАЖИГАНИЕ КАПЕЛЬ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ КАМЕРАМ СГОРАНИЯ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Анализ современной мировой экономической и социально – политической конъюнктуры [304] показывает, что вопрос о эффективной и экологически «чистой» энергетике для жителей современных мегаполисов и городских агломераций стоит достаточно остро. Попытки масштабного внедрения возобновляемых источников энергии не дало желаемых результатов – ВИЭ так и не стали базой производства тепловой и электрической энергии (в необходимых для потребителя объемах [305, 306]). Последнее создает предпосылки для разработки и внедрения в энергетический сектор новых экологически перспективных и энергоэффективных топливных композиций. Такие топливные структуры как правило основаны на угольном топливе с добавлением улучшающих энергетические и экологические характеристики горения присадок. В качестве последних выступают как правило биомасса [307] (древесно – угольные смесевые топлива); вода – водоугольная суспензия [308]; горючие жидкости [309] – нефте – угольные топлива; сложносоставные топливные композиции, например, био – водоугольные (смесь угля, биомассы и воды [110]) и органо – водоугольные [111].

Стоит сказать, что разработка таких топливных композиций и анализ возможности их использования в энергетике проводится, как правило, на основании экспериментальных исследований (например [312]). Но стоит сказать, что проведение систематических экспериментальных исследований всех возможных вариантов компоновок топливных смесей с учетом всех возможных конфигураций (по составу, массовому соотношению компонентов топлива, условий теплообмена и т.д.) на настоящее время является очень сложной (можно сказать практически невыполнимой) задачей. Следует отметить, что ранее предпринимались попытки разработки общей физической теории и обеспечивающей ее математической базы процессов воспламенения и горения существенно неоднородных капель (в начальный период времени), а затем частиц (после подсушивания приповерхностного слоя топлива) водоугольного топлива. Однако стоит сказать, что разработанные к настоящему времени физические и математические модели, как правило, базируются на существенно упрощающих процедуру моделирования допущениях. В то же время необходимо отметить, что разработка математической модели процессов воспламенения и горения частиц ВУТ является важным этапом в построении общей теории работы внутритопочного пространства сжигающих ВУТ котельных агрегатов, которая должна стать основой при проведении опытно – конструкторских работ по разработке топочных устройств, работающих на водоугольном

топливе. По этой причине основной целью работы в рамках этой главы являлось математическое описание процесса воспламенения капли (в начальный период нагрева топлива), а затем частицы (после подсушивания приповерхностного слоя ВУТ) водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов (высокотемпературный радиационно – конвективный нагрев).

2.1 Зажигание частицы водоугольного топлива в условиях интенсивного радиационно – конвективного нагрева

К настоящему времени разработано много подходов к моделированию зажигания частиц водоугольного топлива (например [313]). Но их применение на практике не всегда обосновано. Последнее обусловлено тем, что период термической подготовки к зажиганию включает в себя процесс испарения внутрипоровой воды. При этом стоит сказать, что асимптотики процессов влагоудаления и зажигания существенно отличаются (испарение – продолжительный процесс; зажигание – короткий), поэтому как правило при моделировании воспламенения частицы ВУТ принимается, что весь процесс термической подготовки условно разделяется на ряд последовательных стадий: инертный нагрев, испарение воды, термическое разложение органической части угля и выход летучих, газофазное воспламенение, зажигание кокса. Но, очевидно, что все вышеперечисленные процессы протекают совместно (другими словами одновременно) и применение моделей [313] может привести к значительным погрешностям в вычислении времен задержки воспламенения. С целью разработки математической модели процесса зажигания капель водоугольного топлива на первом этапе проведены эксперименты по зажиганию топлива в реакционной трубе.

В экспериментах использовался приведённый на Рисунке 2.1.1 экспериментальный стенд, аналогичный по основным средствам регистрации [173]. Воздух нагревался в теплогенераторе до температуры 873К и нагнетался в полый прозрачный цилиндр. Температура воздуха T_g контролировалась комплексом хромель – алюмелевых термопар (диапазон измерения температур 273 ÷ 1373 К). Процессы термической подготовки и зажигания ВУТ регистрировались высокоскоростной видеокамерой Phantom Miro M310 5 (скорость видеосъёмки составляет до 10 000 кадров/сек) [173]. Частица водоугольного топлива крепилась на игольчатой термопаре и помещалась при помощи координатного устройства на оси симметрии цилиндра. Размеры частиц варьировались в диапазоне $0.5 < \delta < 3$ мм. Систематическая погрешность определения основных измеряемых параметров (температура внешней среды – T_g ; время задержки воспламенения – t_{ign}) составляла не более 5 %. Обработка

результатов эксперимента проводилась в соответствии с методикой статистической проверки гипотез по параметрическому критерию Стьюдента [314]. Доверительный интервал значений времен задержки воспламенения Δt_{ign} при доверительной вероятности $P = 0,95$ составлял не более 0,6 секунды, относительная погрешность измерений $\delta(t_{\text{ign}}) \leq 9,5\%$. Исследования проведены для частиц ВУТ, выполненных из каменного (Кузнецкий угольный бассейн) и бурого (Канско – Ачинский угольный бассейн) углей.

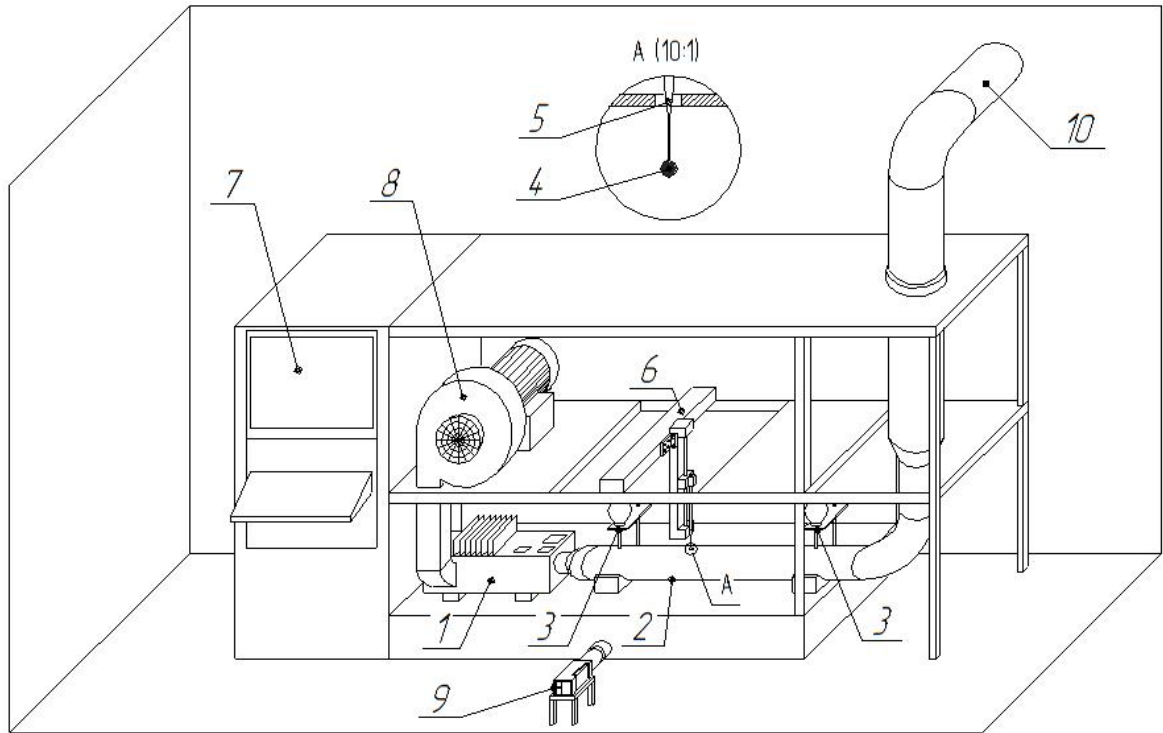


Рисунок 2.1.1 — Схема экспериментального стенда: 1 — высокотемпературный проточный теплогенератор; 2 — проточная реакционная труба (кварцевый цилиндр); 3 — термомпара; 4 — частица ВУТ; 5 — державка; 6 — дистанционно управляемое координатное устройство; 7 — ЭВМ; 8 — высоконапорный нагнетатель; 9 — высокоскоростная видеокамера; 10 — система экстракции дымовых газов

На Рисунке 2.1.2 приведены кадры видеogramмы процесса воспламенения частицы (диаметром $\delta = 3$ мм) водоугольного топлива на основе каменного угля марки Д. Общее время от начала теплового воздействия до момента воспламенения $t_{\text{ign}} \approx 7,8$ с.

Анализ кадров, приведенных на Рисунке 2.1.2 позволяет сделать вывод, что весь процесс термической подготовки и зажигания частицы ВУТ можно условно разделить на шесть последовательных взаимосвязанных стадий. При этом можно отметить, что каждая последующая стадия начинается до окончания предыдущих. Каждая такая стадия характеризуется доминированием одного конкретного физического процесса (инертный нагрев, испарение воды, термическое разложение органической части топлива, воспламенение). В

начальный момент времени (кадр *a*) капля ВУТ представляет собой водоугольную смесь, поверхность которой покрыта тонким (толщиной не более 0,5 мм) слоем воды. Инертный нагрев инициирует испарение воды (кадр *б*). Можно отметить (кадр *б*), что в результате испарения формируется пористый угольный каркас. Капля топлива трансформируется в существенно неоднородную многослойную сфероподобную структуру, состоящую из жидкого (исходное состояние) ядра и сухого угольного каркаса. Дальнейший нагрев приводит к термическому разложению органической части угля (кадр *в*). Через $\tau = 7,8$ с происходит воспламенение (кадр *г*). В аэродинамическом следе отчетливо видно пламя. Последнее обусловлено горением газообразных продуктов термического разложения и термохимического взаимодействия углерода кокса и водяных паров.

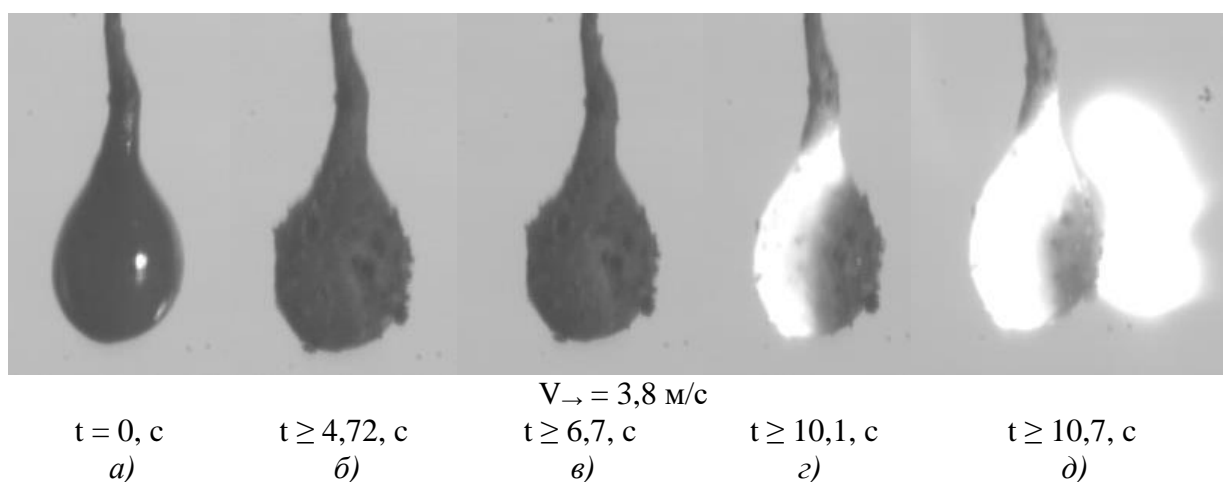


Рисунок 2.1.2 — Кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения капли водоугольного топлива в потоке высокотемпературного окислителя

По результатам анализа экспериментальных данных сформулированы физическая и математическая модели исследуемого процесса. В начальный момент времени ($t = 0$ с) капля ВУТ попадает в высокотемпературную среду. В результате комбинированного радиационно – конвективного теплообмена инициируются фазовые превращения воды, содержащейся внутри пор топлива. Фронт испарения движется от поверхности нагрева в глубинные слои частицы топлива. В результате формируется высокопористый сухой угольный каркас (с высоким термическим сопротивлением). Водяные пары, образующиеся при испарении, фильтруются сквозь этот каркас, вступая в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса ($\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$; $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$). Дальнейший нагрев приводит к термическому разложению органической части угля, сопровождающиеся выходом летучих. Принято, что газообразные продукты пиролиза угля, состоят из трех горючих компонентов (метан – CH_4 ; окись углерода – CO ; водород – H_2) и негорючих (диоксид углерода – CO_2 ;

водяные пары – H_2O). Последние совместно с водяными парами и продуктами термохимического взаимодействия (CO и H_2) под воздействием перепада давлений фильтруются к поверхности частицы топлива где формируют парогазовую смесь, воспламеняющуюся при достижении критических значений температур и концентрации. Необходимо отметить, что частица топлива в экспериментах подвешивалась на термопаре. Соответственно происходил отвод теплоты через проволоку последней.

При математической постановке задачи приняты следующие допущения:

- Форма частицы топлива – сфера
- Толщина зоны газофазного термохимического реагирования пренебрежимо мала по сравнению с размерами топливной частицы
- Влияние неоднородности аэродинамического спектра натекающего потока окислителя на температурное поле частицы незначительно

Математическая постановка, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности. Область решения задачи (водоугольная частица) можно условно разделить на две части (Рисунок 2.1.3).

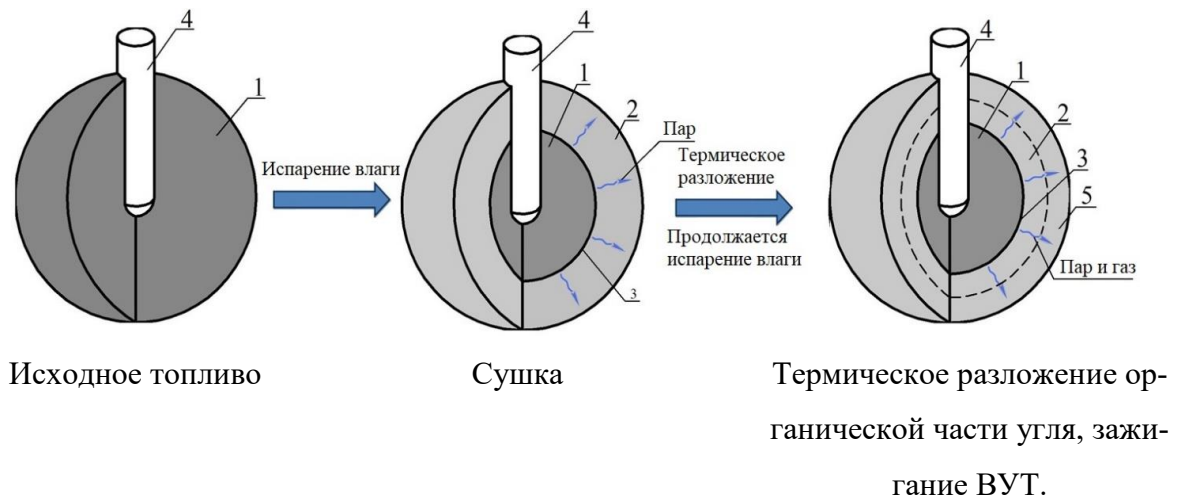


Рисунок 2.1.3 — Схема решения задачи:

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

Первая представляет собой исходное еще водонасыщенное (смесь угля и воды) топливо. Вторая часть представляет собой сухой каркас угля. Изменение температуры во влажном топливе описывает уравнение энергии:

$$C_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda_1 \sin \theta \frac{\partial T_1}{\partial \theta} \right); \quad (2.1.1)$$

$$t > 0, r_{Al} < r < r_e, 0 < \theta < \pi, T \leq T_e.$$

Вторая часть частицы ВУТ – угольный каркас, сквозь который фильтруется смесь водяных паров и продуктов термического разложения. Пары воды, которые движутся сквозь угольный каркас, вступают в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса.

Распределение температуры во второй части топлива описывается уравнением энергии:

$$C_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} + C_s \rho_s \left(U_s \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{V_s}{r} \frac{\partial T_2}{\partial \theta} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda_2 \sin \theta \frac{\partial T_2}{\partial \theta} \right) - \sum Q_i W_i; \quad (2.1.2)$$

$$t > 0, r_{eva} < r < r_{out}, 0 < \theta < \pi, T_{eva} \leq T;$$

$$\sum_{i=1}^{n=2} Q_i W_i = Q_{coal \rightarrow volatile} W_{coal \rightarrow volatile} + Q_{C+H_2O} W_{C+H_2O};$$

В процессе проведения экспериментов топливная частица подвешивалась на термопаре. Была сформулирована гипотеза, что через термопару возможен отток тепла от частицы при ее нагреве. При этом стоит отметить, что термопара состоит из спая и цилиндрической проволоки. Спай термопары находится в центре частицы. Следовательно, процесс отводы теплоты от частицы следует описывать системой уравнений энергии для спая и проволоки термопары:

– уравнение энергии (в сферической системе координат) для спая термопары:

$$C_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda_3 \sin \theta \frac{\partial T_3}{\partial \theta} \right) - \frac{3Q_{hr}}{4\pi r_{Al}^3}; \quad (2.1.3)$$

$$t > 0, 0 < r < r_{Al}, 0 < \theta < \pi, T \leq T_{eva};$$

– уравнение энергии (в цилиндрической системе координат) для проволоки термопары:

$$C_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \right); \quad (2.1.4)$$

$$t > 0, 0 < r < r_{Al}, 0 < z < L_w, T \leq T_{eva};$$

где Q_{hr} – количество теплоты отводимой через термопару. Значение Q_{hr} рассчитывалось из теплового баланса для проволоки. На границе раздела исходного (влажного) топлива и сухого угольного каркаса происходит испарение воды, и как следствие изменение агрегатного состояния вещества. Соответственно можно сказать, что на этой границе выполняется граничные условия 4 – го рода. При этом учитывается эндотермический тепловой эффект испарения воды $Q_e \cdot W_e$ на этой границе:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=\xi} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=\xi} - Q_e \rho_w \frac{d\xi}{dt}; \quad (2.1.5)$$

$$T_1 \Big|_{r=\xi} = T_2 \Big|_{r=\xi} = T_{eva};$$

На границе раздела «водоугольное топливо – спай термпары» выполняются условия равенства тепловых потоков и температур:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=r_{Al}} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_{Al}} ; \quad (2.1.6)$$

$$T_3(r_{Al}, t) = T_1(r_{Al}, t);$$

Массовая скорость испарения вычислялась по аналогии с [128]:

$$W_e = W_f \cdot \exp \left(\frac{Q_{wat} \cdot \mu \cdot (T_{wat} - T_f)}{R \cdot T_0 \cdot T_{wat}} \right); \quad (2.1.7)$$

Координата границы фронта фазового перехода вычислялись из выражения:

$$r_F = r_0 - \int_0^{\tau} u_F d\tau; \quad (2.1.8)$$

где $u_F = W_e/\rho$ – линейная скорость продвижения фронта испарения, м/с. Водяные пары фильтруется сквозь пористый углеродистый каркас. В результате происходит его охлаждение. Распределение давлений в частице описывается уравнением пьезопроводности:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\chi}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\chi}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right); \quad (2.1.9)$$

$$t > 0, \quad r_e < r < r_{out}, \quad 0 < \theta < \pi, \quad p \geq p_{atm};$$

Скорости (в радиальном и азимутальном направлениях) пара определялись из дифференциального выражения закона Дарси:

$$U_s = -\frac{K_p}{\nu} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (2.1.10)$$

$$V_s = -\frac{K_p}{\nu} \frac{\partial p}{\partial \theta}; \quad (2.1.11)$$

При достижении на поверхности частицы условия $T_{sur} \geq T_{std}$ инициируется процесс термического разложения, сопровождающееся выделением летучих. Процесс пиролиза описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = [1 - \eta] k_i \exp \left(-\frac{E_i}{RT_2} \right); \quad (2.1.12)$$

$$t > 0, \quad r_e < r < r_{out}, \quad T \geq T_e;$$

Продукты термической деструкции и химического взаимодействия углеродистого твердого остатка и водяных паров вдуваются в «пристенную» область. Формируется газовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температуры и концентрации [175]. Период времени от начала теплового воздействия на частицу до начала интенсивного (с появлением пламени) химического взаимодействия парогазовой смеси с

окислителем является временем задержки воспламенения. В непосредственной близости от поверхности частицы учитывалось протекание следующих реакций [178]:

1. $\text{H}_2 + 0.5 \cdot \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$
2. $\text{CO} + 0.5 \cdot \text{O}_2 = \text{CO}_2$
3. $\text{CH}_4 + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Система уравнений решалась при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях для ВУТ:

$$0 < r < r_{out}, \quad 0 < \theta < \pi, \quad T(r, \theta, 0) = T_0, \quad p(r, \theta, 0) = p_{atm}, \quad \eta(r, \theta, 0) = \eta_0$$

$$-\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=r_{out}} = \alpha \cdot [T_g - T_2]_{r=r_{out}} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_g^4 - T_2^4]_{r=r_{out}} + \sum_{i=1}^{n=3} Q_i \cdot W_i; \quad (2.1.13)$$

$$\text{где } \sum_{i=1}^{n=3} Q_i \cdot W_i = Q_{\text{CH}_4} \cdot W_{\text{CH}_4} + Q_{\text{H}_2+\text{O}_2} \cdot W_{\text{H}_2+\text{O}_2} + Q_{\text{CO}+\text{O}_2} \cdot W_{\text{H}_2+\text{O}_2};$$

$$\left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{\substack{r=0 \\ 0 < \theta < \pi}} = 0; \quad (2.1.14)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\substack{0 < r < r_{out} \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0; \quad (2.1.15)$$

$$\left. \frac{\partial p_s}{\partial r} \right|_{\substack{r=\xi \\ 0 < \theta < \pi}} = -\frac{\nu}{K_p} u_s; \quad (2.1.16)$$

$$\left. \frac{\partial p_s}{\partial \theta} \right|_{\substack{\xi < r < r_{out} \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0; \quad (2.1.17)$$

$$p \Big|_{\substack{r=r_{out} \\ 0 < \theta < \pi}} = p_{atm}; \quad (2.1.18)$$

для проволоки термопары:

$$0 < r < r_{Al}, \quad 0 < z < L_w, \quad T(r, z, 0) = T_0,$$

$$-\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{\substack{r=r_{Al} \\ 0 < z < L_w}} = \alpha \cdot [T_{env} - T_3]_{r=r_{Al}} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_{env}^4 - T_3^4]_{r=r_{Al}}; \quad (2.1.19)$$

$$\left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{\substack{r=0 \\ 0 < z < L_w}} = 0; \quad (2.1.20)$$

$$T_3 \Big|_{0 < r < r_{Al}} = T_0; \quad (2.1.21)$$

$$T_3 \Big|_{\substack{\theta=0 \\ 0 < r < r_{Al}}} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi T(r, \theta, t) d\theta; \quad (2.1.22)$$

Система уравнений решалась в период времени до достижения на поверхности частицы условий зажигания ВУТ, адекватных условиям зажигания твердых [215] и жидких [316] топлив. Теплопроводность, теплоемкость и плотность влажной и «обезвоженной» части топлива рассчитывались с учетом объемных долей основных компонентов:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \varphi_4\lambda_4 + \varphi_5\lambda_5 & \lambda_2 &= \varphi_5\lambda_5 + \varphi_6\lambda_6 \\ C_1 &= \varphi_4C_4 + \varphi_5C_5 & C_2 &= \varphi_5C_5 + \varphi_6C_6 \\ \rho_1 &= \varphi_4\rho_4 + \varphi_5\rho_5 & \rho_2 &= \varphi_5\rho_5 + \varphi_6\rho_6\end{aligned}\quad (2.1.23)$$

где: φ – объемная доля соответствующего компонента топлива: 4 – вода; 5 – уголь; 6 – водяные пары. Верификация математической модели проводилась методом минимизации невязки по тепловому балансу. Количество отведенной от частицы ВУТ теплоты (Q_{hr}) определялось из баланса энергии (с учетом его погрешности) для проволоки термопары. Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г.

Тепло подведенное к термопаре:

$$Q_{hs} = \sum_{i=0}^{N_i} \sum_{r=0}^{r_{Al}} \lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial z} \right|_{z=0} \cdot \pi \cdot (r_i^2 - r_{i-1}^2) \cdot \tau$$

Отвод тепла от проволоки термопары за счет конвекции и излучения:

$$Q_{hrc-r} = \sum_{i=0}^{N_i} \sum_{z=0}^{L_w} \left\{ \alpha \cdot [T_3|_{r=r_0} - T_0] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_3^4|_{r=r_0} - T_0^4] \right\} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot h_z \cdot \tau$$

Тепло, отведенное за счет теплопроводности в торце термопарной проволоки:

$$Q_{hrt} = \sum_{i=0}^{N_i} \sum_{r=0}^{r_{Al}} \lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial z} \right|_{z=L_w} \cdot \pi \cdot (r_i^2 - r_{i-1}^2) \cdot \tau$$

Тепло, накопленное в термопаре за счет теплоемкости:

$$Q_{ah} = \sum_{r=0}^{r_{Al}} \sum_{z=0}^{L_w} C_3 \cdot \rho_3 \cdot [T_3|_{r=r_0} - T_0] \cdot \pi \cdot (r_i^2 - r_{i-1}^2) \cdot h_z$$

Суммарное количество отведенной от частицы ВУТ теплоты:

$$Q_{rh} = Q_{hrc} + Q_{hrt} + Q_{ah}$$

Погрешность вычислений по балансу энергии определялась по формуле:

$$E = \frac{(Q_{hs} - Q_{hrs} - Q_{hrt} - Q_{ah})}{Q_{hs}} \cdot 100\%$$

На Рисунке 2.1.4 приведена зависимость погрешности (E) баланса энергии. Можно отметить, что на протяжении периода времени до $t = 0 \div 1,5 \cdot 10^{-4}$ с, величина E не превышает 0,001%. Варьирование шага по времени не приводило к существенным изменениям

погрешности вычисления теплового баланса. Соответственно, можно сделать вывод о адекватности результатов расчета процесса теплоотвода через проволоку термопары.

Верификация математической модели и метода решения задачи проведена сравнением времен задержки воспламенения частиц ВУТ, полученных теоретически и экспериментально. На Рисунке 2.1.5 приведены результаты сравнения для частиц водоугольного топлива, приготовленных из бурого угля (Канско – Ачинского бассейна). Можно сказать, что в достаточно широком диапазоне изменения размеров капель ВУТ ($0,5 < \delta < 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$), установлена удовлетворительная (в пределах доверительного интервала) согласованность времен задержки воспламенения. Анализ кривых 1 и 2 показывает, что увеличение характерного размера (диаметра δ) приводит к линейному росту t_{ign} . Последнее, скорее всего, обусловлено существенным влиянием совместного протекания комплекса основных теплофизических (инертный нагрев, испарение воды) и термохимических (термическое разложение органической части топлива, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода кокса) процессов. При этом, необходимо сказать, что интенсивность протекания процессов испарения воды и термического разложения органической части угля зависит от температуры, и соответственно, от скорости нагрева.

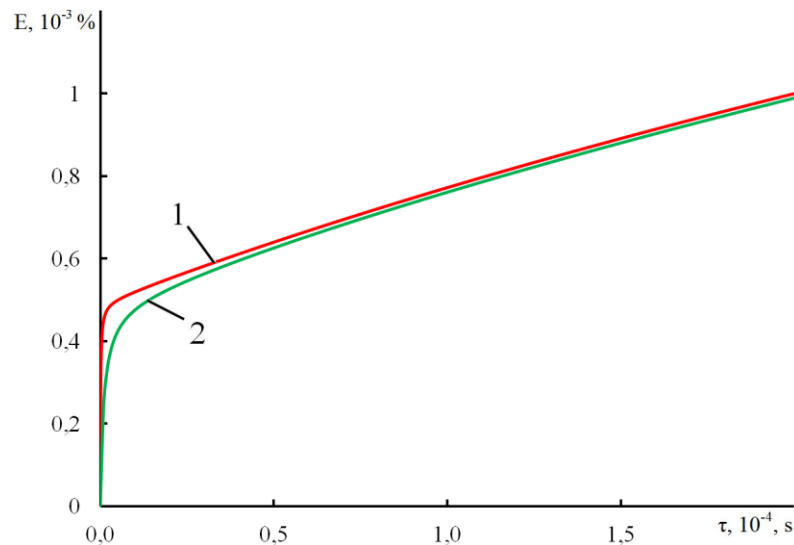


Рисунок 2.1.4 — Зависимость значений невязки теплового баланса системы «термопарная проволока – спай термопары – частица топлива – внешняя среда» от времени при шаге по времени: 1 – $\tau = 1 \cdot 10^{-7}$ с, 2 – $\tau = 1 \cdot 10^{-6}$ с

Величина последней прямо зависит от площади поверхности нагрева и объема нагреваемого тела.

На Рисунке 2.1.6 приведено сравнение времен задержки воспламенения капель ВУТ на основе каменного угля (Кузнецкого угольного бассейна), полученных при решении системы (2.1.1) – (2.1.25) и экспериментально. По аналогии с Рисунком 2.1.5, можно отметить,

что в диапазоне размеров топливных частиц ($0.9 < \delta < 2 \cdot 10^{-3}$ м) получено удовлетворительное соответствие результатов математического моделирования и эксперимента. Следовательно, можно сделать вывод о достаточно высоком уровне прогностического потенциала разработанной математической модели, при моделировании режимов зажигания частиц водоугольного топлива.

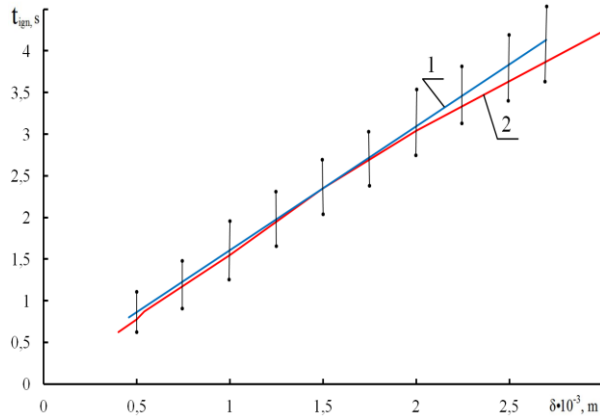


Рисунок 2.1.5 — Зависимость времен задержки воспламенения частиц ВУТ (на базе бурого угля) от характерного размера топливной частицы при температуре внешней среды $T_g = 870\text{К}$:

- 1 — Эксперимент;
- 2 — Численное решение

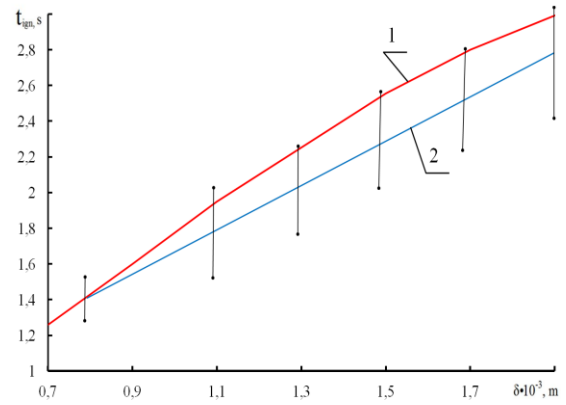


Рисунок 2.1.6 — Время задержки воспламенения частицы водоугольного топлива (на основе угля марки Д) в зависимости от размера при температуре окружающей среды $T_g = 870\text{К}$:

- 1 — Эксперимент;
- 2 — Численное решение.

На Рисунке 2.1.7 приведены времена задержки зажигания частицы (диаметром $\delta = 0,4$ мм) водоугольного топлива (на основе каменного угля) в зависимости от температуры внешней среды. Можно отметить, что температура внешней среды (T_g) оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Так увеличение T_g на 600 К (с 900 К до 1500 К) приводит к почти шестикратному ускорению процесса зажигания. Стоит отметить, что в случае воспламенения твердых (сухой уголь [317], древесина [318]) или жидких (дизельное топливо [319], бензин [320]) топлив аналогичные кривые имеют, как правило, нелинейный (существенно более экспоненциальный) характер. Скорее всего, вид кривых $t_{\text{ign}}(T_g)$ связан с совместным влиянием основных процессов термической подготовки (испарение воды, термическое разложение органической части топлива, термохимическое взаимодействие углерода кокса и водяных паров, радиационный теплоперенос) и зажигания (термохимическое взаимодействие газообразных продуктов пиролиза с окислителем) частиц водоугольного топлива.

На Рисунке 2.1.8 приведены зависимости температур поверхности частицы ВУТ от

времени в индукционный период. Анализ кривых (1 – 3) показывает, что воспламенение происходит после нагрева поверхности частицы до температуры $T(r_{out},t) \geq 650$ К. Соответственно, можно утверждать, что воспламенение топлива происходит только после выполнения необходимых (по температуре) условий для инициирования реакции взаимодействия горючего и окислителя.

На кривых (1 – 3) можно отметить характерные точки перегиба, соответствующие температуре 373К. Последние, соответствуют моменту времени, когда формируется слой сухого топлива с высоким термическим сопротивлением. В результате температура поверхности растет значительно быстрее.

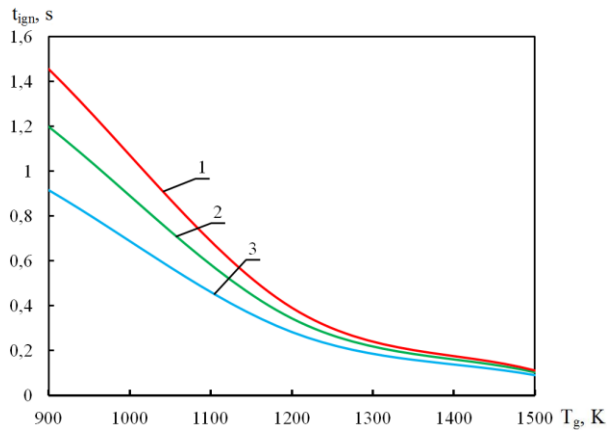


Рисунок 2.1.7 — Зависимость времени задержки воспламенения частиц ВУТ (на основе угля «Д») от температуры внешней среды для типичных (по условиям распыла топлива в камере сгорания котельных агрегатов) диаметров капель:

1 – 1 мм; 2 – 0.8 мм; 3 – 0,6 мм

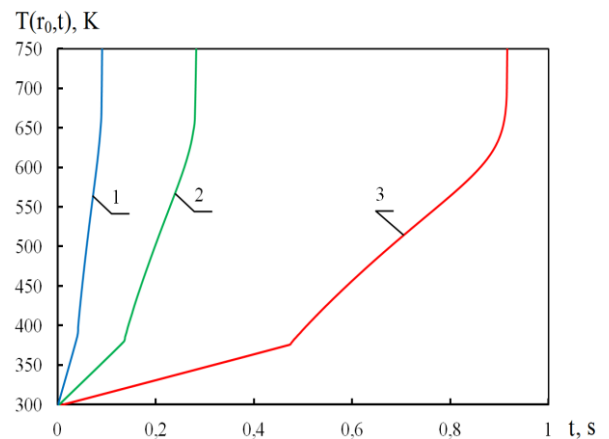


Рисунок 2.1.8 — Зависимость температуры поверхности частицы ВУТ (диаметр $\delta = 0,6$ мм) от времени в период индукции при температурах внешней среды:

1 – $T_g = 1500$ К; 2 – $T_g = 1200$ К; 3 – $T_g = 900$ К

На Рисунке 2.1.9 приведены распределения температуры в момент воспламенения в частице ВУТ. Установлено, что последние могут воспламеняться еще до полного испарения влаги. Следовательно, можно условно выделить два режима воспламенения: высокотемпературный ($T_g > 900$ К) и низкотемпературный ($T_g \leq 900$ К). Воспламенение в условиях относительно низких температур происходит только при полном удалении влаги топлива. В случае высокотемпературного нагрева зажигание может происходить в условиях влагонасыщенности основного слоя топлива (заметен характерный «перелом» линий 2 и 3). Можно однозначно утверждать, что горение таких частиц (в условиях продолжающегося испаре-

ния) будет существенно отличаться от горения сухого топлива. Анализ кривых 2 и 3 показывает, что зажигание топливных частиц происходит только при формировании «подсушенного» слоя топлива, термическое сопротивление которого способствует росту температуры поверхности частицы до критических значений.

На Рисунке 2.1.10 приведено сравнение расчетных времен задержки воспламенения частиц водоугольного топлива, подвешенных на термопаре и свободно витающих в потоке высокотемпературного газа. Можно отметить, что частицы ВУТ, подвешенные на термопаре, воспламеняются намного медленнее (в 1,5 раза) чем витающие в потоке газа. Соответственно можно утверждать, что отток тепла через термопару оказывает существенное влияние на динамику термической подготовки и воспламенения топливных частиц. Сопоставление кривых 1 и 2 показывает, что в условиях подвешивания частицы на термопаре возможны случаи отсутствия стабильного воспламенения.

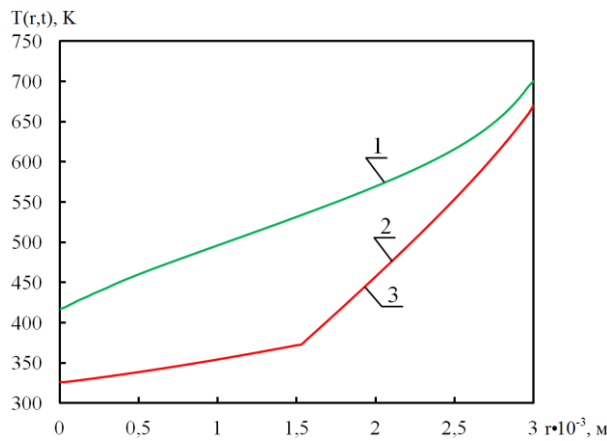


Рисунок 2.1.9 — Распределение температуры по радиусу частицы топлива (диаметром $\delta = 0,6 \text{ мм}$) в момент воспламенения при температуре окружающей среды:

1 – 900К; 2 – 1200К; 3 – 1500К

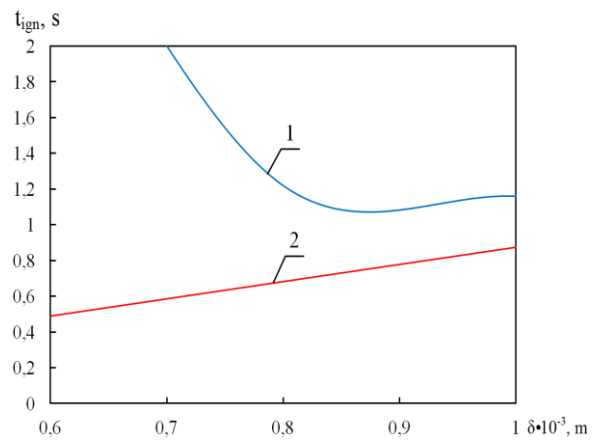


Рисунок 2.1.10 — Зависимость времени задержки воспламенения частиц ВУТ от размера в условиях эксперимента (подвешенная на термопаре – кривая 1) и свободно витающая в высокотемпературном газе (кривая – 2)

На Рисунке 2.1.11 приведена зависимость отношений подведенной к частице теплоты (за счет конвекции и излучения) к отводимой через термопару от времени в индукционный период. Анализ зависимости $t_{ign}(\delta)$ показывает, что в начальный момент времени ($\tau = 0 \text{ с}$) величина отведенной через проволоку термопары теплоты минимально ($Q_{hr} \rightarrow 0$). Это обусловлено тем, что вследствие высокого эндотермического эффекта испарения воды и большого термического сопротивления пористого слоя топлива формируется «энергетический барьер». Последний препятствует проникновению тепла вглубь частицы.

В процессе дальнейшего нагрева и влагоудаления центр частицы прогревается до более высоких температур и отток тепла через термопару увеличивается. Выполненный анализ влияния термопары на характеристики и условия зажигания частиц ВУТ обеспечил возможность объективной оценки достоверности результатов проведенного математического моделирования.

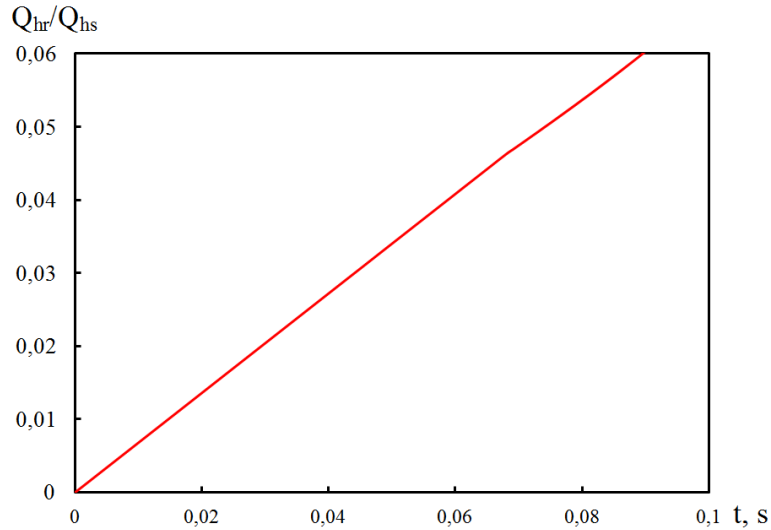


Рисунок 2.1.11 — Зависимость отношения тепла, подводимого к частице, к теплоте, отводимой через термопару, от времени в период индукции частиц ВУТ. Диаметр частиц $\delta = 3$ мм, температура окружающей среды $T_g = 820\text{K}$

2.2 Влияние гетерогенности структуры на характеристики и условия

воспламенения частиц водоугольного топлива в высокотемпературной среде

При проведении экспериментальных и теоретических исследований процесса воспламенения частицы водоугольного топлива возникали правомерные вопросы об обоснованности применения простых аддитивных выражений, описывающих теплофизические свойства (ТФС: теплопроводность – λ , теплоемкость – C_p , плотность – ρ), основанных на гипотезе о сумме средневзвешенных значениях ТФС каждого компонента топлива. Однако исследования процессов теплопереноса в дисперсных многосоставных системах проводятся уже на протяжении многих лет. На настоящее время разработано много (например [321]) разных математических моделей, описывающих теплопроводность гетерогенных систем, строение которых зависит от числа компонентов, их формы, концентрации, прозрачности и т.д. Соответственно, можно обосновано предположить, что принятая модель ТФС может оказывать, значимое влияние на результаты математического моделирования процессов зажигания частиц водоугольного топлива.

Для оценки влияния модели теплофизических характеристик на условия воспламенения частиц ВУТ проведены эксперименты, методикой и средствами регистрации существенно отличающиеся от приведённых выше. Исследования процессов воспламенения проведены на экспериментальном стенде, приведенном На Рисунке 2.2.1. Такая конструкция позволяет минимизировать возможные случайные погрешности методики измерений, обусловленные стохастической динамикой набегающего на частицу ВУТ высокотемпературного потока по аналогии со стендом, приведенном в разделе 2.1.

Частица топлива крепилась на керамическом держателе и вводилась дистанционно управляемым устройством в полый керамический цилиндр, на внешнюю поверхность закреплялся электрический нагреватель. Вся нагревательная система заключена в теплоизолированный кожух. Ранее [158, 173] установлено, что термопарные держатели могут оказывать существенное влияние на характеристики и условия воспламенения частиц водоугольного топлива за счет оттока тепла через термопару. Поэтому в экспериментах использовался керамический держатель. Как известно [322] теплопроводность керамики не является высокой ($\lambda = 0.18 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$). По этой причине отток тепла через держатель незначителен. Также необходимо отметить, что зажигание частицы топлива происходило в относительно неподвижной газовой окислительной среде (движение воздуха обусловлены только естественной конвекцией). Как известно работ [323], при распылении в внутреннем пространстве камеры сгорания котельного агрегата, формирующиеся частицы топлива движутся со скоростью, сопоставимой (отличия менее 0,1 м/с) по значениям скоростей несущего потока. Соответственно можно обоснованно предположить, что обдув частицы топливной частицы не будет оказывать значимого влияния на характеристики и условия воспламенения. Соответственно, условия проведения экспериментов практически соответствуют условиям нагрева частиц водоугольного топлива в топке типичных паровых и водогрейных котлов.

Регистрации динамики процессов воспламенения частицы ВУТ проводилась высокоскоростной видеокамерой Photron FASTCAM (скорость видео 20 000 кад./сек.). Температура внутри цилиндра (T_g) варьировалась в широком диапазоне (от 873 К до 1273 К). Период времени от начала теплового воздействия (время входа в полость цилиндра) до момента возгорания (появления пламени) считается временем задержки воспламенения. Характерный размер частиц топлива варьировался в диапазоне $1,5 < \delta < 3.5 \text{ мм}$. Сфероидальная форма топливной частицы проверялась путем многократного измерения ее диаметра. Несферические частицы отбраковывались.

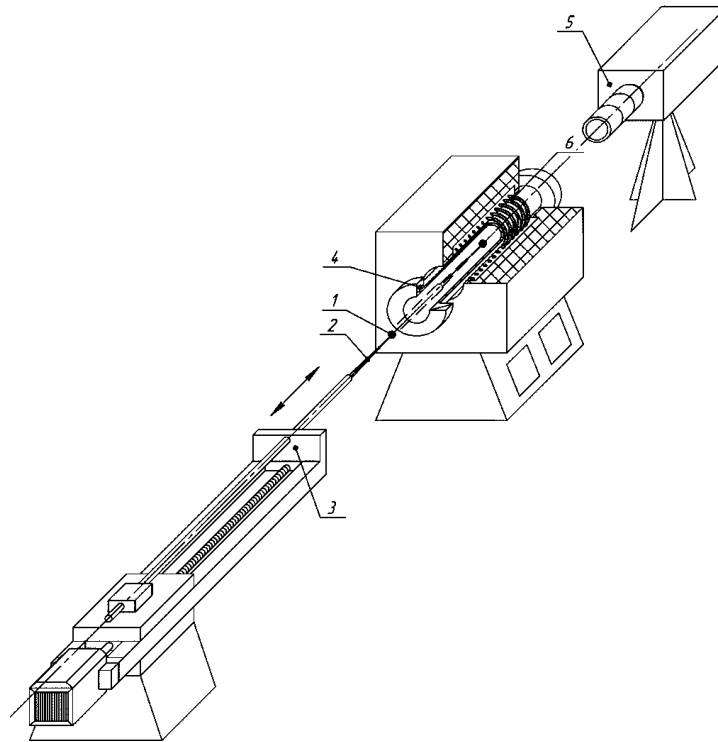


Рисунок 2.2.1 — Схема экспериментального стенда [151]:

- 1 – частица ВУТ; 2 – керамический держатель; 3 – координатное устройство;
4 – керамический полый цилиндр; 5 – скоростная видеокамера; 6 – электронагреватель

Исследования проводились для двух различных типов водоугольной суспензии. Первая группа ВУТ была выполнена из длиннопламенных углей Кузнецкого угольного бассейна. Вторая группа топливных капель приготавливалась из бурых углей Канско – Ачинского угольного бассейна. Массовое соотношение основных компонент топливной системы контролировалось на этапе приготовления водоугольной суспензии. Подготовка топлива осуществлялась по следующей схеме: уголь перемалывали в дисковой мельнице (до фракции 40 – 80 мкм) получившуюся угольную пыль смешивали с водой и доводили до гомогенного состояния в гомогенизаторе. Смешивание угля с водой производилось при соотношении объемных долей в системе уголь/вода 50/50.

С целью стабилизации (предотвращения потери угля в твердом осадке) в суспензию вводился стабилизатор «Неолас». Влагосодержание определялось по соотношению объемных долей соответствующих компонентов топлива (вода, уголь). Характеристики компонентов топлива приведены в приложении А.

Кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения частиц водоугольного топлива (диаметром $\delta = 2,5$ мм) на основе длиннопламенного угля, приведены на Рисунке 2.2.2. Температура внешней среды $T_g = 1273$ К. Общее время от начала нагрева до зажигания $t_{ign} \approx 5,5$ секунд. Анализ приведённых на Рисунке 2.2.2 типичных кадров видеогаммы

процесса зажигания показывают, что аналогично процессу воспламенения капли ВУТ в реакционной проточной трубе весь процесс термической подготовки и зажигания можно условно разделить на ряд последовательных взаимосвязанных стадий, каждая из которых характеризуется доминированием одного из процессов термической подготовки (инертный радиационно – конвективный нагрев, испарение внутриводной влаги, термическое разложение с выходом летучих, газофазное воспламенение, зажигание кокса). В начальный момент времени ВУТ представляет собой каплю. Инертный радиационно – конвективный нагрев инициирует испарение воды и термического разложение органического угля. Подробный (при большом увеличении) анализ кадра *б* показывает характерное осветление поверхности частицы. При $t = 5.5$ секунд после начала нагрева происходит зажигание летучих (кадр *в*). Можно отметить, что зона возгорания локализована в верхней полусфере частицы. Это скорее всего обусловлено тем, что в период термической подготовки частицы ВУТ в ее малой окрестности формируются вихревые течения с нисходящими (около относительно холодной поверхности частицы) и восходящими (на некотором расстоянии от топлива) потоками воздуха, который «подхватывает» и уносит газообразные продукты пиролиза в пространство над частицей, где они накапливаются и воспламеняются при критических значениях температур и концентраций.

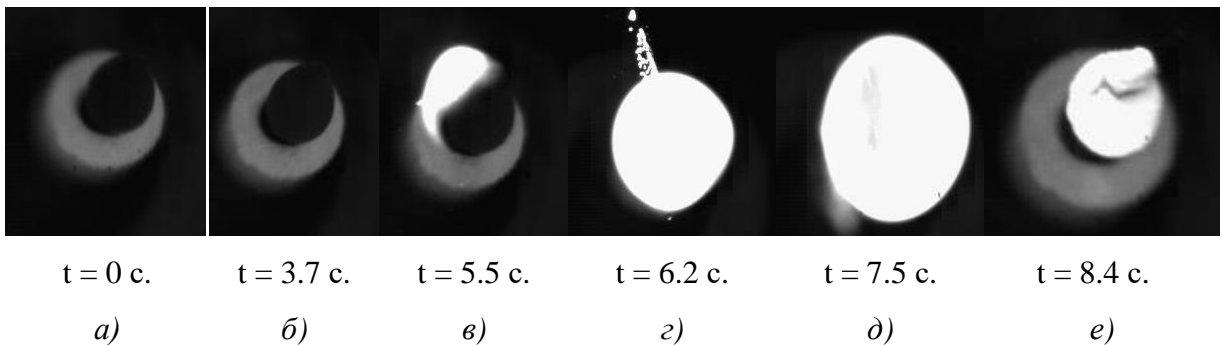


Рисунок 2.2.2 — Типичные кадры процесса воспламенения частиц водоугольного топлива, изготовленного из длиннопламенного угля [151]

После воспламенения летучих формируется сфера пламени, размеры которой больше характерного размера частицы топлива в 2 – 3 раза. Соответственно, можно сделать вывод, что применение метода «тонкой приведенной пленки» (по аналогии [324]) при расчете процессов горения таких топлив может привести к существенным ошибкам при проведении прогностического моделирования процесса зажигания частицы ВУТ. После сгорания формируется зольный остаток топлива. Анализ кадра *е* показывает, что после сгорания топлива в золовом остатке сформировалась трещина, обусловленная (скорее всего) сов-

местным воздействием фильтрации смеси водяного пара и газообразных продуктов пиролиза сквозь пористую структуру и высокими термическими напряжениями, вызванными большим градиентом температуры в слое топлива. Сочетание этих факторов приводит к образованию больших механических деформаций и, следовательно, к растрескиванию.

На Рисунке 2.2.3 приведены кадры типичной видеोगраммы воспламенения частицы водоугольного топлива, выполненной из бурого угля. Аналогично рисунку 2.2.2 процесс зажигания частицы ВУТ можно разделить на три, четыре последовательные стадии. Стоит отметить, что первые две стадии (инертный нагрев и термическое разложение) полностью аналогичны таким же этапам для длиннопламенного угля. Существенные отличия заключается в механизме воспламенения. На кадре *в* показано начало процесса. Анализ изображения дает основания для вывода о том, что зажигание начинается с формирования «центров» воспламенения в малой окрестности частицы ВУТ. Они, скорее всего, представляют собой мелкие частицы угля, оторвавшиеся от основного слоя топлива в процессе термической подготовки. В этих условиях при $t = 3,8$ с происходит воспламенение летучих. Через несколько секунд топливная частица разрушается вследствие высоких термических напряжений в приповерхностном слое топлива и фильтрации водяных паров сквозь пористый каркас.

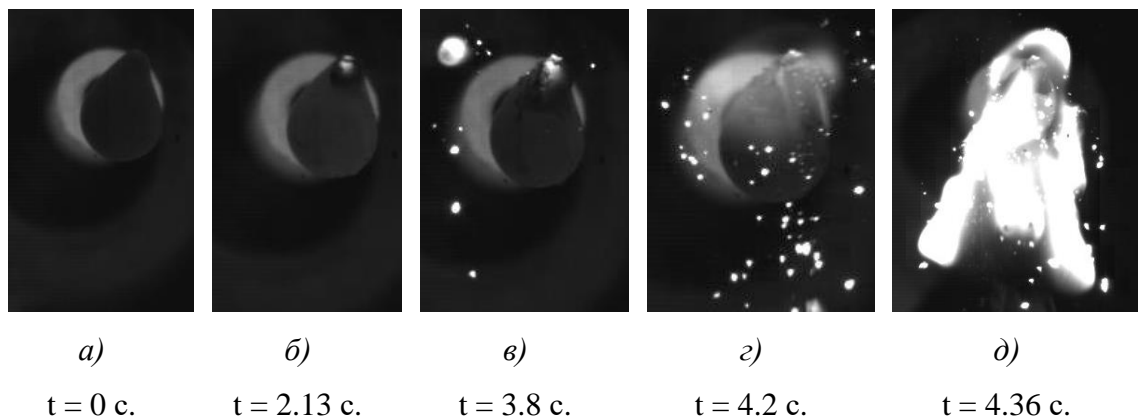


Рисунок 2.2.3 — Типичные кадры процесса воспламенения частиц водоугольного топлива на основе бурого угля [151]

На Рисунке 2.2.4 приведены полученные в экспериментах зависимости времен задержки воспламенения частицы водоугольного топлива (выполненных из бурого угля) от температуры внешней среды. Анализ результатов экспериментов показывает, что температура внешней среды оказывает существенное влияние на динамику термической подготовки и воспламенения топлива. Так увеличение температуры на 400 К приводит к ускорению зажигания более, чем в 5 раз. Также необходимо отметить нелинейный (можно сказать экспоненциальный) характер кривых (1) – (3). Последнее свидетельствует о существенном

влиянии комплекса совместно протекающих процессов тепломассопереноса (с учетом радиационного нагрева) в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений в индукционный период времени.

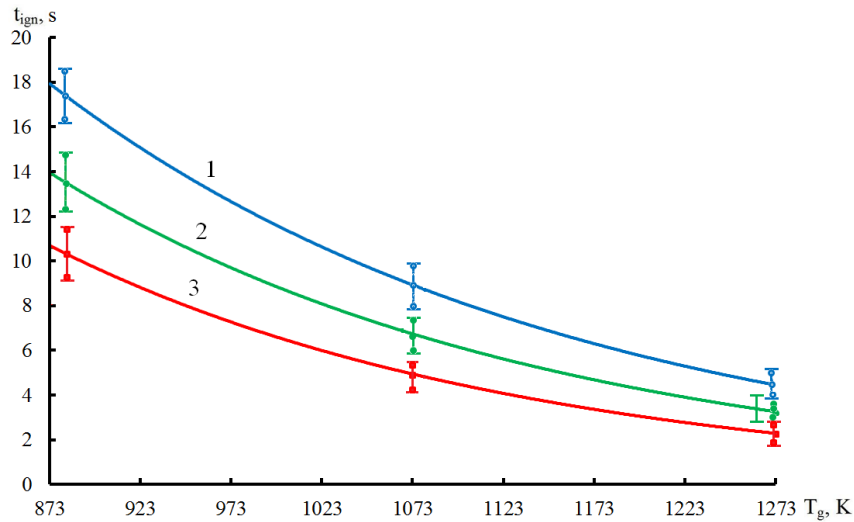


Рисунок 2.2.4 — Зависимость времени задержки воспламенения частицы водоугольного топлива (на основе бурого угля) от температуры внешней среды [151]:

1 — диаметр частицы $\delta \geq 3$ мм; 2 — $\delta \approx 2,5$ мм; 3 — $\delta \approx 1,9$ мм

На Рисунке 2.2.5 приведены результаты экспериментального исследования воспламенения частицы водоугольного топлива, приготовленного из длиннопламенного угля. Вид кривых (1) — (3) аналогичен зависимостям, приведенным на Рисунке 2.2.4. Сравнение рисунков 2.2.4 и 2.2.5 показывает, что водоугольные частицы, выполненные из бурых углей, воспламеняются быстрее (в среднем в 1,5 раза), чем капли ВУТ из длиннопламенного угля.

По результатам экспериментальных исследований сформулирована физическая и математическая модели, описывающих комплекс процессов (передача тепла теплопроводностью, испарение воды, термическое разложение органической части топлива, взаимодействие водяных паров с углеродом кокса) термической подготовки и зажигания частиц водоугольного топлива.

К настоящему времени разработано более десятка математических моделей теплофизических характеристик гетерогенных и пористых сред [321], которые могут быть использованы при решении задач зажигания ВУТ. Выбор конкретных выражений для расчета ТФС зависит от формы, взаимного расположения и размеров элементов

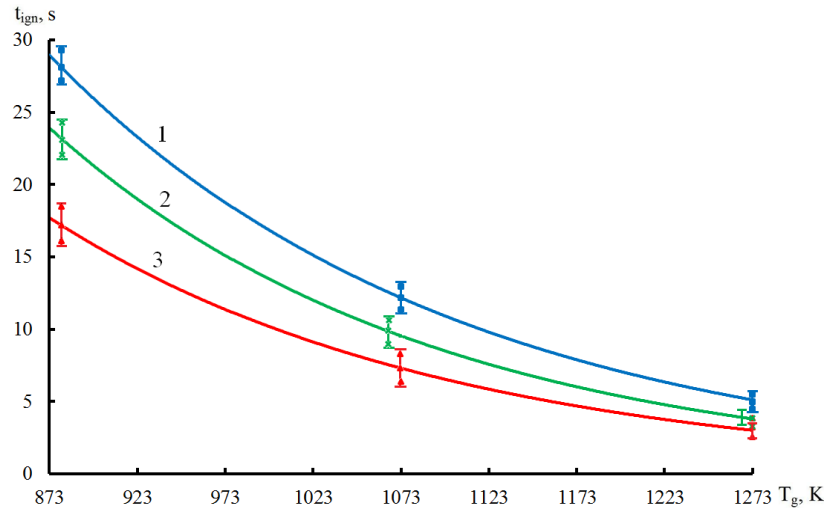


Рисунок 2.2.5 — Зависимость времени задержки воспламенения частицы водоугольного топлива (на основе длиннопламенного угля) от температуры окружающей среды:

1 – диаметр частицы $\delta \geq 3$ мм; 2 – $\delta \approx 2,5$ мм; 3 – $\delta \approx 1,9$ мм

дисперсных или пористых сред. Одним из первых ввел в рассмотрение «принцип обобщенной проводимости» ещё Дж.К. Максвелл [325]. Он рассчитал электрическое поле системы, состоящее из среды, в которую внедрены частицы сферической формы. Соотношение для расчета коэффициента теплопроводности такой системы имеет вид [325]:

$$\lambda_{эф} = \lambda_2 \cdot \left(\frac{\lambda_1 + 2 \cdot \lambda_2 - 2 \cdot m \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 + 2 \cdot \lambda_2 + m \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \right); \quad (2.2.1)$$

Принятые обозначения: λ_1 – коэффициент теплопроводности конденсированной среды; λ_2 – коэффициент теплопроводности внутрипоровой среды; m – пористость.

Оделевский В.И. [326] для определения теплопроводности гетерогенной структуры типа «засыпка» предложил использовать формулу:

$$\lambda_{эф} = \lambda_1 \cdot \left(1 + \frac{m}{\frac{1-m}{3} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}} \right); \quad (2.2.2)$$

Как было установлено [321] форма и конфигурация пор может оказывать существенное влияние на теплопроводность гетерогенных или пористых сред. Возможные варианты такой структуры топлива приведены на Рисунке 2.2.6. Так в случае, когда топливо представляет собой слой с порами виде своеобразных «туннелей» (Рисунок 2.2.6 а), расположение которых перпендикулярно направлению теплового потока, рекомендуется [327] выражение:

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\lambda_2}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot (1-m) + m}; \quad (2.2.3)$$

Если направления теплового потока и «поровых каналов» совпадают (Рисунок 2.2.6 б) можно применять выражение [321]:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_1 \cdot (1-m) + \lambda_2 \cdot m; \quad (2.2.4)$$

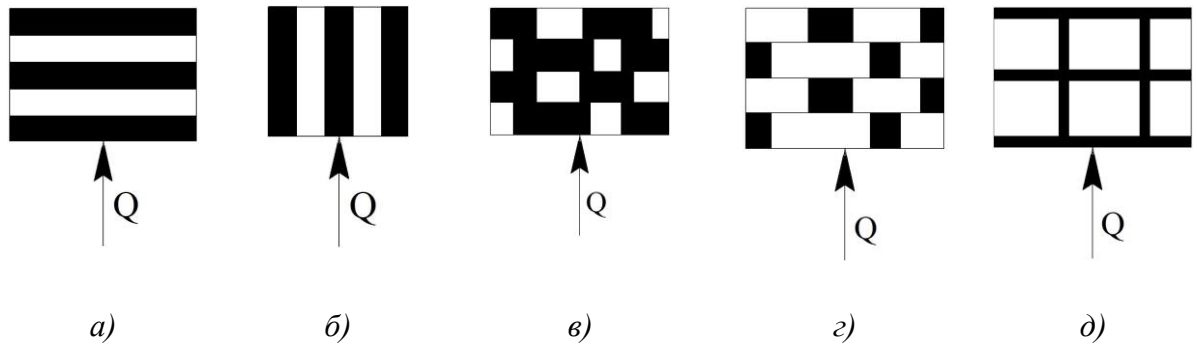


Рисунок 2.2.6 — Возможные [321] варианты конфигураций гетерогенной структуры топлива; Q – тепловой поток

Для структуры топлива, схема которой приведена на Рисунке 2.2.6 в, применима формула [328]:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_2 \cdot \left[\frac{4 \cdot m}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot (1 - 2 \cdot m) \right]; \quad (2.2.5)$$

Модель (2.2.6) используется, в том случае, когда схема гетерогенной структуры соответствует конфигурации, приведенной на Рисунке 2.2.6 з [329]:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_2 \cdot \left[\frac{4 \cdot (1-m)}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + (2 \cdot m - 1) \right]; \quad (2.2.6)$$

При расположении пор по схеме, приведенной на Рисунке 2.2.6 д рекомендуется [330] формула:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_2 \cdot m^{\frac{1}{3}} + \lambda_1 \cdot (1-m)^{\frac{2}{3}}; \quad (2.2.7)$$

Одним из способов расчета коэффициента теплопроводности пористого топлива является предложенный Г.Н. Дульневым [331]:

$$\lambda_{эф} = \lambda_2 \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \cdot m^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 - m^{\frac{2}{3}}\right)}{1 - m^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)}; \quad (2.2.8)$$

Также для расчета теплопроводности гетерогенных сред часто используется формула Г.Н. Бургера [332]:

$$\lambda_{эф} = \frac{m \cdot \lambda_1 + (1 - m) \cdot \lambda_2 \cdot C}{m + (1 - m) \cdot C}; \quad (2.2.9)$$

где C – коэффициент выбирается исходя из следующих условий: $C = 1$ – однородная смесь, $C \ll 1$ – изолированная фаза наполнителя, $C > 1$ – непрерывная фаза наполнителя. Стоит отметить, что при $C = 1$ формула (2.2.9) обращается в (2.2.4). Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В.

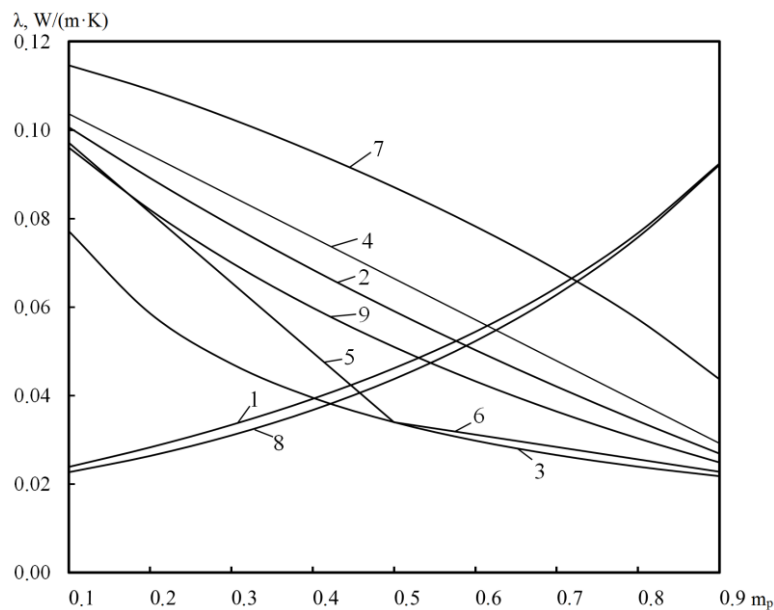


Рисунок 2.2.7 — Зависимость значений коэффициента теплопроводности системы «пористый угольный каркас – водяной пар» от пористости при расчете $\lambda_{эф}$ по формулам: 1 – (2.2.1); 2 – (2.2.2); 3 – (2.2.3); 4 – (2.2.4); 5 – (2.2.5); 6 – (2.2.6); 7 – (2.2.7); 8 – (2.2.8);

На Рисунке 2.2.7 приведены зависимости коэффициентов теплопроводности гетерогенной системы «уголь/водяной пар» в зависимости от пористости, рассчитанные по формулам (2.2.1) – (2.2.9). Анализ зависимостей показывает, что значения коэффициентов теп-

лопроводности могут меняться в достаточно широком диапазоне. Так при начальной пористости $m \approx 0.1$ рассчитанное значение $\lambda_{эф}$ может изменяться от 0.023 Вт/(м·К) (формула (2.2.8)) до 0.15 Вт/(м·К) (формула (2.2.5)) при прочих адекватных условиях. Другими словами, в 6.5 раз. Также анализ зависимостей (Рисунок 2.2.7) показывает, что при использовании разных методик вычисления $\lambda_{эф}$ с ростом пористости теплопроводность среды может как увеличиваться (кривые 7 и 8), так и уменьшаться (кривые 1 – 6 и 9). Последнее объясняется, скорее всего тем, что эмпирически выведенные формулы (2.2.1) и (2.2.8) учитывают не только теплопроводность, но и косвенно внутрипоровый радиационно – конвективный теплоперенос.

Принята физическая модель процессов тепло – и массопереноса (инертный радиационно – конвективный нагрев, теплоперенос теплопроводностью) в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и физико – химических (термическое разложение, выход летучих, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, газофазное воспламенение) превращений (протекающих совместно), соответствующая условиям и эксперимента и установленным при его проведении закономерностям.

Математическая постановка задачи воспламенения капли ВУТ, соответствующая сформулированной выше физической модели по структуре системы дифференциальных уравнений соответствует модели, приведенной в разделе 2.1.

На Рисунке 2.2.8 приведены результаты сравнительного анализа времен задержек зажигания (в зависимости от температуры внешней среды), полученных теоретически и экспериментально. Теплофизические характеристики варьировались в достаточно широком диапазоне (Рисунок 2.2.7) и рассчитывались по формулам (2.2.1) — (2.2.9). Можно сказать, что в достаточно широком (но в то же время типичном для котельной техники) диапазоне температур внешней среды ($873 < T_g < 1300\text{K}$), установлена удовлетворительная (в пределах доверительного интервала $\pm 1,5\%$) согласованность времен задержки воспламенения. Анализ кривых показывает, что наибольшие отличия экспериментальных и численно рассчитанных значений t_{ign} зарегистрированы в случае, когда λ рассчитано по формулам (2.2.6), (2.2.5) и (2.2.3). При этом хорошее соответствие теоретических и экспериментальных значений времен задержки воспламенения наблюдается при коэффициенте теплопроводности, рассчитанном по формулам (2.2.7) и (2.2.9).

Последнее свидетельствует о существенном влиянии комплекса процессов тепло-массопереноса, протекающих совместно при термической подготовке топлива к воспламенению. Также немаловажное значение имеет тот факт, что при испарении воды формируется пористый угольный каркас. Соответственно, существенную роль может приобретать

внутренний радиационный теплоперенос. Интенсивность последнего существенно зависит от оптических характеристик конкретного материала, экспериментальное исследование которых представляет собой отдельную очень тяжелую задачу.

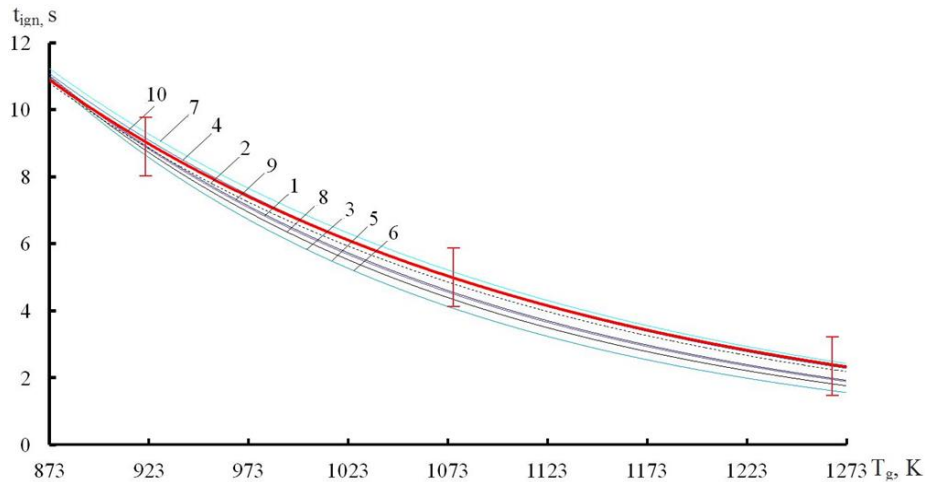


Рисунок 2.2.8 — Сравнение времен задержки воспламенения частицы ВУТ (диаметром $\delta = 1,9$ мм) (изготовленной из длиннопламенного угля), полученные теоретически (кривые 1 – (9)) и экспериментально (кривая (10)). Коэффициенты теплопроводности, рассчитанными по формулам:

1 – (2.2.1); 2 – (2.2.2); 3 – (2.2.3); 4 – (2.2.4); 5 – (2.2.5); 6 – (2.2.6); 7 – (2.2.7); 8 – (2.2.8)

На Рисунке 2.2.9 приведены времена задержки воспламенения (t_{ign}) частицы ВУТ (на основе бурого угля, характерные размеры $\delta = 0.4$ мм и $\delta = 0.6$ мм) от температуры внешней среды. Коэффициент теплопроводности рассчитывался по формулам (1) – (9). Область 10 показывает результаты численного моделирования зажигания каплей водоугольного топлива с характерным размером $\delta = 0.6$ мм (при разных вариантах описания $\lambda_{эф}$), зона 11 соответствует $\delta = 0.4$ мм. Участок 12 соответствует «совмещению» времён задержек воспламенения частиц с характерными размерами $\delta = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м и $\delta = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м.

Верхняя граница каждой из зон соответствует временам задержки зажигания каплей ВУТ, эффективный коэффициент теплопроводности которых, рассчитан по формулам (2.2.4) и (2.2.7). Нижние граничные значения $t_{ign}(T_g)$ получены с использованием формул (2.2.5) и (2.2.3). Анализ полученных зависимостей показывает, что форма математического описания теплофизических свойств может оказывать заметное влияние на характеристики воспламенения каплей водоугольного топлива. При этом необходимо отметить, что при относительно низкой температуре топочной среды (~ 1000 К) отличия значений t_{ign} (при разных моделях $\lambda_{эф}$) не превышают 10%. Повышение T_g приводит к росту отклонений t_{ign} . Последнее, скорее всего, связано с совместным протеканием основных физико – химических

процессов термической подготовки. Также можно отметить, что зависимость времен задержки воспламенения ВУТ, теплофизические свойства которого рассчитаны по формулам (2.2.4) и (2.2.7), отличаются от аналогичных (вариантов расчета $\lambda_{эф}$ по формулам (2.2.3) и (2.2.5)). Сопоставление рисунков 2.2.8 и 2.2.9 показывает, что водоугольные частицы, коэффициенты теплопроводности которых вычислены по формулам (2.2.5) и (2.2.3) воспламеняются быстрее, чем такие же (по размерам) частицы, но $\lambda_{эф}$ которых получено с использованием выражений (2.2.4) и (2.2.7). Последнее обусловлено тем, что в процессе термической подготовки приповерхностный слой (место наиболее интенсивного теплопереноса) топлива прогревается быстрее. В результате время достижения необходимых условий воспламенения уменьшаются.

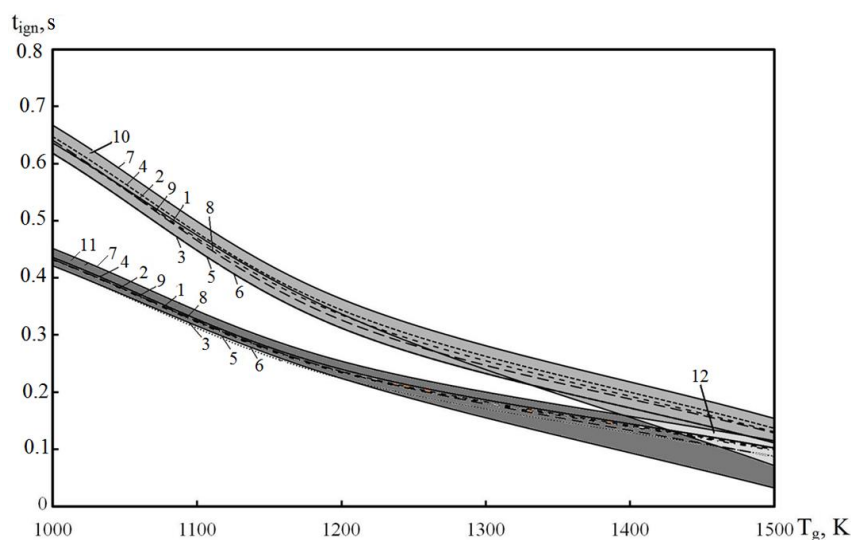


Рисунок 2.2.9 — Зависимости времени задержки воспламенения частиц водоугольного топлива от температуры внешней среды [151] при коэффициентах теплопроводности, рассчитанных по формулам:

1 – (2.2.1); 2 – (2.2.2); 3 – (2.2.3); 4 – (2.2.4); 5 – (2.2.5); 6 – (2.2.6); 7 – (2.2.7); 8 – (2.2.8); 9 – (2.2.9); 10 – частицы диаметром $\delta = 0,6$ мм; 11 – частицы ВУТ диаметром $\delta = 0,4$ мм; 12 – времена задержки зажигания частиц с $\delta = 0,4$ мм и $\delta = 0,6$ мм

Зависимости времён задержки воспламенения относительно больших по размерам частиц $\delta = 0,8$ мм и $\delta = 1,0$ мм от температуры внешней среды T_g эффективный коэффициент теплопроводности которых рассчитан по формулам (2.2.1) – (2.2.9), приведены на Рисунке 2.2.10. Границы $t_{ign}(T_g)$ областей 1 и 2 (по используемым для вычисления $\lambda_{эф}$ формулам) аналогичны рисунку 2.2.9. Анализ этих зависимостей показывает, что практически во всем диапазоне температур отличия значений t_{ign} частиц ВУТ при применении разных моделей ТФС не превышает 15 % (как для частиц с характерным размером $\delta = 0,4$ мм, так и при $\delta =$

0.6 мм). Можно сказать, что увеличение теплопроводности (формулы (2.2.4), (2.2.7)) приводит к росту времени задержки воспламенения. По аналогии с приведенными на Рисунке 2.2.9. результатами это объясняется тем, что относительно высокое значение $\lambda_{\text{эф}}$ приводит к менее интенсивному нагреву (тепло отводится вглубь топлива) приповерхностного слоя топлива. В результате оптимальные условия зажигания достигаются медленнее, чем для таких же (по размерам) частиц, но коэффициент теплопроводности, которых рассчитан по формулам (2.2.3), (2.2.5) и (2.2.6).

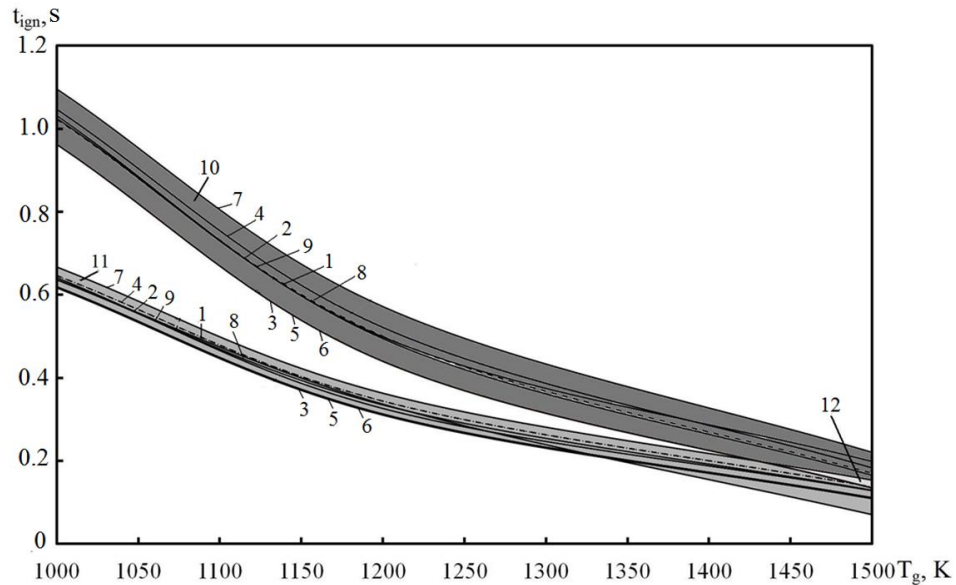


Рисунок 2.2.10 — Зависимости времени задержки воспламенения частиц водоугольного топлива (на основе угля марки «Д») от температуры окружающей среды при расчетах коэффициентов теплопроводности по формулам:

1 – (2.2.1); 2 – (2.2.2); 3 – (2.2.3); 4 – (2.2.4); 5 – (2.2.5); 6 – (2.2.6); 7 – (2.2.7); 8 – (2.2.8); 9 – (2.2.9); 10 – частицы диаметром $\delta = 0,6$ мм; 11 – частицы ВУТ диаметром $\delta = 0,4$ мм; 12 – времена задержки воспламенения частиц с $\delta = 0,4$ мм и $\delta = 0,6$ мм

Установленные закономерности можно объяснить тем, что в исходном состоянии пористость водоугольной суспензии высока (0.5–0.6). Процесс испарения воды не влияет на пористость топлива. Теплопроводность водяного пара при высоких температурах существенно отличается от λ воды. Соответственно, $\lambda_{\text{эф}}$ гетерогенной структуры ВУТ с ростом температуры выше температуры кипения воды изменяются не больше чем на 20%. Соответствующим образом изменяются и времена задержки зажигания. Дальнейший рост температуры слоя сухого угля приводит к термическому разложению и образованию летучих, обеспечивающих начало процесса горения ВУТ. Но пористость при этом падает незначительно. На основании анализа результатов выполненных исследований можно отметить,

что в условиях высокотемпературного нагрева изменение пористости в результате термической деструкции угля оказывает влияние на процесс воспламенения. Но масштабы такого воздействия незначительны. Соответственно можно сделать вывод о том, что зависимость эффективной теплопроводности водоугольного топлива от температуры и степени термической деструкции не вносит значительных отклонений в динамику зажигания частиц ВУТ.

2.3 Математическое и физическое моделирование воспламенения водоугольной топливной частицы с пленкой воды на поверхности в неподвижном высокотемпературном окислителе

В настоящее время плохо изучены характеристики и условия воспламенения частиц ВУТ, поверхность которых покрыта водной пленкой. Приведенные выше результаты исследований, получены при изучении процессов воспламенения частиц ВУТ в потоке высокотемпературных газов (исследования проводились в реакционной трубке, в которую нагретый воздух подавался с высокими скоростями (до 3,8 м/с); частица ВУТ подвешивалась на неподвижной термопаре). Но скорости витания в реальном топочном устройстве много ниже (не более 2 м/с) [336]. Соответственно, можно обосновано предположить, что применение вышеприведенных результатов [151, 158] при моделировании работы камеры сгорания котла может привести к значительным погрешностям в прогнозировании времен задержки воспламенения частиц ВУТ, покрытых пленкой воды.

Также стоит сказать, что анализ современных тенденций математического моделирования [337] показывает, что подавляющее большинство современных исследователей отдают предпочтение численным методам решения задач математической физики. Но, такой подход требует применения энергоемких вычислительных систем, в некоторых случаях кластерного типа. Использование суперкомпьютеров при моделировании процессов воспламенения и горения частиц топлива в топочном пространстве будет достаточно затратным и нецелесообразным. Это связано с группой значимых факторов, существенно влияющих на характеристики воспламенения топлива (температура окружающей среды, размер частиц, толщина водяной пленки, тип угля, влажность частиц, степень измельчения топлива и т. д.). Применение численных методов решения задачи зажигания с учетом всех возможных вариаций сочетания вышеперечисленных факторов приведет к существенным финансовым затратам. По этой причине, представляет значительный интерес проведение теоретических исследований, результатом которых является разработка аналитического решения

задачи зажигания капли водоугольного топлива. Такой результат создает предпосылки для разработки математической базы методики расчета топочных устройств с использованием относительно простых электронных вычислительных машин (не эксФЛОПного класса). Поэтому целью этого параграфа диссертации является экспериментальное исследование воспламенения водоугольных частиц, поверхность которых покрыта водяной пленкой, формулировка математической модели этого процесса и разработка аналитического решения соответствующей задачи.

Экспериментальные исследования проводились на оборудовании, которое по своим методам регистрации времен задержки зажигания и размеров частиц топлива аналогично установке, использованной в работе [163] (раздел 2.2). В процессе проведения экспериментов измерялись диаметры частиц ВУТ с пленкой воды и после испарения приповерхностного слоя воды. В этом случае толщина слоя воды рассчитывалась по формуле:

$$D = \frac{d_s - d_e}{2};$$

где d_s – диаметр частицы в начальный момент времени (с водной пленкой на поверхности); d_e – диаметр частицы в начальный момент времени (без слоя воды). Исследования проводились для двух различных типов водоугольной суспензии. Первая группа ВУТ приготавливалась из длиннопламенных углей Кузнецкого бассейна, а вторая – из бурых углей Канско – Ачинского бассейна. Методика подготовки водоугольного топлива к эксперименту по своему алгоритму аналогична приведённой в разделе 2.2 схеме [163, 173]. Отличие заключается в том, что в период проведения экспериментальных процедур на поверхность частицы топлива покрывалась пленкой воды, инициирование которой задавалось при помощи электронного дозатора.

На Рисунке 2.3.1 представлены кадры типичной видеогаммы процесса нагрева и воспламенения частиц (диаметром $d \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ м) водоугольного топлива, покрытых водяной пленкой, на основе длиннопламенного угля при температуре окружающей среды $T_e = 1273$ К. Время задержки зажигания $t_{ign} = 4,534$ с. Анализ видеогаммы показывает, что период воспламенения можно условно разделить на несколько последовательных этапов: инертный нагрев, испарение водяной пленки, удаление влаги из основного слоя топлива, термическое разложение и воспламенение летучих веществ, возгорание углерода. В начальный момент времени (кадр а) капля ВУТ, покрытая водяной пленкой, попадает в высокотемпературную газовую среду и нагревается. Нагрев инициирует процесс испарения водного слоя. В условиях продолжающегося теплового воздействия (кадр б, в) размер частиц увеличивается. Это связано с образованием пузырьков пара внутри пленки (видны прозрач

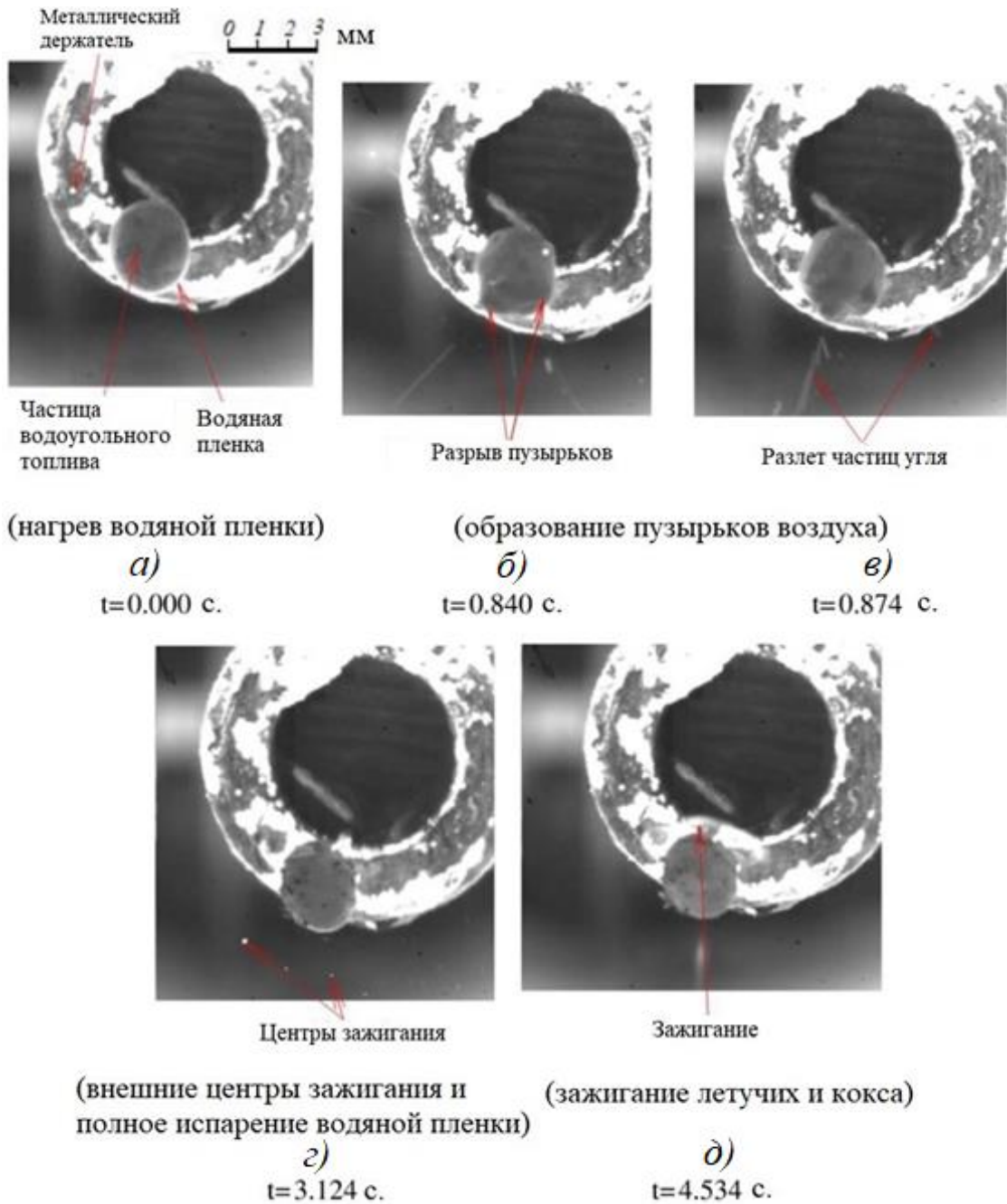


Рисунок 2.3.1 — Типичные кадры процесса воспламенения частиц водоугольного топлива (изготовленной из длиннопламенного угля), покрытых водяной пленкой

ные участки). Объясняется это тем, что в условиях высокотемпературного нагрева вода может поглощать тепловое излучение внутри всего объема. Анализ кадров б и в показывает, что форма частицы в процессе нагрева (за время $0,09 \cdot t_{\text{ign}} < t < 0,12 \cdot t_{\text{ign}}$) претерпевает значительные трансформации, вследствие объемного кипения водяной пленки, при этом мы можем видеть образование локальных центров воспламенения (кадр г) во внешней газовой области. Это объясняется тем, что кипение воды и интенсивное испарение воды вызывает диспергирование поверхности частицы ВУТ (ее суспензионной части). Последнее приводит

к выбросу мелких частиц угля за пределы капли ВУТ (в высокотемпературную окислительную среду). По истечении времени $t \geq 0,7 \cdot t_{\text{ign}}$ водяная пленка полностью испаряется (кадр г). В результате образуется агломерат частиц воды. При $t = t_{\text{ign}} = 4,534$ с происходит газозное воспламенение топлива (кадр д).

На Рисунке 2.3.2 представлены кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения частицы водоугольного топлива, покрытой водной пленкой, приготовленной на основе бурого угля Канско – Ачинского бассейна. Анализ кадров показывает, что динамика воспламенения частиц ВУТ на основе бурого угля аналогична (в природе основных этапов термической подготовки) процессу зажигания частиц ВУТ на основе угля марки «Д» (Рисунок 2.3.1). Однако есть существенные отличия: при попадании капли ВУТ (на основе бурого угля) в пространство высокотемпературной среды период нагрева пленки намного меньше по сравнению с водоугольными частицами на основе длиннопламенного угля. Это можно объяснить тем, что теплопроводность угля существенно зависит от степени его метаморфизма (λ бурых меньше λ длиннопламенных углей). Соответственно можно обоснованно предположить, что в процессе термической подготовки капель ВУТ (на базе угля «Б») тепловая энергия аккумулируется в толще пленки. Также анализируя серию кадров а – г можно отметить, что при кипении приповерхностного водяного слоя в пространстве вокруг частицы формируются «центры» воспламенения. Временные характеристики процессов термической подготовки (время испарения пленки t_{ewf}) и воспламенения (время задержки воспламенения t_{ign}) показаны ниже. На основе детального анализа кадров типичных видеогамм сформулированы физическая и математическая модели процесса зажигания существенно неоднородных частиц водоугольного топлива, покрытых водяной пленкой.

В начальный момент времени ($t = 0$) покрытая водой частица ВУТ вводится в высокотемпературную газовую среду и нагревается за счет конвекции и излучения (Рисунок 2.3.3). В результате начинается испарение водяной пленки. После удаления приповерхностного слоя воды образуется водноугольный агломерат. В условиях продолжающегося нагрева происходит дальнейшее обезвоживания суспензионной части топлива. Фронт испарения движется от поверхностных слоев топлива к глубинным. В частице образуется существенно неоднородная структура, состоящая из исходного (насыщенного влагой) топлива и пористого углеродного каркаса с высоким термическим сопротивлением. Нагрев такого топлива приводит к повышению температуры. Когда температура поверхности T_{sf} достигает критического значения, частица водоугольного топлива воспламеняется. Разработка аналитического решения существенно нелинейной задачи воспламенения неоднородной частицы водоугольного топлива, поверхность которой покрыта

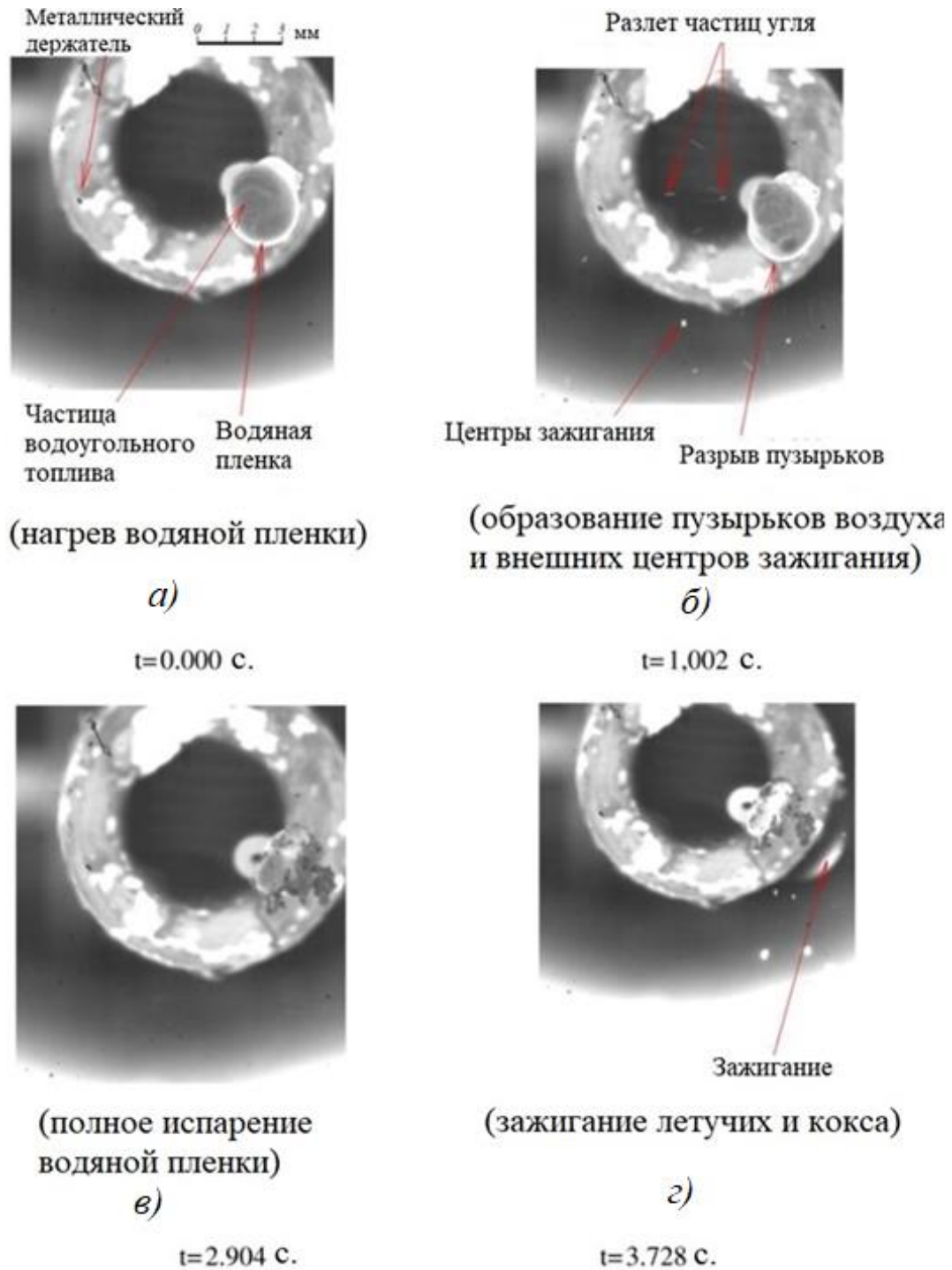


Рисунок 2.3.2 — Типичные кадры процесса воспламенения частиц водоугольного топлива из бурого угля, покрытого водяной пленкой

водяной пленкой, возможна при дискретизации процесса на характерные стадии: прогрев пленки воды, ее испарение, обезвоживание основного слоя топлива, зажигание сухого угля. Подробный вывод аналитических решений каждой из вышеперечисленных задач приведен в приложении Б [163]. Время задержки зажигания t_{ign} рассчитывается по формуле:

$$t_{ign} = t_{hf} + t_{ewf} + t_{eva} + t_{sti} + t_{ind} \quad (2.3.1)$$

где t_{hf} – время нагрева водяной пленки; t_{ewf} – время испарения пленки воды; t_{eva} – время сушки частицы ВУТ; ($t_{sti}+t_{ind}$) – время индукции.

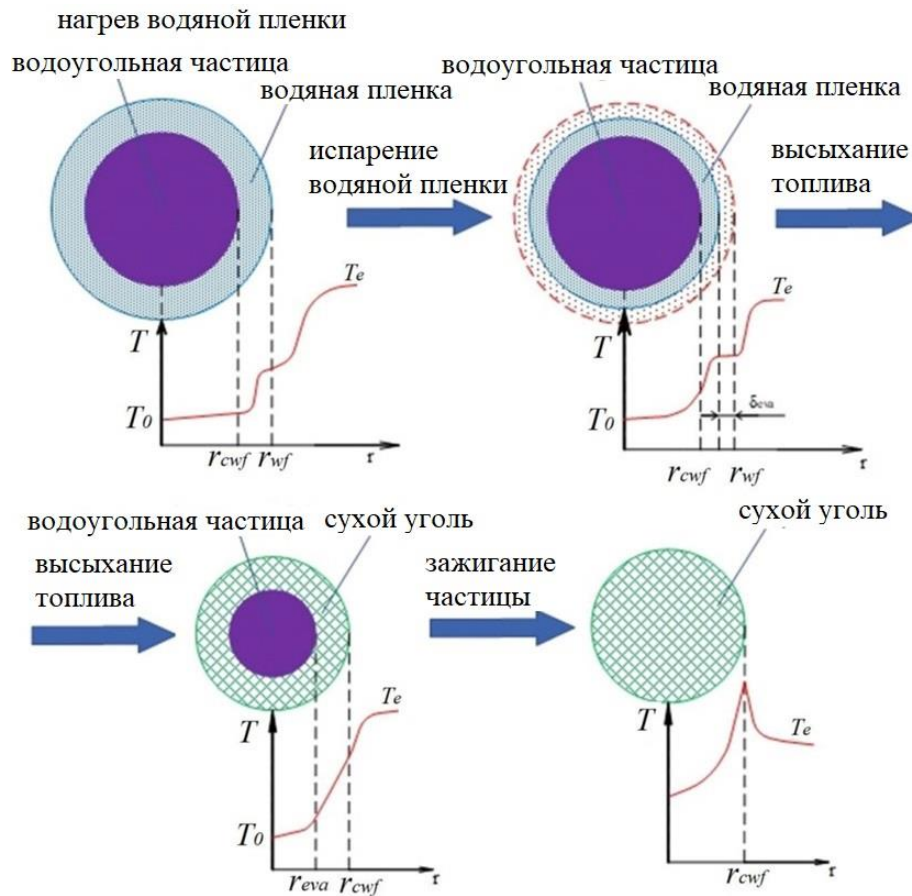


Рисунок 2.3.3 — Схема области решения зажигания

На Рисунке 2.3.4 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса испарения водяной пленки при воспламенении частицы ВУТ на основе бурого угля в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов. Анализ кривых (1) – (6) показывает, что времена испарения пленки (t_{ewf}) при температуре внешней среды $T_e = 1273\text{K}$ отличаются от t_{ewf} при $T_e = 1073\text{K}$ незначительно (относительное отклонение $\delta t \leq 10\%$). Это связано с тем, что в условиях высокотемпературного нагрева ($T_e > 1073\text{K}$) радиационная составляющая теплового потока существенно выше чем конвективная. По этой причине нагрев пленки происходит гораздо быстрее, чем испарение воды. В этом случае из анализа зависимостей на Рисунке 2.3.4 видно, что в условиях высоких температур внешней среды размер частиц мало влияет на динамику испарения. Это можно объяснить тем, что в общем случае суспензионная часть капли ВУТ – термически тонкое тело по сравнению с водяной пленкой. При относительно низких температурах окружающей среды ($T_e \leq 800\text{K}$) испарение водной пленки происходит значительно дольше.

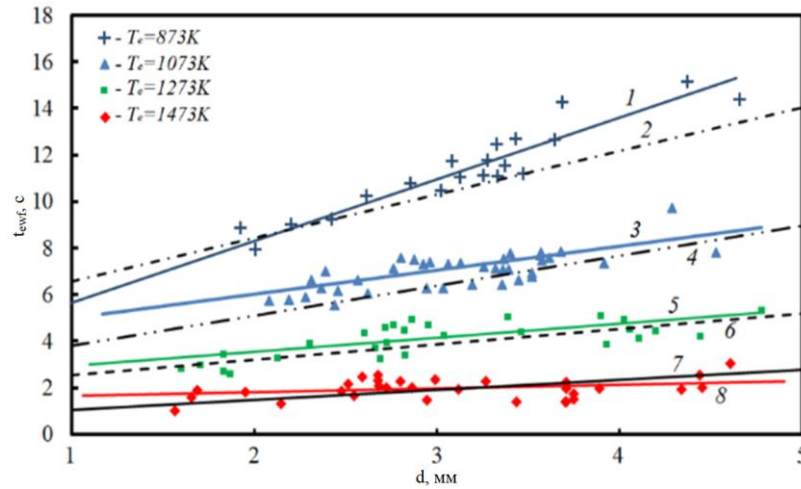


Рисунок 2.3.4 — Зависимость времени испарения водной пленки при воспламенении водоугольных частиц на основе бурого угля от диаметра частиц:

1,2 – $T_e = 873\text{K}$; 3, 4 – $T_e = 1073\text{K}$; 5,6 – $T_e = 1273\text{K}$; 7,8 – $T_e = 1473\text{K}$

2, 4, 6, 7 – теоретическое решение; 1, 3, 5, 8 – экспериментальные результаты

На Рисунке 2.3.4 также приведены результаты теоретических исследований процесса испарения водяной пленки в условиях, соответствующих топочному пространству котельных агрегатов. Можно отметить, что расчетные времена испарения удовлетворительно (в пределах доверительного интервала) согласуются с экспериментом.

На Рисунке 2.3.5 показаны времена испарения водяной пленки в случае воспламенения частиц водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что при относительно низких температурах ($T_e \leq 873\text{K}$) внешней среды динамика испарения существенно отличается от испарения слоя воды при $T_e \geq 1073\text{K}$. На Рисунке 2.3.5 также показано теоретически рассчитанное время испарения водной пленки. Полученные зависимости показывают хорошее соотношение теоретических и экспериментальных значений t_{ewf} (отличие t_{ewf} не превышает 8%).

Сравнительный анализ рисунков 2.3.4 и 2.3.5 показывает, что испарение водяной пленки в случае воспламенения буроугольных частиц ВУТ происходит значительно быстрее, чем при зажигании капель ВУТ на основе длиннопламенного угля. Это можно объяснить значительно более высоким термическим сопротивлением бурого угля по сравнению с длиннопламенным. Соответственно, в условиях интенсивного нагрева накопление тепла в водяной пленке буроугольных капель ВУТ происходит значительно быстрее.

На Рисунке 2.3.6 приведены зависимости времени задержки воспламенения частиц угольно – водяного топлива на основе бурого угля, покрытого водяной пленкой, в условиях, соответствующих топочным площадям котельных агрегатов. Анализ полученных результа-

тов показывает, что при высокотемпературном нагреве ($T_e > 873\text{K}$) продолжительность процесса испарения водяной пленки может составлять до 60% от общего индукционного периода. Это в первую очередь связано с тем, что в условиях интенсивного нагрева приповерхностная пленка воды закипает. В результате основной слой топлива нагревается до температур, близких к температуре кипения ($\sim 373\text{K}$). Соответственно, последующее удаление внутрипоровой влаги протекает гораздо быстрее.

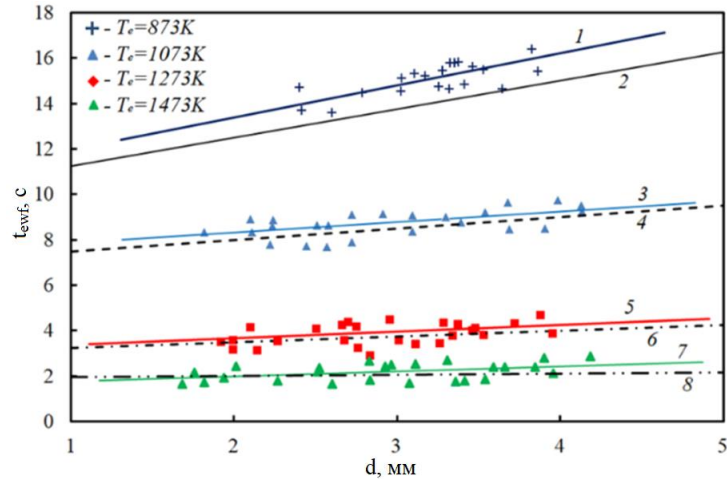


Рисунок 2.3.5 — Зависимость времени испарения водной пленки при воспламенении частиц ВУТ (на основе длиннопламенного угля) от диаметра частиц:

1,2 – $T_e = 873\text{K}$; 3, 4 – $T_e = 1073\text{K}$; 5,6 – $T_e = 1273\text{K}$; 7,8 – $T_e = 1473\text{K}$

2, 4, 6, 7 – теоретическое решение; 1, 3, 5, 8 – экспериментальные результаты

Также анализ зависимостей, приведённых на Рисунке 2.3.6, показывает существенные отличия интегральных характеристик процесса испарения приповерхностного слоя воды при температурах внешней среды $T_e \geq 1073$ и $T_e \leq 1073$. Так при $T_e = 873\text{K}$ время испарения пленки составляет менее 50% от t_{ign} . Как уже отмечалось ранее, это можно объяснить тем, что в условиях относительно низких температур внешней среды интенсивность теплового потока мала и, соответственно, не оказывает значимого влияния на скорость нагрева частицы ВУТ, вследствие эндотермического эффекта испарения водяной пленки. На Рисунке 2.3.6 также показаны теоретические значения t_{ign} . Можно отметить, что в области высоких температур внешней среды отклонения теоретических значений времени задержки воспламенения от экспериментальных значений не превышают 5%. Другая ситуация при $T_e \leq 873\text{K}$: отклонения теоретических и экспериментальных результатов значительны, но все же не превышают 15%.

На Рисунке 2.3.7 приведены экспериментальные и теоретические зависимости t_{ign} от размера частиц ВУТ на основе длиннопламенного угля, поверхность которого покрыта вод-

ной пленкой. Анализ полученных результатов позволяет сделать аналогичный (как и на Рисунке 2.3.9) вывод о значимом влиянии слоя воды на характеристики и условия воспламенения. Сравнительный анализ Рисунков 2.3.6 и 2.3.7 показывает, что бурого угольные частицы ВУТ воспламеняются гораздо быстрее, чем капли топлива на основе угля марки «Д». Последнее очевидно обусловлено тем, что бурые угля как правило более богаты летучими по сравнению с каменными углями. Также анализ зависимостей $t_{ign}(d)$ На Рисунке 2.3.7 показывает, что расчетные значения времени задержки зажигания удовлетворительно согласуются с экспериментом.

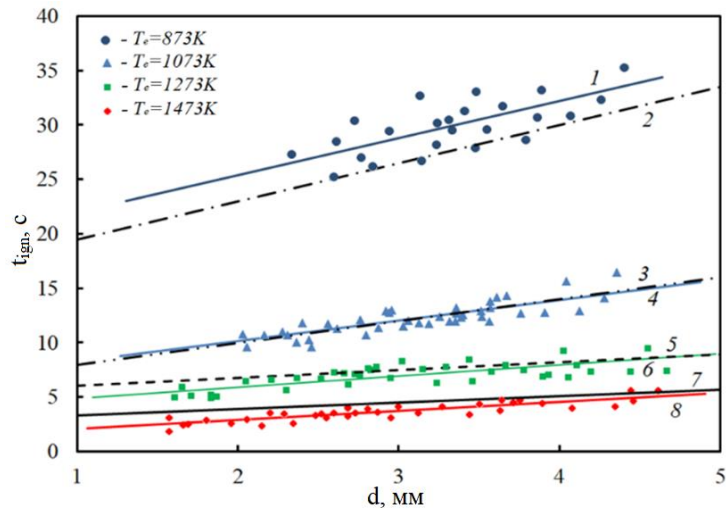


Рисунок 2.3.6 — Зависимость времени задержки воспламенения водоугольных частиц на основе бурого угля от размера частиц:

1,2 – $T_e = 873\text{K}$; 3,4 – $T_e = 1073\text{K}$; 5,6 – $T_e = 1273\text{K}$; 7,8 – $T_e = 1473\text{K}$

2, 4, 6, 8 – теоретическое решение; 1, 3, 5, 7 – результаты опытов

На Рисунке 2.3.8 показано отношение времени испарения водяной пленки к времени задержки воспламенения ($\Omega = t_{ewf}/t_{ign}$) в зависимости от размера частицы водоугольного топлива при различных температурах окружающей среды. Можно отметить, что практически во всем температурном диапазоне внешней среды t_{ewf} составляет до 60% (по экспериментальным значениям) и до 70% по теоретически рассчитанным значениям t_{ewf} от всего времени задержки воспламенения. Это связано с тем, что во время испарения водяной пленки происходит нагрев основного слоя топлива. В результате испарение внутрипористой влаги и воспламенение кокса происходит быстрее, чем при воспламенении частицы без водяной пленки.

Следует также отметить, что при относительно низких температурах окружающей среды ($T_e \leq 873$ К) значение $\Omega \approx 0,5$. Это связано с увеличением общего периода термической подготовки топлива к сжиганию (испарение водяной пленки и внутрипоровой влаги), а также времени воспламенения вследствие высоких затрат энергии на процессы фазового перехода и инициирования горения топлива.

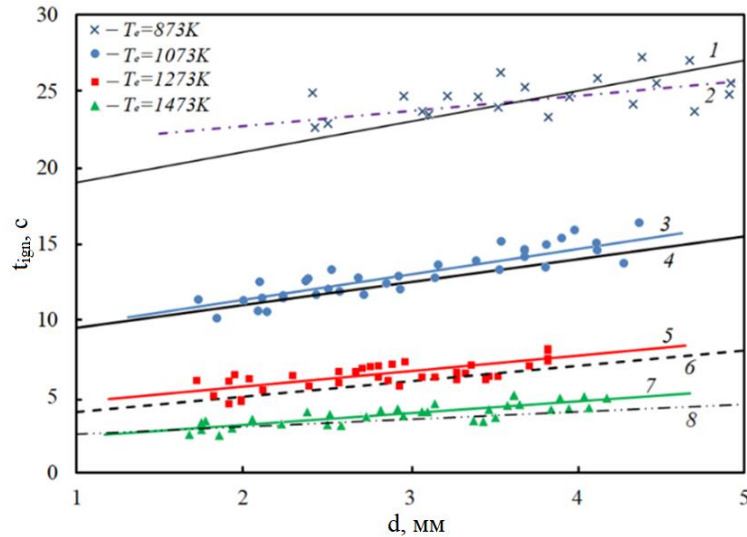


Рисунок 2.3.7 — Зависимость времени задержки воспламенения водоугольных частиц на основе длиннопламенного угля от размера частиц:

1,2 — $T_e = 873$ К; 3,4 — $T_e = 1073$ К; 5,6 — $T_e = 1273$ К; 7,8 — $T_e = 1473$ К
 2, 4, 6, 8 — теоретическое решение; 1, 3, 5, 7 — результаты опытов

После верификации (сравнения теоретических и экспериментальных значений времени задержки воспламенения) математической модели можно провести прогностическое моделирование процессов воспламенения частицы водоугольного топлива, покрытой водяной пленкой. Полученное приближенно — аналитическое решение задачи может быть легко реализовано в среде Matlab18b с применением методов распределенных вычислений.

На Рисунке 2.3.9 показаны зависимости времен задержки воспламенения частицы ВУТ от характерных размеров частицы топлива и температуры внешней среды (T_e), которые варьировались в достаточно широком диапазоне: $d = 1 \div 8$ мм и $T_e = 673 \div 1673$ К. Проанализировано 110 000 вариантов комбинаций d и T_e . Расчетное время составило 1054 секунды. Численное моделирование процессов воспламенения капли ВУТ (одной комбинации d и T_e) с использованием современных программных пакетов, как правило, занимает от 5 до 48 часов. Анализ зависимостей $t_{ign}(d, T_e)$ показывает, что с увеличением d и уменьшением T_e существенно возрастают задержки воспламенения. Например, при $d = 8$ мм и $T_e =$

673 К расчетное значение $t_{\text{ign}} \approx 140$ секунд. Скорее всего, это означает, что воспламенение частиц при таких значениях d и T_e не происходит.

В заключение можно сказать, что полученное приближенное аналитическое решение задачи воспламенения частицы ВУТ, покрытой водяной пленкой, может быть использовано при прогностическом моделировании термической подготовки и воспламенения капель топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания перспективных водоугольных котельных агрегатов. С помощью ЭВМ можно проводить масштабные расчеты, которые позволят выбирать наиболее эффективные параметры камер сгорания котельных агрегатов (размеры камеры сгорания, температурный режим камеры сгорания и горелочных устройств, скорость подачи окислителя).

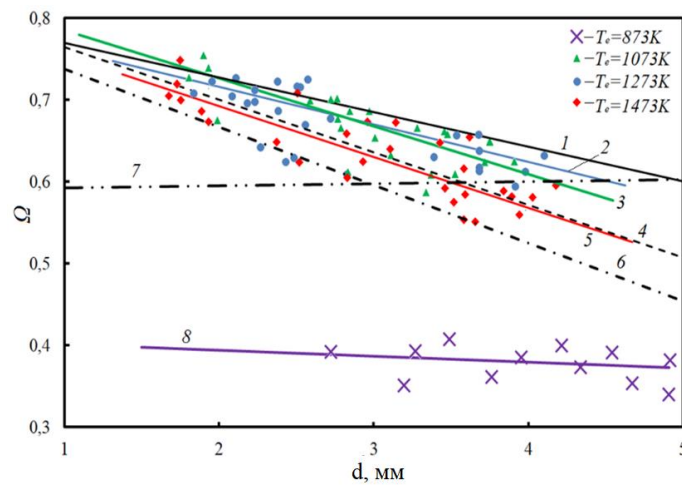


Рисунок 2.3.8 — Зависимость отношения времени испарения водной пленки к времени задержки воспламенения от размера частиц ВУТ:

7, 8 – $T_e = 873\text{K}$; 1, 3 – $T_e = 1073\text{K}$; 2, 4 – $T_e = 1273\text{K}$; 5, 6 – $T_e = 1473\text{K}$.

1, 4, 6, 7 – теоретическое решение; 2, 3, 5, 8 – результаты экспериментов

В целом можно сделать вывод, что приближенное аналитическое решение существенно нелинейной задачи воспламенения частиц угольно – водяного топлива (поверхность которого покрыта водяной пленкой), является объективной основой для значительного сокращения затрат времени (до 10 000 раз) на моделирование работы и выбор конструктивных параметров камер сгорания, сжигающих новые перспективные топливные композиции.

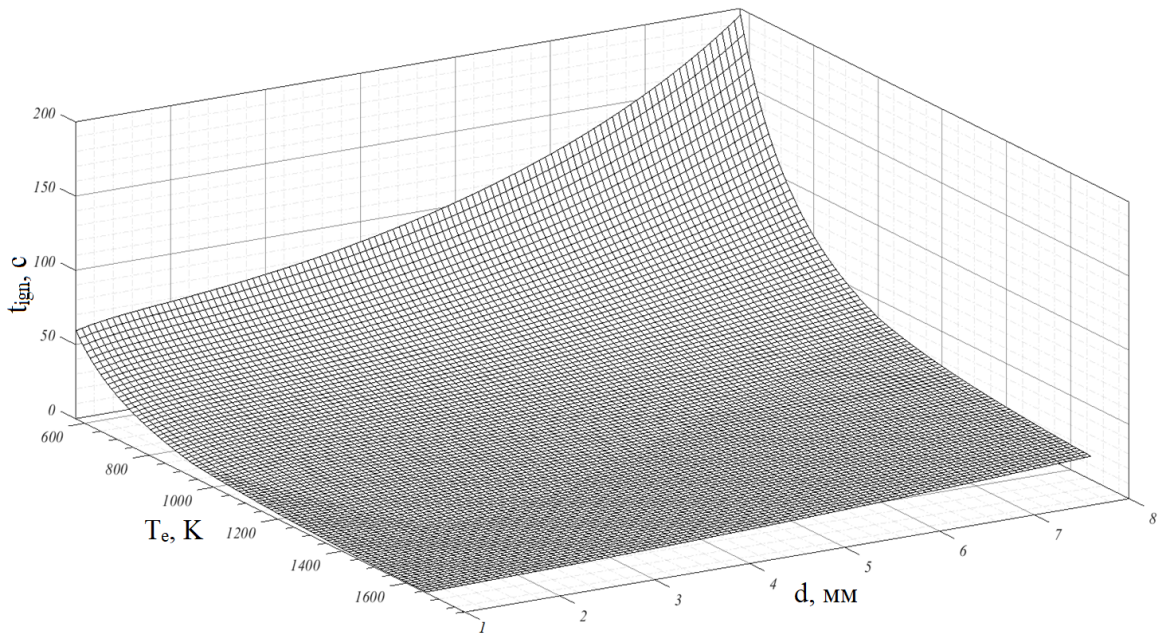


Рисунок 2.3.9 — Зависимость времен задержки воспламенения частиц водоугольного топлива, покрытых водяной пленкой (толщина $\delta = 1$ мм), от температуры внешней среды и диаметра частицы

2.4 Зависимости характеристик и условий воспламенения капель водоугольного топлива от степени метаморфизма угля

Известно [340], что на характеристики зажигания углей существенное влияние оказывает степень метаморфизма (каменные или бурые угли), марка и месторождение угля. Конструктивное обоснование выбора размеров и компоновки основных узлов котельных агрегатов, как правило, проводится по результатам исследований характеристик зажигания и горения сжигаемого твердого топлива.

Но проведенные ранее теоретические исследования не рассматривали в качестве основной функции цели анализ влияния группы значимых факторов, существенно влияющих на характеристики процесса зажигания. К таким, в частности, относятся: содержание летучих в топливе (V_0), их состав, различные теплофизические характеристики угля разной степени метаморфизма, отличающиеся по значениям эндо – и экзотермические тепловые эффекты процессов термического разложения для различных углей. Известно [341], что эти характеристики могут существенно отличаться в зависимости от марки угля и места расположения его месторождения. Поэтому цель этого параграфа диссертации – проведение (по

результатам численного моделирования процесса воспламенения) анализа влияния степени метаморфизма угля на характеристики и условия зажигания капель водоугольного топлива.

При физической постановке задачи зажигания, за базовую модель принята совокупность физических процессов, установленных ранее в [151] при проведении экспериментальных исследований процесса зажигания частиц водоугольного топлива.

Математическая модель задачи воспламенения ВУТ, соответствующая физической модели, отличается от представленных выше (раздел 2.1) рассмотрением всего комплекса теплофизических и термохимическим процессов в плоской (двумерной) постановке задачи зажигания.

Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии. Оно учитывает испарение влаги, термическую деструкцию, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, а также фильтрационный тепло – и массоперенос:

$$\frac{\partial H_{wcf}}{\partial t} + C_s \rho_s \left(U_s \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_s}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \Phi(r - r_{eva}, \theta - \theta_{eva}) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_{wcf} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \theta}{r} \lambda_{wcf} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) - \frac{Q_{eva} W_{eva}}{h_{spr}} \delta(r_{eva}, \theta_{eva}) - \sum_{i=1}^{i=2} Q_i \cdot W_i ; \quad (2.4.1)$$

где
$$\sum_{i=1}^{i=2} Q_i W_i = Q_{c \rightarrow vol} W_{c \rightarrow vol} + Q_{C+H_2O} W_{C+H_2O} ;$$

$$H_{wcf} = C_{wcf}(r, \theta, t) \rho_{wcf}(r, \theta, t) T(r, \theta, t);$$

$\delta(r_{eva}, \theta_{eva})$ – функция Дирака. $\Phi(r - r_{eva}, \theta - \theta_{eva})$ – функция Хэвисайда. Теплофизические характеристики (λ_{wcf} , C_{wcf} и ρ_{wcf}) рассчитываются с учетом положения фронта испарения. Массовая скорость испарения (W_{eva} [кг/(м²с)]) вычислялась из выражения [128]:

$$W_{eva} = W_f \cdot \exp \left[\frac{Q_{wat} \cdot \mu \cdot (T(r_{eva}, \theta_{eva}) - T_f)}{R \cdot T_f \cdot T(r_{eva}, \theta_{eva})} \right]; \quad (2.4.2)$$

Координата границы испарения находилась из выражения:

$$r_{eva} = r_{out} - \int_0^{\tau} u_F d\tau ; \quad (2.4.3)$$

где $u_F = W_{eva}/\rho$ – линейная скорость движения фронта испарения, м/с.

Распределение давления по радиусу частицы вычислялись при решении уравнения пьезопроводности:

$$\Pi \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{K_p}{\nu \beta} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \theta}{r} \frac{K_p}{\nu \beta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\rho \beta} \sum_{i=1}^{i=2} f_i ; \quad (2.4.4)$$

$$\sum_{i=1}^{n=2} f_i = \frac{W_{c \rightarrow vol} + W_{C+H_2O \rightarrow CO+H_2}}{s};$$

Скорость фильтрации пара определялась из дифференциального выражения закона Дарси:

$$U_s = -\frac{K_p}{v} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad \text{в радиальном направлении} \quad (2.4.5)$$

$$V_s = -\frac{K_p}{v} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta}; \quad \text{в азимутальном направлении} \quad (2.4.6)$$

Распределение температуры в слое газа вокруг частицы описывается уравнением энергии:

$$C_g \rho_g \frac{\partial T}{\partial t} + C_g \rho_g \omega(r) \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_g \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \theta}{r} \lambda_g \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \sum_{i=1}^{i=3} Q_i W_i; \quad (2.4.7)$$

Где: $\sum_{i=1}^{n=3} Q_i W_i = Q_{CH_4+O_2} W_{CH_4+O_2} + Q_{CO+O_2} W_{CO+O_2} + Q_{H_2+O_2} W_{H_2+O_2};$

$\omega(r)$ – скорость движения парогазовой смеси м/с. Последняя вычислялась по формуле [342]:

$$\omega(r) = U_s(r_{out}, \theta, t) \cdot \frac{0.96}{\frac{0.07 \cdot r}{s} + 0.29}; \quad (2.4.8)$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial r} = K_\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T|_{r=r_0}^4) + Q_{C+O_2} \cdot W_{C+O_2}}{\lambda_{wcf}}; \quad (2.4.9)$$

$$T(r, \theta, t)|_{r=r+0} = T(r, \theta, t)|_{r=r-0}.$$

Здесь – $K_\lambda = \lambda_g / \lambda_{wcf}$. Скорость реакции $C+O_2 = CO_2 + 18.67 \text{ МДж/кг}$ вычислялась с использованием математического выражения закона Аррениуса. При постановке задачи принято, что водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с углем. Скорость этой реакции $C+H_2O = CO+H_2 - 118.485 \text{ МДж/кг}$ вычислялась по закону Аррениуса [339]. Процесс термического разложения описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = [1 - \eta] \cdot k_{c \rightarrow vol} \cdot \exp\left(-\frac{E_{c \rightarrow vol}}{R \cdot T}\right); \quad (2.4.10)$$

Принято, что в непосредственной близости от поверхности частицы учитывалось протекание трех наиболее значимых реакций по аналогии с [151]. Концентрации компонентов

парогазовой смеси в пристенной области рассчитывались при решении уравнений диффузии для соответствующего компонента реакции:

$$\rho_g \frac{\partial c_i}{\partial t} + \rho_g \omega(r) \frac{\partial c_i}{\partial r} = \rho_g \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_i \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) + \frac{\rho_g}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \theta}{r} D_i \frac{\partial c_i}{\partial \theta} \right) - \sum_{i=1}^{i=3} W_i; \quad (2.4.11)$$

При постановке задачи учитывалось изменение плотности и пористости топлива:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = (\rho - \rho_{etd}) \cdot k_{w \rightarrow vol} \cdot \exp \left(-\frac{E_{w \rightarrow vol}}{R \cdot T} \right); \quad (2.4.12)$$

$$\Pi_p = \Pi_0 \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho_{etd} - \rho_0}; \quad (2.4.13)$$

Система уравнений решалась при следующих начальных:

$$t = 0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T(r, \theta, 0) = T_0 = 298K, \quad p(r, \theta, 0) = p_{atm}, \\ \rho(r, \theta, 0) = \rho_0; \quad \eta(r, \theta, 0) = 0; \end{array} \right\} \quad 0 < r < r_{out}, \quad 0 < \theta < \pi;$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(r, \theta, 0) = T_g, \quad c_i(r, \theta, 0) = 0; \end{array} \right\} \quad r_{out} < r < r_g, \quad 0 < \theta < \pi$$

и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (2.4.14) \quad \left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\substack{0 < r < r_g \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0; \quad (2.4.15) \quad \left. \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right|_{\substack{r=r_g \\ 0 < \theta < \pi}} = 0; \quad (2.4.16)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial \theta} \right|_{\substack{0 < r < r_{out} \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0; \quad (2.4.17) \quad p|_{\substack{r=r_{out} \\ 0 < \theta < \pi}} = p_{atm}; \quad (2.4.18) \quad \left. \frac{\partial c_i}{\partial r} \right|_{\substack{r=r_{out} \\ 0 < \theta < \pi}} = \frac{W_i}{\rho_g \cdot D_i}; \quad (2.4.19)$$

$$\left. \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \right|_{\substack{r=r_g \\ 0 < \theta < \pi}} = 0; \quad (2.4.20) \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \theta} \right|_{\substack{0 < r < r_g \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0; \quad (2.4.21) \quad \left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{\substack{r=0 \\ 0 < \theta < \pi}} = 0; \quad (2.4.22)$$

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г.

На Рисунке 2.4.1 приведены времена задержки зажигания капель водоугольного топлива, выполненных из каменных углей различных марок: длиннопламенный «Д», газовый «Г», жирный «Ж», коксовый «К», отощенный спекающийся «ОС», тощий «Т», полуантрацит «ПА» и антрацит «А». С целью верификации математической модели на Рисунке 2.4.1 приведены экспериментальные значения t_{ign} воспламенения частиц ВУТ на основе угля «Д». Можно отметить, что теоретические и экспериментальные времена задержки воспламенения достаточно хорошо (в пределах доверительного интервала $\pm 17\%$) согласуются.

Анализ зависимостей показывает, что в условиях относительно высоких температур

($T_g \geq 1073\text{K}$) времена задержки зажигания частиц ВУТ, выполненных из каменных углей различных марок, отличаются незначительно (не более 10%). В тоже время при низких температурах внешней среды ($T_g \approx 1073\text{K}$) значения t_{ign} для ВУТ на основе каменных углей отличаются существенно. Последнее скорее всего свидетельствует о том, что при воспламенении каплей ВУТ определяющую роль играют теплофизические процессы (инертный нагрев за счет радиации и конвекции, испарение воды), протекающие при термической подготовки, а не кинетика зажигания. Скорее всего длительность периода зажигания определяется сочетанием теплофизических (теплопроводность λ , теплоемкость C , плотность ρ) и термохимических свойств (теплота термического разложения).

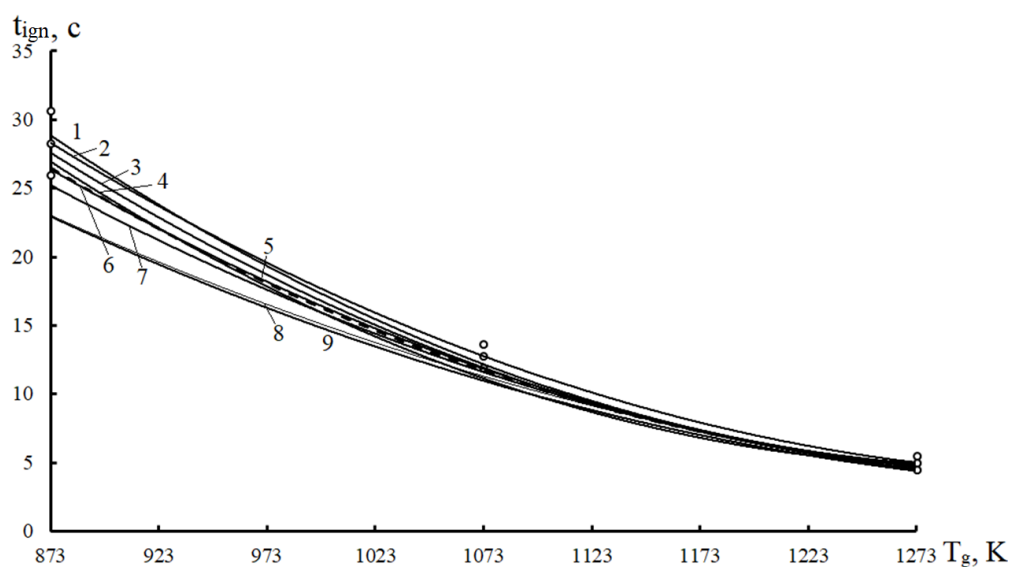


Рисунок 2.4.1 — Зависимость времен задержки воспламенения частиц водоугольного топлива (размером 3 мм), выполненных из углей различных марок, от температуры внешней среды:

1 – «Ж»; 2 – «Д» – эксперимент; 3 – «К»; 4 – «Г»; 5 – «Д» (численное решение системы (1) – (33)); 6 – «ОС»; 7 – «Т»; 8 – «ПА»; 9 – «А»

Анализ зависимостей показывает, что частицы ВУТ на основе антрацита и полуантрацита воспламеняются быстрее остальных практически во всем диапазоне температур внешней среды. Это обусловлено малым значением теплоемкости топлива и высоким содержанием углерода. Медленнее всего зажигаются частицы ВУТ, выполненные из жирных углей. Последнее обусловлено более высокими теплоемкостью и теплотой термического разложения базового топлива.

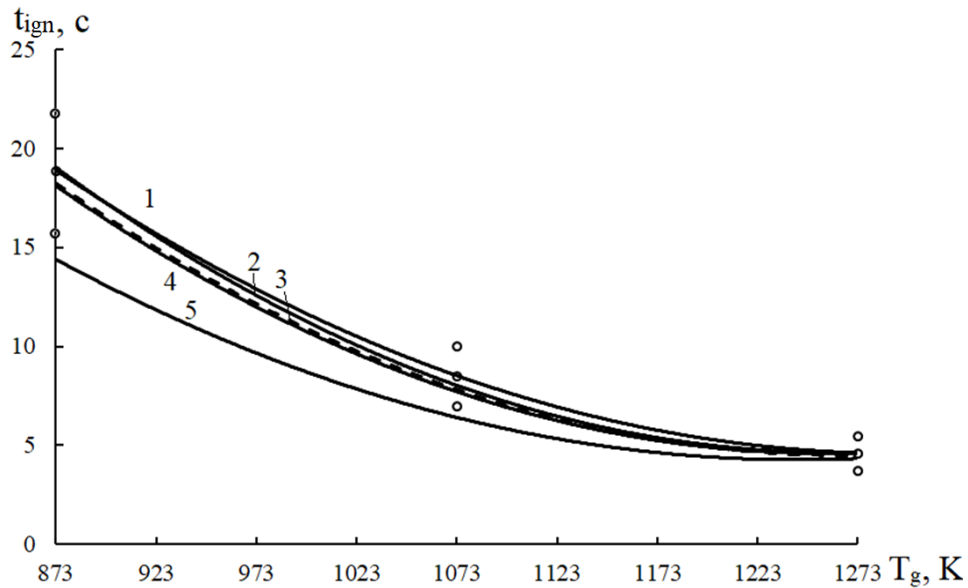


Рисунок 2.4.2 — Времена задержки воспламенения частиц водоугольного топлива, выполненных из бурых углей, в зависимости от температуры:

1 – Березовское месторождение (эксперимент [151], см. §2.2); 2 – Ирша – Бородинский уголь; 3 – Березовское месторождение (численное решение); 4 – Гусиноозерске месторождение; 5 – Новодмитровское месторождение

На Рисунке 2.4.2 приведены времена задержки воспламенения частицы ВУТ на основе бурых углей в зависимости от температуры внешней среды. Также с целью верификации математической модели приведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений t_{ign} . Последний показал хорошее их соответствие. Проанализировав зависимости можно сказать, что быстрее всего воспламеняются топливные частицы, подготовленные из углей Новодмитровского месторождения. Это обусловлено, во – первых, низкими значениями теплоемкости базового топлива и теплотой термического разложения по сравнению с другими углями. Также необходимо отметить, что уголь Новодмитровского месторождения содержит достаточно большое количество летучих и углерода в своей структуре. Результаты сравнительного анализа времен задержки зажигания, полученных численно и экспериментально [151], показали их удовлетворительное соответствие.

2.5 Влияние радиационного теплопереноса на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива

Несмотря на проведенные ранее обширные теоретические исследования процессов зажигания капель ВУТ (например [151 – 158]), до сих пор не изучено влияние теплового

излучения внешней среды на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива. При этом известно [316], что радиационный теплообмен в топочной камере, обусловленные излучением трехатомных газов (водяные пары и диоксид углерода) играет привалирующую роль в процессах зажигания топлива. Как показали экспериментальные исследования сжигание топлива в топке формируется существенно неоднородное по спектру [343] и по пространству [344] поле излучения. Это вызвано турбулизацией потока продуктов сгорания [345]. Соответственно, можно обоснованно предположить, что в топочном пространстве интенсивность теплового излучения будет существенно неравновесна и неравномерна распределены. Но пока влияние фактора теплового излучения на характеристики и условия воспламенения частиц ВУТ практически не изучено. Соответственно целью настоящей параграфа диссертации является математическое моделирование процессов тепло – и массопереноса, протекающих совместно при воспламенении частицы водоугольного топлива, и анализ влияния теплового излучения на характеристики и условия зажигания.

Решена система дифференциальных уравнений, описывающих основные процессы, протекающие при воспламенении, приведенной выше (раздел 2.4). При проведении теоретических исследования рассматривались три модели радиационного теплопереноса [180]. Радиационный нагрев учитывался в граничных условиях 4 – го рода, которые выполняются на границе раздела система «частица топлива – высокотемпературный газ»:

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = K_{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial R} + Ki_{rad} + Ki_{C+O_2}; \quad (2.5.1)$$

Сначала исследовались процессы воспламенения при рассмотрении процесса радиационного теплообмена в рамках закона Стефана–Больцмана [346]:

$$Ki_{rad} = \frac{\varepsilon_{wcf}(T) \sigma (T_g^4 - T^4|_{R=R_{out}}) r^*}{\lambda \Delta T}; \quad (2.5.2)$$

В [151] капли ВУТ помещались в канал керамического цилиндра с диаметром $d = 0,05$ м. Принято, что воздух – оптически тонкая среда [144]. Соответственно, геометрия пространства (совокупностью расположения и форм источника и приемника излучения) является оказывающим существенное влияние фактором. Соответственно, представляет интерес вопрос: как влияет расположение и частицы топлива и форма нагревателя на характеристики и условия воспламенения. В этом случае радиационный тепловой поток рассчитывается по формуле [346]:

$$Ki_{rad} = \frac{\sigma \left(T_{cil}^4 - T^4 \Big|_{R=R_{out}} \right) r^*}{\lambda \Delta T \left[\frac{1}{\varepsilon_{wcf}(T)} + \left(\frac{R_{out}}{R_{cil}} \right)^2 \left(\frac{1}{\varepsilon_{cil}} - 1 \right) \right]}; \quad (2.5.3)$$

В тоже время известно [347], что воздух при температурах $T_g \geq 1200\text{K}$ способен поглощать тепловые фотоны. Представляет интерес вопрос оценки влияния поглощения радиационного теплового потока воздухом на характеристики и условия зажигания. В соответствии с приближением диффузии теплового излучения [346] поток теплового излучения рассчитывается по формуле:

$$Ki_{rad} = \frac{\varepsilon_{wcf}(T) \sigma \left(T_g^4 - T^4 \Big|_{R=R_{out}} \right) r^*}{\lambda \Delta T} \psi; \quad (2.5.4)$$

$$\text{где } \psi = (1 + E_{wcf}) \left\{ \frac{3}{8} \left[\alpha d_{out} \left(1 - \frac{d_{out}}{d_{cil}} \right) + 2 \frac{1 - (d_{out}/d_{cil})^3}{\alpha \cdot d_{out}} \right] + \left(E_{wcf} + \frac{1}{2} \right) + \frac{d_{out}^2}{d_{cil}^2} \cdot \left(E_{cil} + \frac{1}{2} \right) \right\}^{-1};$$

$E_j = (1 - \varepsilon_j) / \varepsilon_j$ α – средний по Планку [346] коэффициент поглощения излучения.

В экспериментах [151] в качестве окислителя использовался воздух, в котором отсутствовали рассеивающие примеси. В этих условиях рассеивание света является Рэлеевским, и на таких малых масштабах оно пренебрежимо мало [348].

Верификация математической модели проводилась методом сравнительного анализа значений времен задержки зажигания частиц водоугольного топлива, полученных экспериментально и теоретически, в условиях высокотемпературного нагрева в среде окислителя по аналогии с §2.4 [151]. На Рисунке 2.5.1 приведены значения t_{ign} в зависимости от диаметра частиц водоугольного топлива при различных T_g . Проведен анализ влияния радиационного теплообмена на характеристики и условия зажигания. Можно сказать, что размер частицы ВУТ оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Так увеличение d с 1мм до 3 мм приводит к возрастанию t_{ign} практически в 6 раз (при $T_g = 973\text{K}$).

Анализ зависимостей, приведенных на Рисунке 2.5.1 показывает, что радиационный теплоперенос может оказывать существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Можно отметить, что условное «зануление» Q_{rad} приводит к значительному возрастанию расчетного значения t_{ign} . Наиболее отчетливо такое увеличение t_{ign} проявляется в условиях малых температур внешней среды для частиц диаметром $d = 3$ мм.

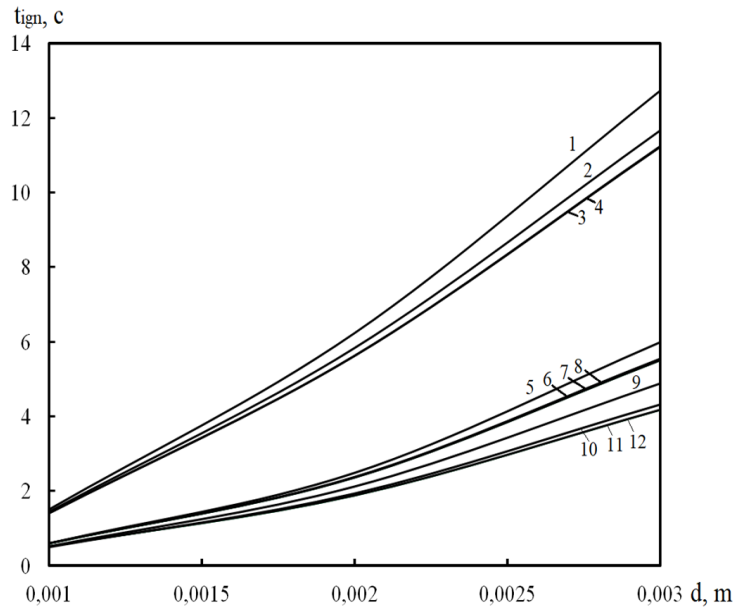


Рисунок 2.5.1 – Времена задержки воспламенения в зависимости от характерных размеров частицы ВУТ. Модели радиационного теплопереноса: 1, 5, 9 – $Q_{rad} = 0$; 2, 6, 10 – расчет по формуле (2.5.2); 3, 7, 11 – расчет по формуле (2.5.3); 4, 8, 12 – расчет по формуле (2.5.4); (1– 4) – $T_g = 970$ К, (5– 8) – $T_g = 1070$ К; (9 – 12) – $T_g = 1270$ К

Можно отметить (Рисунок 2.5.1), что времена задержки зажигания полученные с использованием модели радиационного теплопереноса типа «серая стенка» без учета угловых коэффициентов [349], и при их учете [348] практически не отличаются. Это обусловлено тем, что в экспериментах (раздел 2.2) площадь излучающей поверхности много больше площади поверхности топливной частицы ($S_{wcf} \ll S_{cil}$). Соответственно можно сделать вывод, что член выражения (2.5.3):

$$\left(\frac{R_{out}}{R_{cil}} \right)^2 \Rightarrow 0;$$

Тогда условие (2.5.3) преобразуется к следующему виду:

$$Ki_{rad} = \frac{\sigma \left(T_{cil}^4 - T^4 \Big|_{R=R_{out}} \right) r^*}{\lambda \Delta T \left[\frac{1}{\varepsilon_{wcf}(T)} + \left(\frac{R_{out}}{R_{cil}} \right)^2 \left(\frac{1}{\varepsilon_{cil}} - 1 \right) \right]} \Rightarrow \frac{\varepsilon_{wcf}(T) \sigma \left(T_g^4 - T^4 \Big|_{R=R_{out}} \right) r^*}{\lambda \Delta T} \equiv Ki_{rad} ;$$

Другими словами, выражение (2.5.3) обращается в условие (2.5.2). Проанализировав Рисунок 2.5.1 можно отметить, что значения времен задержки воспламенения, рассчитанные с использованием модели радиационного теплопереноса в рамках модели [346], больше t_{ign} , полученных при применении моделей [349], и меньше t_{ign} , рассчитанных при условии $Q_{rad} = 0$. Это обусловлено тем, что при использовании метода [346] учитывается ослабление

теплового потока за счет поглощения теплового излучения внешней средой (воздухом). Соответственно, интенсивность нагрева за счет излучения снижается.

Важным вопросом при построении общей теории зажигания водоугольных топлив является установление доли периода термической подготовки (t_{ht}) во времени задержки зажигания. Последнее обусловлено обоснованием незначительности фактора кинетической стадии (периода непосредственного химического реагирования). С целью проведения такого асимптотического анализа введем в рассмотрение скорость нагрева частицы ВУТ:

$$\Theta = \frac{d\bar{T}}{dt};$$

где

$$\bar{T} = \frac{1}{V} \iiint T(r, \theta, \varphi, t) dV;$$

С целью установления доли t_{ht} в t_{ign} выделим $o(\Theta)$. Для этого воспользуемся методом нахождения минимума функционала Θ на частных интервалах:

$$\psi = \min \left\{ \int_t^{t+\tau} [\Theta(\tau) - \bar{\Theta}] dt \right\};$$

где $\bar{\Theta}$ – средне квадратичное значение Θ . Из условия минимума функции Θ можно определить время начала термохимического реагирования горючего с окислителем.

На Рисунке 2.5.2 приведена зависимость $\psi(t)$ при зажигании частиц водоугольного топлива диаметром $d = 3$ мм при использовании модели теплопереноса «серая стенка» [349] и температуре внешней среды $T_g = 1270$ К. Наименьшее значение ψ (экстремум) соответствует моменту времени начала процесса иницирования горения газообразных продуктов пиролиза угля с окислителем. Можно отметить время начала термохимического реагирования $t_{sti} = 0.98 \cdot t_{ign}$. Соответственно можно обоснованно сделать вывод, что при воспламенении капли водоугольного топлива преобладающую роль играет комплекс протекающих в предшествующий непосредственно зажиганию период времени процессов (или другими словами термическая подготовка топлива).

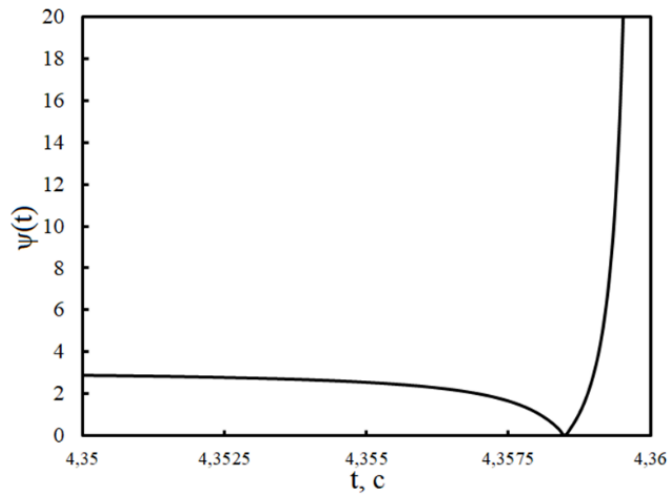


Рисунок 2.5.2 – Зависимость функции ψ от времени

2.6 Зажигание частиц водоугольного топлива в потоке высокотемпературного газа

Стоит сказать, что разработанные математические модели (разделы 2.1 – 2.5) процесса зажигания капли водоугольного топлива не описывали процессы тепло – и массопереноса в малой окрестности топливной частицы при обдуве последней высокотемпературным окислителем. Но проведенные эксперименты по зажиганию капель многокомпонентных суспензионных топлив [161] в реакционной трубе показали, что при обдуве частицы вокруг неё формируется достаточно сложной формы аэродинамический спектр. Последний может оказать значимое влияние на характеристики и условия зажигания частицы топлива. Так эксперименты [158] показали, что газофазное зажигание водоугольной частицы происходит на ее поверхности и в аэродинамическом следе. Аналитический обзор научных периодических изданий, посвященный математическому описанию процессов воспламенения и горения водоугольных топлив, показывает, что в настоящее время не разработано математических моделей зажигания капель ВУТ, описывающих процессы протекающих в пограничном слое капли топлива, при обдувании последней высокотемпературным окислителем. Последнее связано с большими трудностями при моделировании неравномерного нагрева капли топлива в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение органической части угля, термохимическое взаимодействие водяного пара и углерода кокса) превращений. Последнее связано с формированием в структуре топливной частицы постоянно перемещающейся очень малой по размерам зоны

с высоким эндотермическим эффектом – фронт испарения. Его геометрическая форма в общем случае существенно нелинейная и зависит распределения тепловых потоков внутри частицы ВУТ. Характеристики процесса воспламенения водоугольного топлива в таких условиях могут существенно отличаться от аналогичных характеристик при воспламенении частицы в неподвижной среде. По этой причине целью работы, результаты которой приведены в этом параграфе является математическое моделирование процессов тепло-массо-переноса, протекающих при воспламенении частицы водоугольного топлива в условиях ее обтекания потоком воздуха, нагретого до высоких температур.

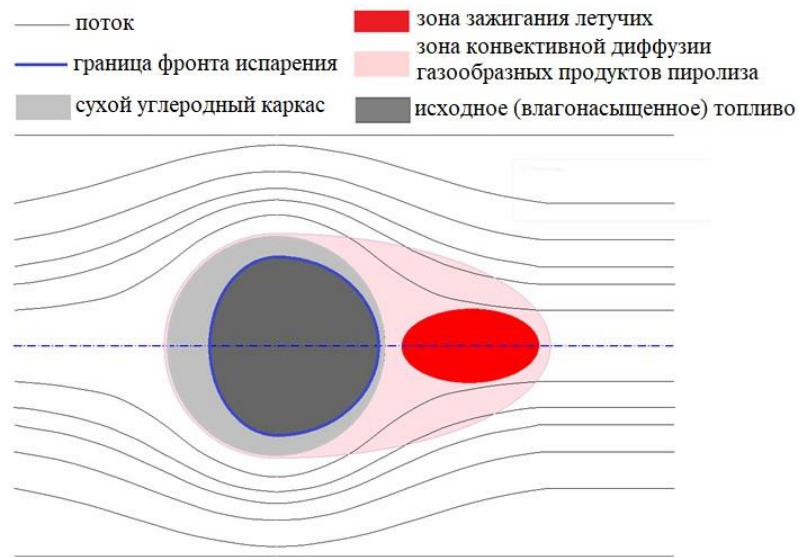


Рисунок 2.6.1 — Схема области решения задачи

При постановке задачи зажигания принята физическая модель (Рисунок 2.6.1), описывающая основные комплекс физико – химических процессов, протекающих совместно при воспламенении каплей водоугольного топлива, движущихся в потоке высокотемпературного окислителя. По совокупности теплофизических, термохимических процессов физическая модель соответствует приведенной в разделе 2.1 модели зажигания капли водоугольного топлива. Отличие заключается в том, что газообразные продукты пиролиза, водяные пары и продукты их термохимического взаимодействия с углеродом кокса при вдуве в пограничный слой частицы подхватываются набегающим потоком окислителя и уносятся областью аэродинамической тени где формируют парогазовую смесь воспламеняющуюся при критических значениях температур и концентрациях (Рисунок 2.6.1).

Математическая постановка задачи воспламенения ВУТ, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных переменных. Область решения задачи – «частица ВУТ – газовая среда» (Рисунок 2.6.1). В период термической подготовки каплю ВУТ

можно условно разделить на две зоны: исходное (насыщенное влагой) топливо и сухой угольный каркас. Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии:

$$\frac{1}{Fo_{wcf}} \frac{\partial E_{wcf}}{\partial \tau} - C_{gm} P_{gm} \frac{Pe_{gm}}{Da} \left(\frac{\partial H}{\partial R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial H}{\partial \Phi} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) \Psi(\xi_{eva}) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \Lambda_{wcf} \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} \Lambda_{wcf} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) - \frac{Ku \cdot \Delta(\xi_{eva})}{\Omega_{eva}} \frac{d\xi_{eva}}{d\tau} - \sum_{i=1}^{n=2} Po_i \Psi(\xi_{eva}) ; \quad (2.6.1)$$

$$\sum_{i=1}^{n=2} Po_i^{wcf} = Po_{td} + Po_{C+H_2O};$$

$$E_{wcf} = C_{wcf}(R, \Phi, \tau) P_{wcf}(R, \Phi, \tau) \theta(R, \Phi, \tau).$$

Массовая скорость испарения и скорость движения фронта фазового перехода рассчитывались по аналогии с §2.1. Распределение давления (H) по радиусу частицы вычислялось при решении уравнения пьезопроводности [350]:

$$\frac{1}{Fo_H} \frac{\partial (\Pi H)}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 X \frac{\partial H}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} X \frac{\partial H}{\partial \Phi} \right) + Po_{\Sigma}^H ; \quad (2.6.2)$$

$$Po_{\Sigma}^H = \left[Po_{td}^H + Po_{C+H_2O}^H \right] \Psi(\xi_{eva}) + Po_{eva}^H \Delta(\xi_{eva}).$$

Распределение температуры в пограничном слое частицы описывается уравнением энергии:

$$\frac{K_a}{Fo_{wcf}} \frac{\partial E_g}{\partial \tau} + Pe \left(U_g \frac{\partial E_g}{\partial R} + \frac{V_g}{R} \frac{\partial E_g}{\partial \Phi} \right) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \Lambda_g \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} \Lambda_g \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) + Po_{\Sigma}^g ; \quad (2.6.3)$$

$$Po_{\Sigma}^g = Po_{CH_4+O_2} + Po_{H_2+O_2} + Po_{CO+O_2} ;$$

$$E_g = C_g(R, \Phi, \tau) P_g(R, \Phi, \tau) \theta(R, \Phi, \tau).$$

Скорость и давление газа в пограничном слое частицы ВУТ вычислялась с использованием аналитического решения задачи Стокса об обтекании шара [351]:

$$H_g = 1 + \frac{3}{2} \Upsilon R_{out} U_g \frac{\cos \Phi}{R^2} ; \quad \text{— распределение давления в газовой области} \quad (2.6.4)$$

$$U_g = -2U_g^{fl} \cos \Phi \left(\frac{1}{2} - \frac{3R_{out}}{4R} + \frac{R_{out}^3}{4R^3} \right) ; \quad \text{— в радиальном направлении} \quad (2.6.5)$$

$$V_g = U_g^{fl} \sin \Phi \left(1 - \frac{3R_{out}}{4R} - \frac{R_{out}^3}{4R^3} \right) ; \quad \text{— в азимутальном направлении} \quad (2.6.6)$$

Процесс термического разложения описывается уравнением химической кинетики [249]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = [1 - \eta] k_{td} \left(-\frac{E_{td}}{RT} \right); \quad (2.6.7)$$

При постановке задачи зажигания принята кинетическая схема взаимодействия газообразных продуктов пиролиза с окислителем аналогичная §2.6. Концентрации компонентов парогазовой смеси (H_2 , O_2 , CO , CH_4 , CO_2 и H_2O) в пограничном слое частицы рассчитывались при решении уравнений диффузии для соответствующего компонента реакции [175]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Fo_{dif}} \frac{\partial P_g Y_i}{\partial \tau} + Pe_{dif} \left(U_g \frac{\partial P_g Y_i}{\partial R} + \frac{V_g}{R} \frac{\partial P_g Y_i}{\partial \Phi} \right) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 P_g D_i \frac{\partial Y_i}{\partial R} \right) + \\ + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} P_g D_i \frac{\partial Y_i}{\partial \Phi} \right) \pm Po_{\Sigma}^{dif} \end{aligned} \quad (2.6.8)$$

$$Po_{\Sigma}^{dif} = Po_{CH_4+O_2}^{dif} + Po_{H_2+O_2}^{dif} + Po_{CO+O_2}^{dif} .$$

Учитывалось изменение плотности (ρ_3) и пористости (Π) топлива по аналогии с [352]:

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = (\rho_3 - \rho_3^{end}) k_{td} \left(-\frac{E}{RT} \right); \quad (2.6.9)$$

$$\Pi = \Pi_0 \frac{\rho - \rho_3^0}{\rho_3^0 - \rho_3^{end}}; \quad (2.6.10)$$

Система уравнений решалась при следующих начальных:

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

и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{\substack{R=0 \\ 0 < \Phi < \pi}} = 0; \quad (2.6.11)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right|_{\substack{0 < R < R_g \\ \Phi=0 \\ \Phi=\pi}} = 0; \quad (2.6.12)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} \right|_{\substack{R=R_g \\ 0 < \Phi < \pi}} = 0; \quad (2.6.13)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial R} \right|_{\substack{R=0 \\ 0 < \Phi < \pi}} = 0; \quad (2.6.14)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial \Phi} \right|_{\substack{0 < R < R_{out} \\ \Phi=0 \\ \Phi=\pi}} = 0; \quad (2.6.15)$$

$$H \Big|_{\substack{R=R_{out} \\ 0 < \Phi < \pi}} = H_g \Big|_{\substack{R=R_{out} \\ 0 < \Phi < \pi}}; \quad (2.6.16)$$

$$D_{i \rightarrow air} P_g \left. \frac{\partial Y_i}{\partial R} \right|_{\substack{R=R_{out} \\ 0 < \Phi < \pi}} = P_{gm} \frac{N}{Da} \left. \frac{\partial H}{\partial R} \right|_{R=R_{out}-0}; \quad (2.6.17)$$

Где: $i = \text{CH}_4; \text{H}_2; \text{CO}; \text{H}_2\text{O}; \text{CO}_2$

$$\left. \frac{\partial Y_j}{\partial R} \right|_{\substack{R=R_{out} \\ 0 < \Phi < \pi}} = 0; \quad (2.6.18)$$

$j = \text{O}_2$

$$\left. \frac{\partial Y_i}{\partial \Phi} \right|_{\substack{0 < R < R_g \\ \Phi=0 \\ \Phi=\pi}} = 0. \quad (2.6.19)$$

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

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = K_\lambda \frac{\partial \theta}{\partial R} + Ki_\Sigma; \quad (2.6.20)$$

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

$$Ki_\Sigma = Sk(\theta) \cdot \sum_{i=1}^{n=4} \left[\chi \cdot \left(\frac{T_0}{T_{eva} - T_0} \right)^{i-1} \left(\theta_g^{n+1-i} - \theta \Big|_{R=R_{out}}^{n+1-i} \right) \right] + Ki_{C+O_2};$$

$$\chi = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ 4, & i = 2 \vee 4. \\ 6, & i = 3 \end{cases}$$

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложение В. Условные обозначения приведены в приложении Г. На Рисунке 2.6.2 приведены времена задержки зажигания (t_{ign}) капель водородного топлива в потоке высокотемпературного окислителя, полученных численно и

экспериментально [158] в зависимости от диаметра частицы. Сравнительный анализ показывает, что теоретические и экспериментальные значения t_{ign} отличаются незначительно (отклонение не более 8,5%). Последнее дает основания для вывода о высоком уровне прогностического потенциала разработанной математической модели. Анализ зависимостей $t_{ign}(d)$ показывает, что размеры частицы топлива оказывают существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. При этом из анализа экспериментальных данных хорошо видно, что значения времен задержек воспламенения описываются простой полиномиальной зависимостью:

$$t_{ign} = 1,52d + 0,13$$

Такая зависимость t_{ign} от d характерная для диффузионного режима горения. После верификации математической модели можно проводить прогностическое моделирование процессов воспламенения частиц водоугольного топлива в условиях, соответствующих ка

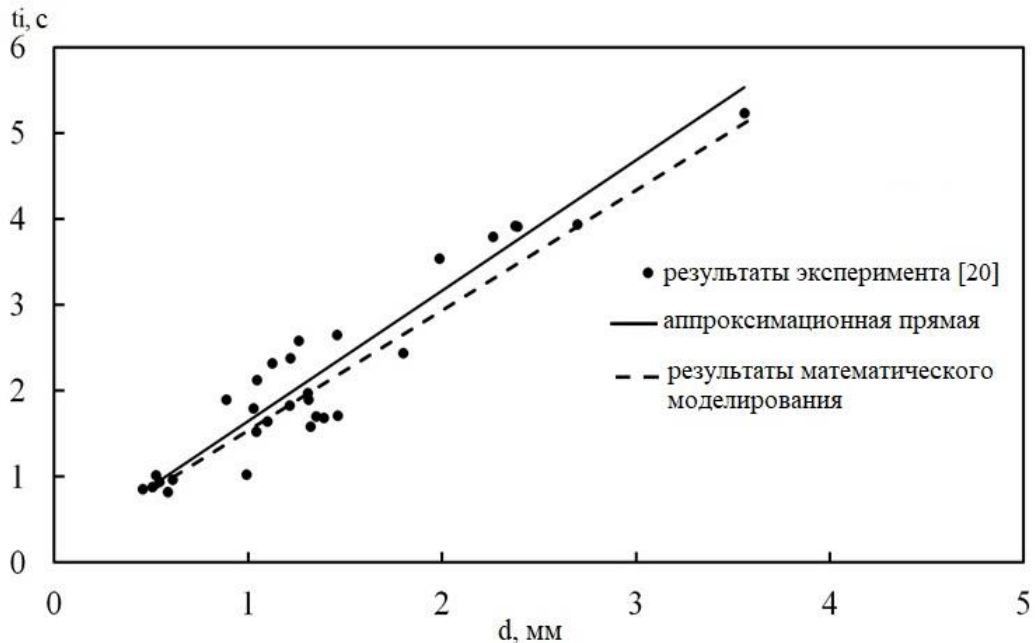


Рисунок 2.6.2 – Зависимость t_{ign} каплей ВУТ в потоке высокотемпературного окислителя (воздуха) от диаметра. Температура воздуха $T_g = 873\text{K}$

мерам сгорания типичных котельных агрегатов. Для этого необходимо учесть изменение аэродинамического спектра обтекания частицы в период термической подготовки обусловленное ускорением частицы вследствие аэродинамического воздействия набегающего потока. Для этого введем уравнение движения капли ВУТ под действием сил аэродинамического сопротивления [354]:

$$m_{wcf} \frac{du_{wcf}}{dt} = \frac{C_x f_d \rho_g}{2} (u_g - u_{wcf}) |u_g - u_{wcf}| \quad (2.6.21)$$

$$C_x = \frac{24}{Re} \quad Re < 1 \quad \text{Коэффициент аэродинамического сопротивления в случае ламинарного обтекания}$$

$$C_x = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re} \quad 1 < Re < 10^3 \quad \text{При переходном режиме течения}$$

В этом случае скорость U_g вычислялась и выражения:

$$U_g = \frac{u_g - u_{wcf}}{u^*}$$

На Рисунке 2.6.3 приведены безразмерные времена задержки воспламенения (ξ) частицы ВУТ от температуры топочного пространства. Где ξ вычислялась из выражения:

$$\xi = \frac{t_i}{t_{fm}}$$

Где: $\bar{t}_{fm} = \frac{1}{t_i} \int t_{fm} dt$ – Среднее время пролета частице топлива одного метра пространства топочной камеры.

Скорость несущей среды (высокотемпературный окислитель) $u_g = 8.5$ м/с соответствует типичным горелочным устройствам [355]. Анализ зависимостей показывает, что температура внешней среды оказывает, достаточно сильное влияние на характеристики и условия воспламенения частицы ВУТ. Это обусловлено существенным влиянием комплекса процессов термической подготовки, протекающем в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических превращениях (термическое разложение, взаимодействие углерода кокса и водяных паров, воспламенение летучих) превращений.

Анализ зависимостей на Рисунке 2.8.3 показывает, что капли ВУТ диаметром ≥ 3 мм даже в условиях относительно высоких температур внешней среды ($T_g = 1270\text{K}$) воспламеняются на расстоянии $\approx 10\text{м}$. Повышение температуры внешней среды существенно снижает это значение. Последнее приводит к следующему выводу – для стабильного воспламенения и горения топлива в топочное устройство котельного агрегата должно быть сформировано из нескольких двух камер сгорания: муфельной предтопочная камера (в которой осуществляется непосредственно термическая подготовка и зажигание в условиях циклонного движения воздуха) и рабочая (непосредственное горение и восприятие теплоты топочными трубами). На Рисунке 2.6.4 приведены зависимости времен задержки воспламенения в зависимости от осредненных по времени чисел Рейнольдса (\overline{Re}):

$$\overline{Re} = \frac{1}{t_i} \int_{t_i}^{t_i} Re dt$$

где
$$\text{Re} = \frac{2r_{wcf} (u_g - u_{wcf}) \rho_g}{\mu_g}.$$

Анализ зависимостей на Рисунке 2.6.4 показывает, что увеличение Re , а, следовательно, и увеличение скорости обтекания частицы топлива приводит к удлинению периода индукции. Как известно из работ Франк – Каменецкого Д.А. [249] одним из определяющих процесс воспламенения факторов является концентрация газообразных продуктов пиролиза в пограничном слое частице. Увеличение скорости потока скорее всего приводит к сдвигу летучих в аэродинамический след частицы ВУТ и «размазыванию» их концентрации в пограничном слое частицы. Это приводит к тому, что условия воспламенения по концентрациям достигаются с задержкой.

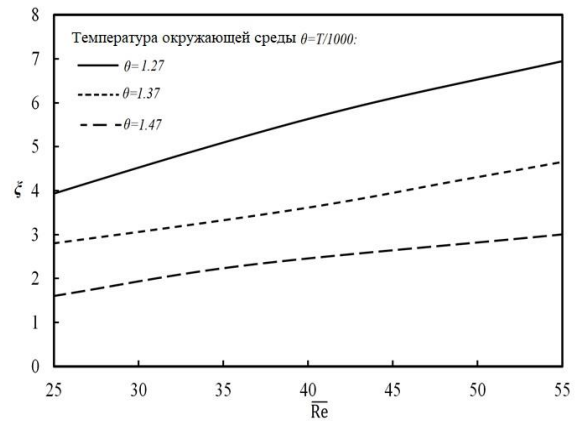
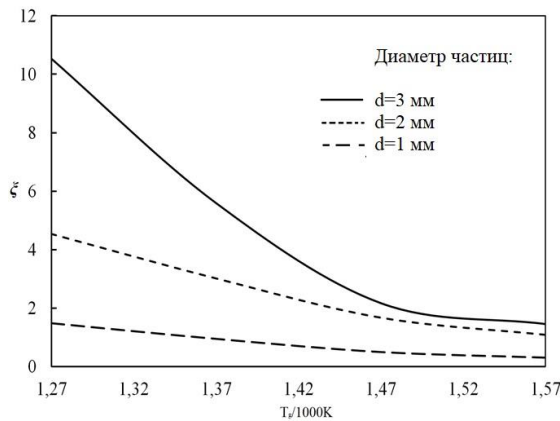


Рисунок 2.6.3 – Зависимость относительного времени задержки воспламенения (ξ) от температуры газа $T_g/1000\text{K}$ в условиях, соответствующих топочному пространству котла [355]. Скорость газа $u_g = 8,5$ м/с

Рисунок 2.6.4 – Зависимость времени задержки воспламенения ξ от среднего по времени значения числа Рейнольдса

На Рисунке 2.6.5 показано распределение температуры в системе «частица водоугольного топлива – газовая среда» в момент воспламенения при температуре окружающей среды $T_g = 873\text{K}$. Скорость потока газа варьировалась в диапазоне $0 \leq u_g \leq 8,5$ м/с. Хорошо видно, что с увеличением u_g зона воспламенения смещается в направлении потока воздуха, обтекающего частицу. Чтобы сравнить теоретическое и экспериментальное время задержки зажигания, на Рисунке 2.6.5 показан кадр видеogramмы момента зажигания, полученный в экспериментах [183]. Анализ Рисунка 2.6.5 показывает, что воспламенение частицы происходит в аэродинамическом следе капли ВУТ. Это связано с уносом продуктов пиролиза под

действием набегающего потока воздуха. Следует отметить, что увеличение скорости потока приводит к значительному искажению (асимметрии по сравнению с режимом зажигания при $u_g = 0$ м/с) температурного поля в пограничном слое топливной частицы и в ее структуре. Анализ температурных полей (Рисунок 2.6.5) показывает, что

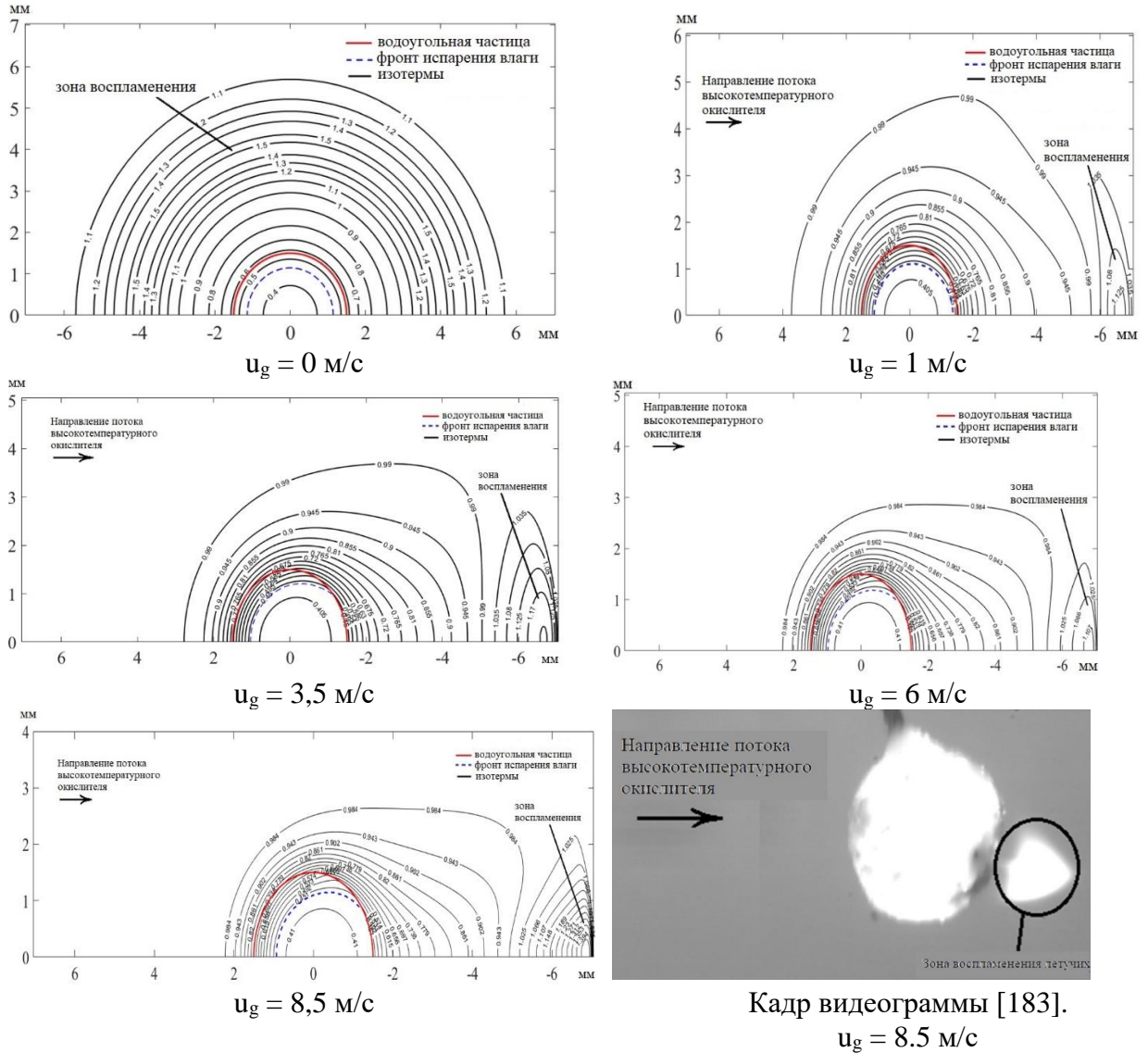


Рисунок 2.6.5 — Температурные поля в системе «вода – угольные частицы топлива – газосреда» в момент воспламенения при различных скоростях потока

увеличение u_g от 1 до 8 м/с приводит к снижению температуры газа в аэродинамическом следе частицы ВУТ на 10%. Также можно отметить, что топливная частица воспламеняется до полного испарения внутрипоровой влаги. На Рисунке 2.6.5 хорошо виден фронт испарения. Можно отметить, что слой сухого топлива с «наветренной» стороны частицы толще, чем «подветренный» слой. Это связано с высокими тепловыми потоками в этой зоне из – за воздействия набегающего потока. При этом видно, что в условиях малых скоростей потока

газа ($u_g = 1$ м/с) влага от частицы удаляется равномерно со всех сторон (по угловой координате). Когда u_g увеличивается на «подветренной» стороне падения WCF, влага удаляется медленнее, чем «наветренная». Последнее также можно объяснить тем, что в «наветренной» зоне падения тепловые потоки больше по величине, чем в «подветренной», из-за влияния набегающего потока высокотемпературного окислителя.

На Рисунках 2.6.6 (а – г) показаны линии постоянных концентраций основных компонентов газообразных продуктов пиролиза в момент времени предшествующий воспламенению частицы водоугольного топлива. Можно отметить, что с увеличением числа Рейнольдса (или, другими словами, скорости потока) унос газообразных продуктов пиролиза в область аэродинамического следа капли значительно усиливается. Скорее всего, это связано в первую очередь с тем, что конвективный массоперенос существенно более интенсивен, чем молекулярный. Стоит отметить значительное увеличение концентрации окиси углерода (CO) и углекислого газа (CO₂) в аэродинамическом следе капли ВУТ. Это связано с тем, что конвективный массообмен для этих веществ значительно преобладает над молекулярным массопереносом. Об этом свидетельствуют результаты анализа диффузионных критериев Пекле:

$$Pe_{CO_2}^{dif} = \frac{Ur^*}{d} = 500 \gg 1; Pe_{CO}^{dif} = \frac{Ur^*}{d} = 372 \gg 1.$$

Этот факт необходимо учитывать при разработке математических моделей процесса воспламенения и окисления группы капель водоугольных топлив, движущихся в потоке высокотемпературного окислителя. Последнее связано с тем, что каждая последующая (по направлению движения) частица ВУТ движется в зоне аэродинамического следа предыдущей. Соответственно, концентрация окислителя для каждой следующей частицы значительно снижается.

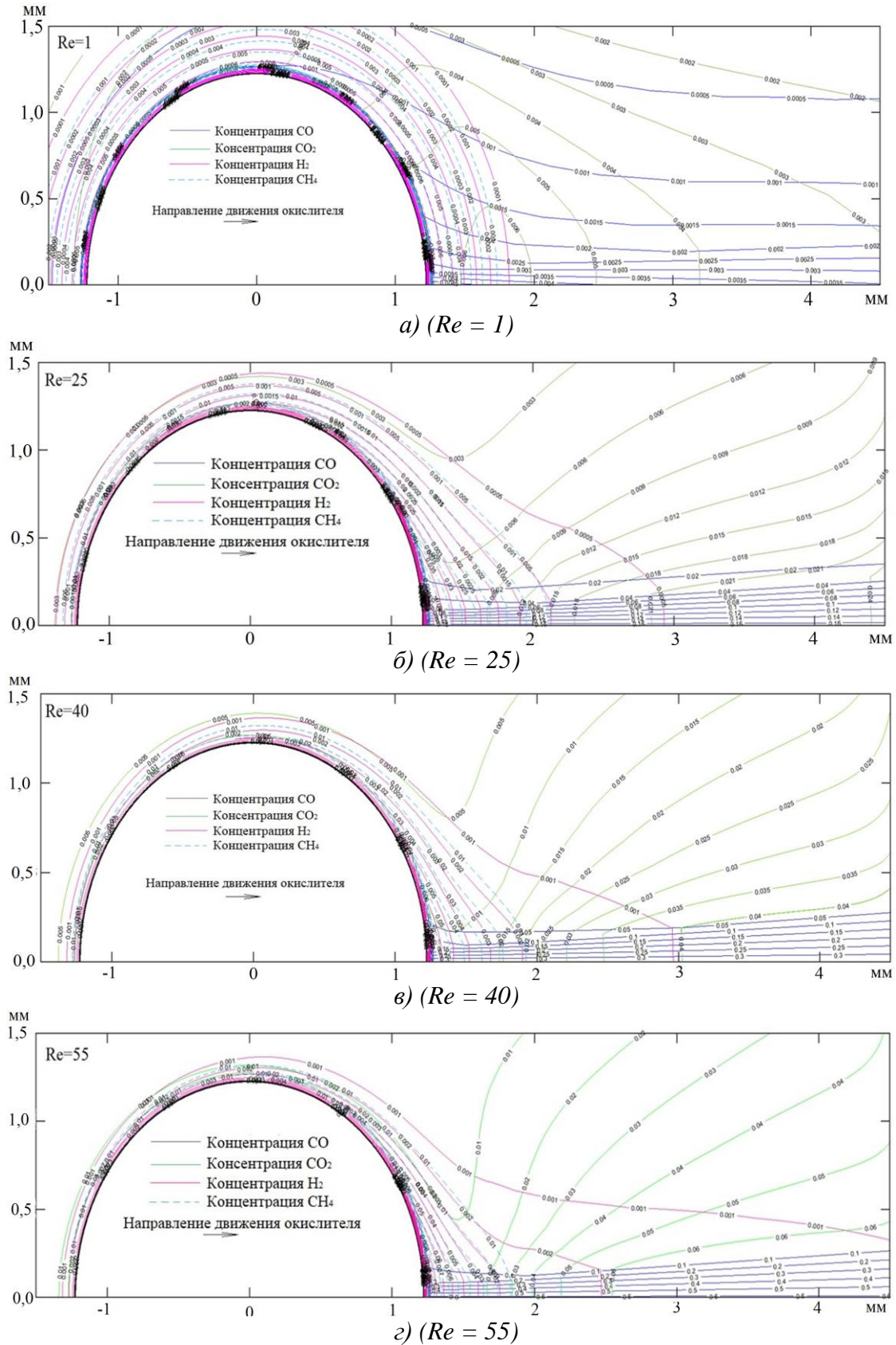


Рисунок 2.6.6 — Линии постоянных концентраций основных компонентов газообразных продуктов пиролиза угля (окись углерода – CO; диоксид углерода – CO₂; водород H₂; метан – CH₄)

2.7 Условия диспергирования капель водоугольного топлива при их воспламенении в условиях высокотемпературного нагрева

Эффект диспергирования при горении твердых топлив известен достаточно давно [361] и регистрировался у металлизированных составов, [362]. Во многих экспериментах по зажиганию капель ВУТ зарегистрированы [151] в период интенсивного нагрева эффекты отрыва от поверхности капли ВУТ большей или меньшей совокупности частиц малых размеров. По аналогии с процессом горения традиционных твердых топлив такую фрагментацию поверхности частицы также можно назвать диспергированием. Основные закономерности (условия и характеристики) этого процесса, а также их связи с основными значимыми факторами диспергирования при зажигании капель ВУТ пока не изучены. Экспериментально зарегистрировать значения основных характеристических функций (температура, давление, интенсивность парообразования и термического разложения угольной компоненты) при диспергировании на современном уровне метрологического обеспечения практически невозможно. Но анализ закономерностей этого процесса по крайней мере целесообразен потому, что измельчение крупных капель ВУТ на стадии их термической подготовки к зажиганию может существенно снизить продолжительность индукционного периода, повысить эффективность сгорания топлива и упростить технологию топливоприготовления и последующего распыления водоугольных суспензий в топках паровых и водогрейных котлов.

Анализ установленных экспериментально и теоретически закономерностей процессов зажигания капель ВУТ [152] дает основания для формулирования гипотезы о механизме процессов диспергирования капель водоугольных суспензий при их высокотемпературном нагреве. Скорее всего, отрыв малых по размерам частиц угольной компоненты от капли топлива происходит в результате интенсивного локального нагрева тонкого приповерхностного слоя капли на тех участках ее поверхности, где частички угля непосредственно примыкают к ней. Дальнейший рост температуры приводит к образованию пористой структуры, через которую пары воды и газообразные продукты термического разложения угля фильтруются к поверхности. Скорость фильтрации и давление паров зависят от проницаемости пористой среды, которая, в свою очередь, зависит от вида угля, степени помола и технологии приготовления ВУТ. При определенном сочетании параметров пары воды и летучие не «успевают» выходить на поверхность капли. Давление такой парогазовой среды внутри частицы ВУТ возрастает и может достигать значений, при которых напряжения

фильтрации могут превысить допустимые значения предела прочности угольного каркаса. В результате может произойти отрыв малых по размерам частиц от поверхности топлива.

Проверка сформулированной гипотезы возможна по результатам математического моделирования процессов тепло – и массопереноса в капле водоугольной суспензии при ее интенсивном нагреве за счет конвекции и излучения. Поэтому целью этого параграфа диссертации являлся прогностический анализ условий диспергирования частиц водоугольного топлива в условиях высокотемпературного радиационно – конвективного нагрева. Рассматривается капля водоугольного топлива, представляющего собой смесь воды и измельченного угля при равных концентрациях компонент. При постановке задачи также предполагалось, что обе компоненты равномерно распределены по объему капли, а характерные размеры частиц угля не превышают 100 мкм. Принята следующая физическая модель рассматриваемого процесса. В начальный момент времени капля водоугольного топлива попадает в условия, соответствующие камерам сгорания типичных котельных агрегатов и нагревается за счет конвекции и излучения, при этом инициируется процесс испарения внутрипоровой влаги. По мере роста температуры поверхности капли увеличивается скорость испарения воды. В результате этих фазовых превращений высыхает тонкий приповерхностный слой частицы топлива. Капля ВУТ, образно говоря, трансформируется в состояние двухслойной сферы, ядро которой находится в жидком состоянии, а оболочка в твердом. С ростом времени и, соответственно, температуры фронт испарения продвигается от поверхности нагрева вглубь капли. Образуется слой пористой среды, представляющий собой агломерат частичек угля. При дальнейшем росте температуры начинается процесс термического разложения органической части угля с образованием газообразных (летучие) и твердых (кокс) продуктов пиролиза. Летучие совместно с парами воды фильтруются к поверхности нагрева под действием перепада давления. формирующегося в пористой структуре частицы. При дальнейшем росте температуры инициируются термохимические реакции взаимодействия водяных паров и углерода кокса. Скорости фильтрации паров воды, летучих и продуктов реакции зависят от проницаемости среды. Последняя же, в свою очередь, зависит от свойств базовой компоненты – угля. При низкой зольности скорости фильтрации достаточно велики, при высокой доле твердых продуктов пиролиза и минеральной части топлива проницаемость пористой среды мала. В этом случае возможен рост внутрипорового давления, значение которого может превысить предел прочности кокса ВУТ. Оценка условий диспергирования капель водоугольных топлив при их интенсивном нагреве возможно при расчете внутрипорового давления в рамках модели, учитывающей изменение пористости по толщине слоя кокса ВУТ в процессе термического разложения последнего.

Решена система дифференциальных уравнений, описывающих основные процессы тепломассопереноса в частице водоугольного топлива аналогичная постановке, приведенной выше в разделе 2.6. Основное отличие постановки задачи зажигания, решение которой приведено ниже, от моделей приведенной в разделе 2.6 заключается в описании процесса формирования термических и фильтрационных напряжений в сферической частице водоугольного топлива. Предполагалось, что в период термической подготовки топливные частицы интенсивно прогреваются, в результате в слое топлива образуются большие температурные градиенты и формируются термические напряжения, которые рассчитывались из выражений, приведённых в [363]. Радиальные напряжения:

$$\sigma_R^\theta = \frac{2\alpha' E \Delta T}{1-\nu} \left(\frac{1}{R^3} \int_0^R \left[\theta(R, \Phi, Fo) + \frac{T}{\Delta T} \right] R^2 dR - \frac{1}{R^3} \int_0^R \left[\theta(R, \Phi, Fo) + \frac{T}{\Delta T} \right] R^2 dR \right) \quad (2.7.1)$$

и тангенциальные:

$$\sigma_\Phi^\theta = \frac{\alpha' E \Delta T}{1-\nu} \left(\frac{2}{R^3} \int_0^R \left[\theta(R, \Phi, Fo) + \frac{T}{\Delta T} \right] R^2 dR + \frac{1}{R^3} \int_0^R \left[\theta(R, \Phi, Fo) + \frac{T}{\Delta T} \right] R^2 dR - \theta(R, \Phi, Fo) \right) \quad (2.7.2)$$

Смесь водяных паров и газообразных продуктов пиролиза фильтруются сквозь слой сухого топлива под действием перепада давлений. В результате в структуре топлива формируются напряжения фильтрации. Для описания связи между напряжениями и поровым давлением принята модель пороупругого тела Гука – Терцаги – Био [364]:

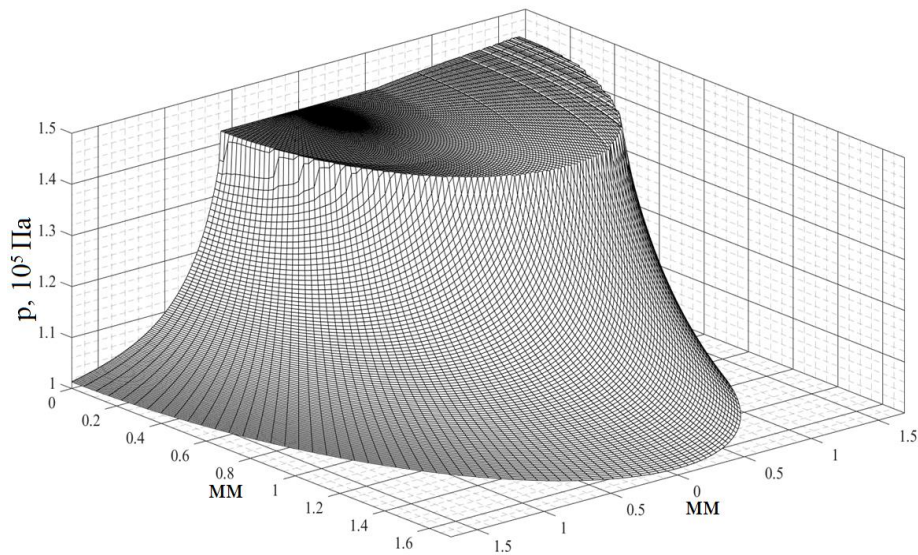
$$\frac{\partial \sigma_R^H}{\partial R} = \frac{\partial \sigma_R^\theta}{\partial R} - \alpha \frac{\partial H}{\partial R} \delta^K \quad \text{Напряжения в радиальном направлении} \quad (2.7.3)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial \sigma_\Phi^H}{\partial \Phi} = \frac{1}{R} \frac{\partial \sigma_\Phi^\theta}{\partial \Phi} - \frac{\alpha}{R} \frac{\partial H}{\partial \Phi} \delta^K \quad \text{в азимутальном направлении} \quad (2.7.4)$$

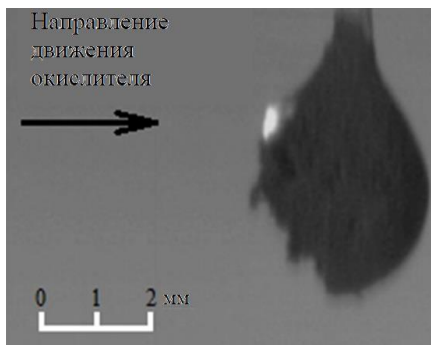
На Рисунке 2.7.1 приведены полученные в результате численного моделирования поля давлений в частице ВУТ (Рисунок 2.7.1 а) в момент разрушения капли топлива в условиях, соответствующих проведенным экспериментам (кадр видеogramмы Рисунок 2.7.1 б [361]. На Рисунке 2.7.1 в приведено распределение давления в сечении, проходящем по оси симметрии сферической частицы. Можно отметить, что процесс ее диспергирования происходит в том случае, когда в центральной части топлива формируется зона высокого внутрипорового давления. При этом перепад давления между центральной частью частицы и внешней средой составляет около $35 \cdot 10^3$ Па.

Также стоит отметить асимметрию поля давлений относительно центра сферической частицы. Процесс формирования поля давлений обуславливается процессом испарения, при этом зажигание происходит в условиях обтекания частицы ВУТ внешним окислителем.

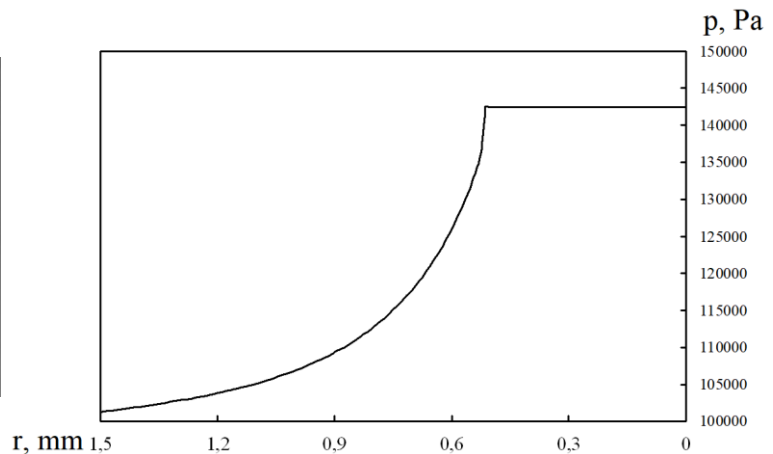
В результате прогрева топлива происходит неравномерно и в частице формируется фронт испарения, форма которого зависит от распределения тепловых потоков.



a) ($t = 10.110$ с)



б) ($t \approx 9,013$ с)



в)

Рисунок 2.7.1 – Рассчитанное (*a*) поле давлений в момент разрушения частицы водоугольного топлива в условиях нагрева высокотемпературным потоком воздуха, кадр видеogramмы (*б*) в момент диспергирования, установленного в эксперименте [361] и распределение давления в сечении на оси симметрии частицы топлива (*в*)

На Рисунке 2.7.1в приведено распределение давления в сечении, проходящим по оси симметрии сферической топливной частицы. Можно отметить, что в частице формируются большие градиенты давления. Такие $\text{grad}(P)$ приводят к формированию существенных фильтрационных напряжений, которые создают предпосылки для фрагментации поверхности частицы топлива. При этом в центре жидкой части ВУТ формируется своеобразная

«полка» значений давления (отсутствие градиентов p). Последнее обусловлено практически абсолютной несжимаемостью воды ($\beta_{wat} \rightarrow \infty$), содержащейся в порах.

На настоящее время в науке о горении водоугольных суспензий важным фактором является помол угля для производства ВУТ. Определение дисперсного состава помола угля – сложная оптимизационная задача, при решении которой необходимо учитывать не только экономические аспекты, связанные с затратами на производство угля тонкого помола. Также необходимо обоснование степени измельчения угля с целью повышения эффективности процесса сжигания. При этом одним из важных факторов, определяющих динамику горения ВУТ, является возможное диспергирование водоугольных частиц в результате повышения внутрипорового давления. Как известно уменьшение «тонкости» помола приводит к уменьшению размеров пор, и соответственно к существенному уменьшению проницаемости структуры угля.

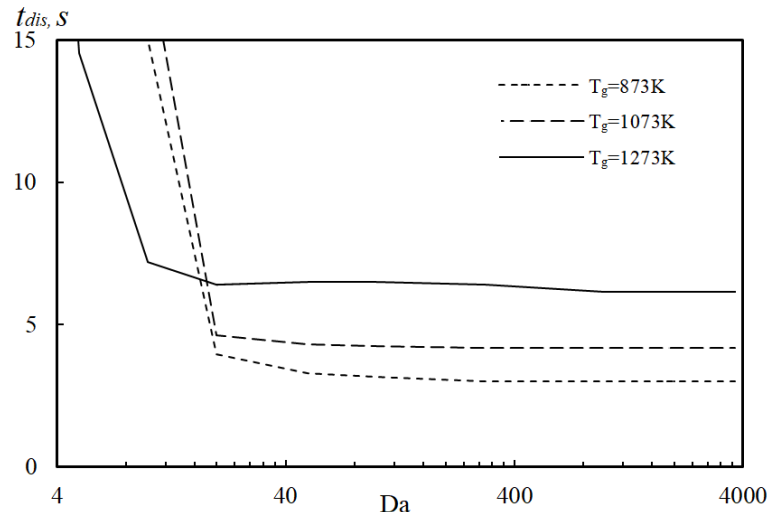


Рисунок 2.7.2 – Зависимость времени задержки диспергации слоя топлива от критерия Дарси

На Рисунке 2.7.2 приведены зависимости времен диспергирования (t_{dis}) от значений критерия Дарси (Da) при различных температурах внешней среды. Можно отметить, что при увеличении чисел Da (другими словами, уменьшении проницаемости (K_p) пористой структуры) времена диспергирования существенно уменьшаются. Последнее обусловлено тем, что уменьшение проницаемости угольного каркаса приводит к существенному возрастанию внутрипорового давления парогазовой смеси. В результате условия диспергирования достигаются быстрее. Также стоит отметить, что значения безразмерных времен диспергирования существенно зависят от температуры внешней среды (T_g). Увеличение T_g приводит

к значительному снижению значений времени диспергирования. Это обусловлено интенсификации процессов термической подготовки, в частности испарения. Соответственно, условия диспергирования (по перепаду давлений) достигаются быстрее.

Анализ Рисунка 2.7.2 также показывает, что при значениях $Da > 400$ относительные времена диспергирования практически не меняются. Это обусловлено, скорее всего, тем, что разрушение частицы ВУТ происходит при условии достижения критических значений перепада давлений. Понижении K_p ниже критического значения не оказывает существенного влияния на характерные времена диспергирования. В то же время при значениях $Da \leq 10$ времена диспергирования существенно возрастают ($t_{dis} \rightarrow \infty$). Это обусловлено тем, что в таких условиях проницаемость пористого каркаса частицы ВУТ настолько высока, что вся вода успевает испариться, при этом водяные пары быстро выходят из глубинных слоев топлива на поверхность без формирования существенных градиентов давления.

На Рисунке 2.7.3 (a – e) приведены рассчитанные поля давлений в частице (диаметром $d = 3$ мм) водоугольного топлива в момент достижения условий диспергирования (за исключением а, б) при нагреве в потоке высокотемпературного газа ($T_g = 1270\text{K}$) при различных значениях Da . Можно отметить, существенную асимметрию поля давлений относительно центра сферы частицы. Как уже говорилось выше, это обусловлено формированием существенно нелинейного фронта испарения, который является следствием неравномерного нагрева частицы ВУТ при обтекании ее потоком высокотемпературного окислителя.

Можно отметить, что при $Da < 10$ диспергирования не происходит, вследствие высокой проницаемости сухого пористого каркаса частицы ВУТ. Вода успевает испариться и выйти на поверхность. При этом критические условия (по давлениям) диспергирования не достигаются. Увеличение же значений Da приводит к существенному росту внутривещного давления водяных паров. Так уже при $Da = 20$ от поверхности частицы ВУТ могут отрываться мелкие фрагменты. При этом можно отметить, что фрагментация частицы происходит в условиях продолжающегося испарения воды в глубинных слоях. Результат математического моделирования показывают, что при увеличении значения критерия Дарси градиенты давлений в частицы существенно возрастают.

На Рисунке 2.7.4 приведено распределение давлений по радиусу частицы в сечении, проходящем через ось симметрии потока, обтекающего частицу, в момент достижения условий диспергирования при различных значениях критерия Дарси. Можно отметить, что при $Da < 10$ вследствие малых градиентов давления разрушения не может произойти. Последнее обусловлено тем, что в этих условиях проницаемость структуры топлива высока и

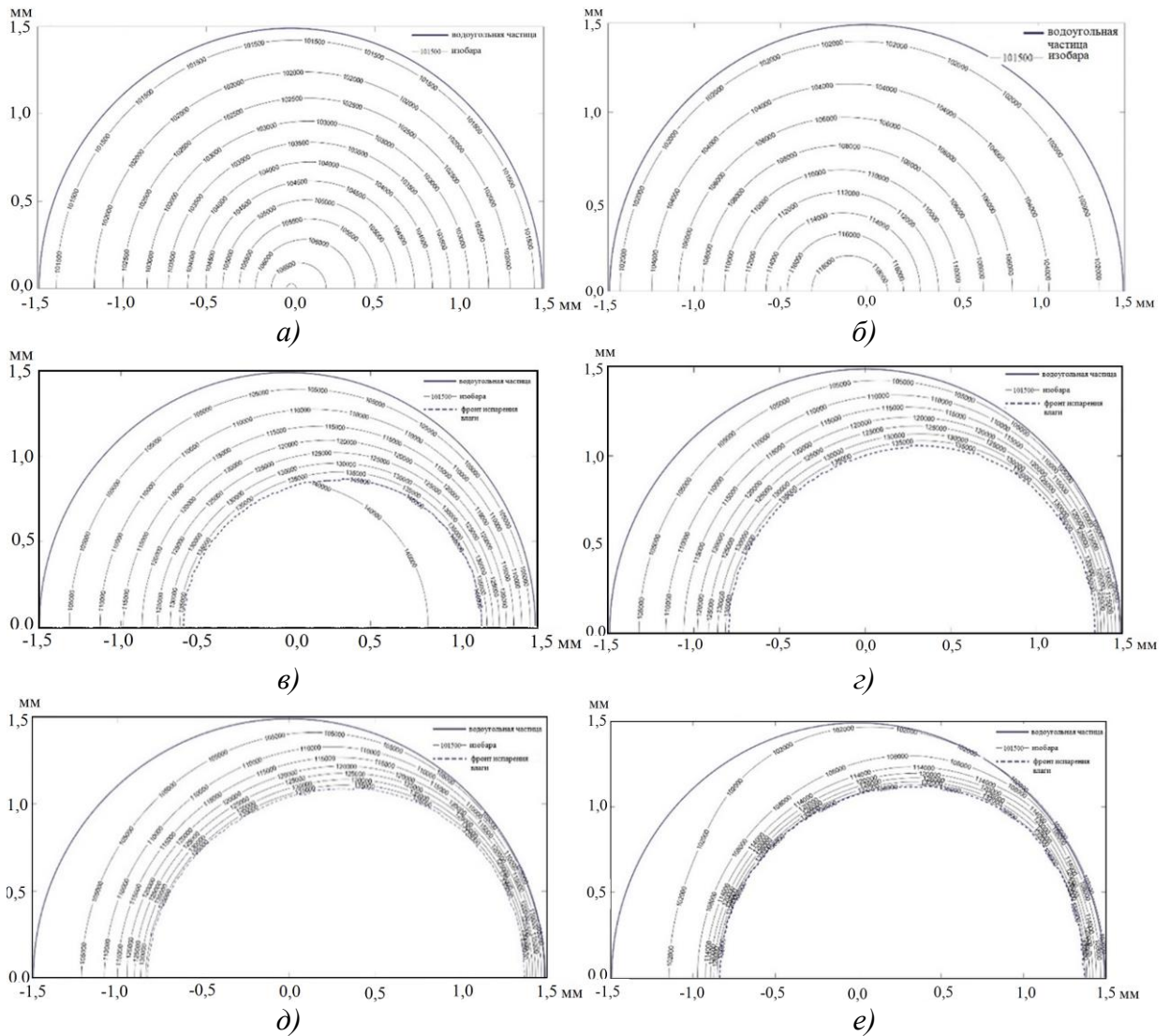


Рисунок 2.7.3 — Поля давлений в частице водоугольного топлива в процессе нагрева в потоке высокотемпературного воздуха при различных значениях критерия Da :
 а) – $Da = 5$; б) – $Da = 10$; в) – $Da = 20$; г) – $Da = 50$; д) – $Da = 100$; е) – $Da = 1000$.

водяные пары, формирующиеся при испарении воды не создают критических (по давлению) условий диспергирования. Также, как уже указывалось выше, в центральной части топлива формируется зона постоянного давления (без перепада). Это обусловлено малой сжимаемостью жидкости.

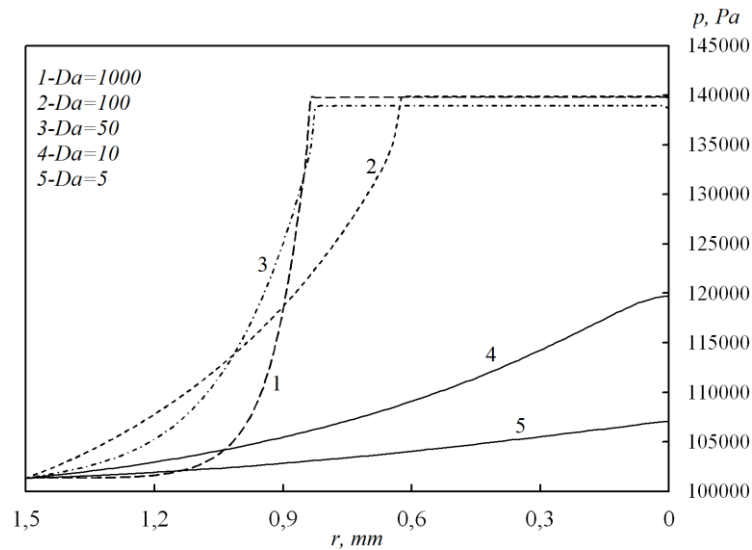


Рисунок 2.7.4 — Распределение давления по радиусу топливной частицы в сечении, проходящем через ось симметрии потока, обтекающего частицу, в момент диспергирования (за исключением $Da < 10$) основного слоя топлива

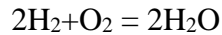
2.8 О выборе кинетической схемы реакций окисления газообразных продуктов пиролиза угля в период индукции при зажигании частиц водоугольного топлива

Стоит сказать, что по результатам анализ мировой научной периодики установлено, что до настоящего времени не проводилась оценка влияния вида кинетической модели газофазного реагирования летучих с окислителем на результат математического моделирования процесса воспламенения и горения частиц водоугольного топлива. В тоже время, обоснование выбора кинетической схема процесса воспламенения является важной и нерешенной до настоящего времени задачей.

По этой причине цель этого параграфа – математическое моделирование зажигания капель (в начальный момент времени), а затем частиц водоугольного топлива с использованием двух разных кинетических схем и обоснование по результатам расчета выбора той или иной кинетической схемы зажигания газообразных продуктов пиролиза угля.

Одной из базовых реакций (согласно [132]), протекающих при воспламенении газообразных продуктов пиролиза водоугольного топлива, является реакция окисления водорода (H_2) – одного из компонентов продуктов термического разложения органической части

угля. При этом кинетика взаимодействия водорода с кислородом может быть описана одной глобальной [365] реакцией:



Такой подход удобен при моделировании процессов зажигания углеводородных топлив. Но стоит отметить, что реакция водорода с кислородом при атмосферном давлении может происходить через несколько взаимосвязанных стадий. Как установлено Н.Н. Семёновым [366], реакция $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ является цепной и термохимическое взаимодействие протекает через множество промежуточных этапов. На настоящее время механизм горения водорода изучен достаточно подробно. Известно [367], что при горении водорода роль активных центров играют молекулы H , O , OH , H_2 , O_2 . При этом можно отметить, что между этими молекулами и их производными (H_2O_2 , HO_2 и т.д.) происходит множество параллельных реакций. Подробный обзор таких реакций приведен в [368]. В современной теории горения водорода роль и последовательность элементарных реакций рассмотрена настолько подробно, что в целом горение H_2 может рассматриваться как «модельная реакция с разветвлёнными цепями» [367]. Наиболее достоверная система реакций, определяющая горение водорода приведена в [365 – 368] (Таблица 2.8.1).

Таблица 2.8.1 – Кинетическая схема реагирования водорода с кислородом

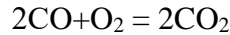
| № | Реакция | Тепловой эффект Q_i , ккал/моль | Порядок реакции в цепи |
|---|--|--------------------------------------|------------------------|
| 1 | $\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{OH}$ | – 16 | зарождение цепи |
| 2 | $\text{OH} + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{H}$ | + 14,2 | продолжение цепи |
| 3 | $\text{H} + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{O}$ | + 15,9 | |
| 4 | $\text{O}_2 + \text{H}_2 = \text{OH} + \text{H}$ | – 1 | разветвление цепи |
| 5 | $\text{H} + \text{стенка}$ | | |
| 6 | $\text{O} + \text{стенка}$ | | обрыв цепи |

Реакция окиси углерода (CO) с кислородом имеет большое значение в теории воспламенения водоугольных топлив. Известно [369], что при термическом разложении угля одним из основных горючих продуктов является монооксид углерода. Его дожигание в основном решает задачу получения максимально возможной теплоты сгорания топлива [316].

К настоящему времени проведено достаточно много исследований по установлению кинетического механизма горения CO [368]. Но единого мнения о механизме термохимического реагирования CO и O_2 на настоящий момент нет.

Стоит сказать, что в период термической подготовки капли водоугольного топлива одним из основных процессов является испарение внутриспоровой влаги. Соответственно, в

пограничном слое частицы формируется слой водяных паров. При этом (как установлено в [370]) в иницировании горения монооксида углерода большую роль играют молекулы H_2O и H_2 . Ранее [151] за базовую принималась модель, основанная на предположении о доминировании одной глобальной реакции термохимического взаимодействия:



Однако стоит отметить, что присутствие воды и водорода увеличивает количество возможных активных центров, поэтому скорость реакции возрастает. В 1940 г. Я.Б. Зильдович [371] и Н.Н. Семеновым предложена схема горения окиси углерода [372], приведенная в Таблице 2.8.2. Скорости этих реакции рассчитываются в соответствии с законом действующих масс:

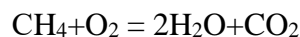
$$W_{CO+O_2} = k c_{CO} c_{H_2O}$$

где c_{H_2O} – концентрация воды, а константа реакции k является функцией констант скорости второй и третьей реакции системы уравнений.

Таблица 2.8.2 — Кинетическая схема реагирования окиси углерода с кислородом

| № | Реакция | Тепловой эффект Q_i , ккал/моль. |
|---|-----------------------|------------------------------------|
| 1 | $H + O_2 = OH + O$ | 47 |
| 2 | $OH + CO = CO_2 + H$ | 26,0 |
| 3 | $2CO + O_2 = 2CO_2$ | 50,9 |
| 4 | $O + H_2 = OH + H$ | 1 |
| 5 | $OH + H_2 = H_2O + H$ | 15 |

Ранее [151] при моделировании зажигания капли водоугольного топлива учитывалось одностадийное протекание реакции взаимодействия метана с кислородом:



Однако многочисленные исследования [371 – 374] кинетических схем окисления CH_4 показали, что важную роль в процессе его горения играют активные центры водород – кислородного пламени (OH , H , O) и молекулярный водород. Так согласно [375] горение метана протекает через стадии, приведенные в таблице 2.8.3.

Таблица 2.8.3 — Кинетическая схема реагирования метана с кислородом

| № | Реакция | Тепловой эффект Q_i , ккал/моль |
|---|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | $CH_4 + 1,5O_2 = CO + 2H_2O$ | – 16 |
| 2 | $CO + 1,5O_2 = CO_2$ | + 14,2 |
| 3 | $CO_2 \rightarrow CO + 1,5O_2$ | + 15,9 |

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г.

Проанализировав наиболее известные кинетические схемы газофазного воспламенения газообразных продуктов пиролиза можно сказать, что обоснование выбора кинетической модели реакций горения водорода, окиси углерода и метана при проведении процедуры математического моделирования процесса зажигания капель водоугольного топлива возможно в рамках одностадийной [152] и многостадийной кинетических схем.

Сформулирована физическая модель процесса воспламенения по своим основным элементам и принятым закономерностям соответствует физической постановке задачи зажигания, приведенной в предыдущем параграфе §2.6. Решена система дифференциальных уравнений, описывающих основные процессы тепломассопереноса в частице водоугольного топлива аналогичная постановке, приведенной выше в разделе 2.6. Основное отличие постановки задачи зажигания, решение которой приведено ниже, от модели приведенной в разделе 2.8 заключается в описании процесса термохимического реагирования газообразных продуктов пиролиза угля с окислителем (кислородом воздуха) в рамках многостадийной (с последовательно и параллельно протекающими реакциями) кинетической схемы.

На Рисунке 2.8.1 приведены экспериментальные (по данным [152]) и полученные по результатам численного моделирования значения времен задержки зажигания частицы водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений времен задержки зажигания показал их хорошее соответствие. Можно сделать вывод, что разработанная математическая модель обладает достаточно высоким прогностическим потенциалом при моделировании процессов зажигания капель водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов.

На Рисунке 2.8.1 приведены времена задержки зажигания полученные при математическом моделировании процесса воспламенения капли ВУТ с использованием моделей одностадийной и многостадийной кинетики газофазного термохимического реагирования газообразных продуктов пиролиза и воздуха. Можно отметить, что отличия расчетных значений t_{ign} , полученных при использовании двух, существенно отличающихся кинетических схем воспламенения летучих, незначительны (не более 2%). Это обусловлено прежде всего тем, что одностадийная и многостадийная модели взаимодействия водорода, метана и окиси углерода с кислородом воздуха описывают процессы окисления при идентичных теп-

ловых эффектах совокупности реакций (суммарное тепловыделение не зависит от кинетической схемы). При этом кинетические константы (предэкспонент реакции k , энергия активации E) и тепловые эффекты химических реакций в одностадийной модели являются эффективными (другими словами, объединяющими) характеристиками, определяемыми с высокой достоверностью по результатам обработки экспериментальных данных.

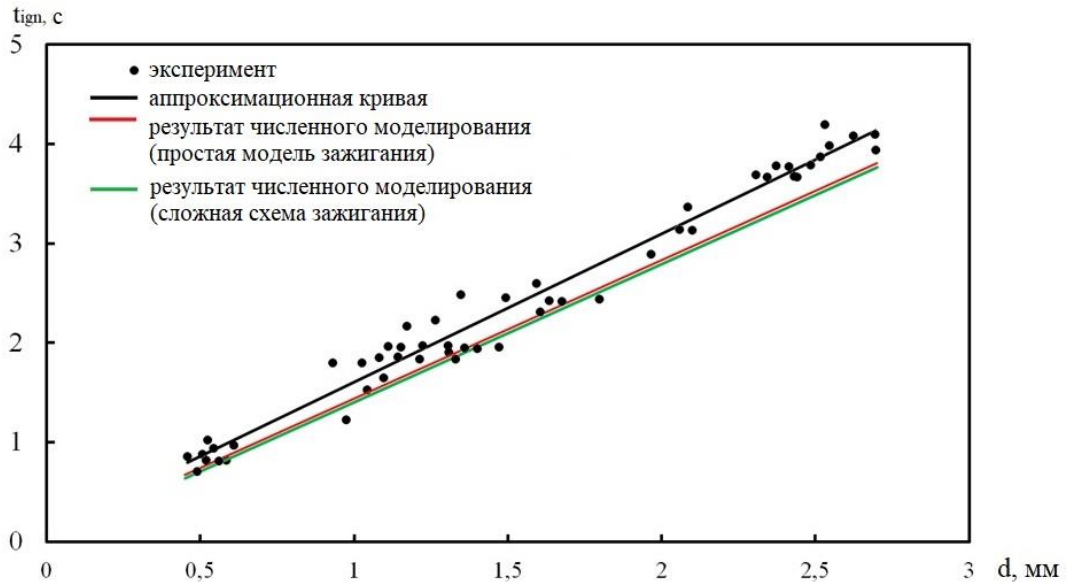


Рисунок 2.8.1 — Времена задержки воспламенения частиц водоугольного топлива в зависимости от их размеров, полученные по результатам экспериментальных исследований [152] и численного моделирования процесса зажигания с использованием моделей одностадийной и многостадийной кинетики газофазных реакций окисления летучих кислородом воздуха

Также стоит отметить, что характерное время процесса непосредственного реагирования газообразных продуктов пиролиза несравнимо мало по отношению ко времени процесса термической подготовки (инертный нагрев, испарение внутрипоровой влаги, термическое разложение органической части топлива). Все эти процессы являются относительно (по сравнению с непосредственным реагированием) продолжительным. По этой причине в общем времени задержки воспламенения период интенсивного химического реагирования (с экспоненциальным ростом температуры) продуктов пиролиза и окислителя незначителен (не превышает значения $0,02 \cdot t_{ign}$ по данным [152]).

Рисунок 2.8.2 иллюстрирует динамику изменения безразмерной температуры поверхности (θ_{sur}) капли ВУТ в рамках двух (одностадийной и многостадийной) кинетических моделей газофазного воспламенения.

$$\text{где } \theta_{sur} = \frac{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi T(r_0, \Phi, t) d\Phi}{T_g}$$

Анализ зависимостей $T_{sur}(t)$ показывает, что весь период термической подготовки можно условно разделить на ряд последовательных характерных стадий. В начальный период времени происходит инертный нагрев капли ВУТ. После этого инициируется процесс интенсивного испарения воды. В результате формируется пористый угольный каркас с низкой теплопроводностью и теплоемкостью. При этом можно отметить, что период испарения воды самый продолжительный. Это обусловлено тем, что в результате фильтрации водяных паров происходит охлаждение угля. На финальной стадии (при $t > 0.9 \cdot t_{ign}$) происходит резкое увеличение скорости роста температуры. Также на Рисунке 2.8.2 приведен тренд безразмерной температуры частицы в ее центре $\theta_{cen}(t)$.

$$\text{где } \theta_{cen} = \frac{T(0,t)}{T_g}$$

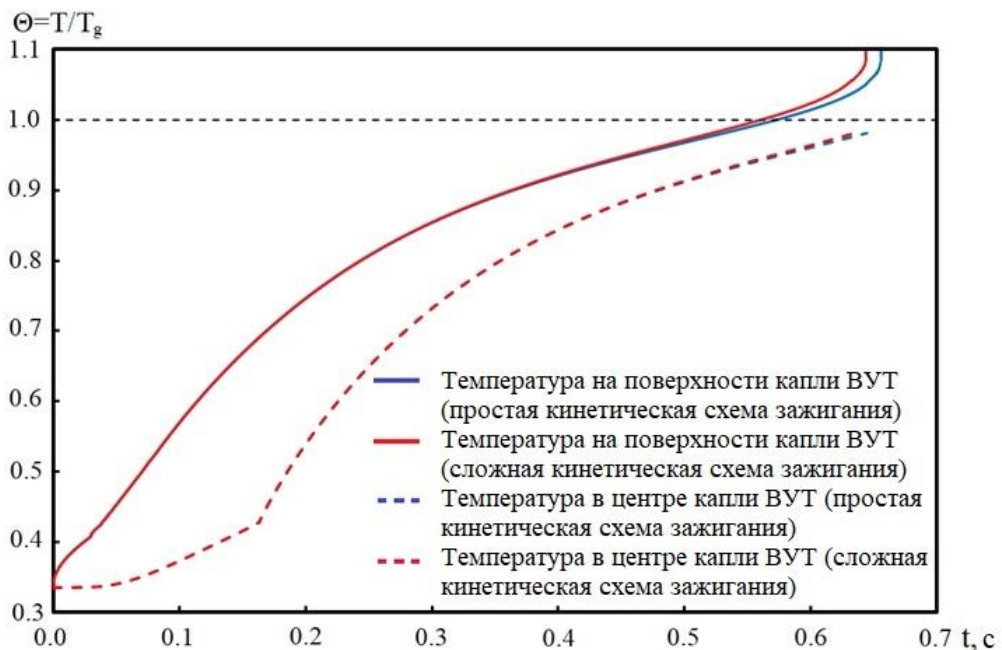


Рисунок 2.8.2 — Динамика безразмерной температуры поверхности и в центре частицы (диаметром $d = 0,45$ мм) в период индукции

Можно отметить характерный излом кривой, соответствующий периоду времени от 0,1 до 0,2 секунд. Такое изменение характера функции $\theta_{cen}(t)$ обусловлено полным удалением влаги топлива. В результате существенно уменьшается его теплоемкость. По этой причине температура с ростом времени начинает расти значительно быстрее. Можно отметить, что в момент воспламенения разница значений температур между центром и поверхностью частицы незначительна. Это, скорее всего, обусловлено тем, что на условие воспламенения частиц водоугольного топлива влияет концентрация продуктов пиролиза в их пограничном слое. По этой причине малые по размерам частицы зажигаются только после

достаточно глубоко прогрева всего слоя топлива и выделения критического (по условиям воспламенения) количества летучих.

Можно отметить незначительные отличия значений функций $T_{\text{sur}}(t)$ при моделировании воспламенения капли ВУТ в рамках моделей одностадийной и многостадийной кинетик газофазных реакций.

На Рисунках 2.8.3 и 2.8.4 приведены распределения температуры в системе «водоугольная частица – газовая среда» в момент воспламенения частиц двух характерных размеров ($d = 0,4$ мм (Рисунок 2.8.3) и $d = 2.5$ мм (Рисунок 2.8.4)) при температуре внешней среды $T_g = 873\text{K}$. Можно отметить, что у относительно крупных частиц ($d > 1$ мм) газофазное воспламенение летучих происходит в аэродинамическом следе частицы ВУТ. Это обусловлено тем, что в процессе обтекания топливной частицы газообразные продукты пиролиза уносятся в «подветренную» зону частицы ВУТ. Процессы же воспламенения малых по размерам частиц происходят на поверхности в «наветренной» зоне. Последнее также регистрировалось в экспериментах [152]. Скорее всего это обусловлено тем, что зажигание летучих происходит в порах приповерхностного слоя частицы топлива. С целью сопоставления результатов математического моделирования и экспериментов [152] на Рисунках 2.8.2, 2.8.3 приведен кадр видеogramмы момента воспламенения [152].

Можно отметить незначительные отличия расчетных значений температур в момент воспламенения капли ВУТ при описании процесса газофазного зажигания с использованием двух существенно отличающихся кинетических схем газофазных реакций. Это обусловлено тем, что формальная (полученная по результатам экспериментальных данных) кинетическая модель одностадийного протекания реакций окисления летучих описывает (учитывает) опосредовано большое число элементарных химических реакций, входящих в цепь глобальной реакции [152].

По результатам математического моделирования установлено, что возможны режимы воспламенения капли водоугольного топлива в условиях продолжающегося испарения внутривещной влаги. Соответственно, можно сделать обоснованный вывод о том, что в этом случае последующие процессы зажигания и горения капли ВУТ будут существенно отличаться (по основным характеристикам как процесса) от окисления сухого угля. Как показано в [174] диффундирующие водяные пары формируют в пограничном слое частицы своеобразный барьер, препятствующий диффузии продуктов пиролиза во внешнюю среду. Это приводит к существенному увеличению периода индукции и времени горения топлива.

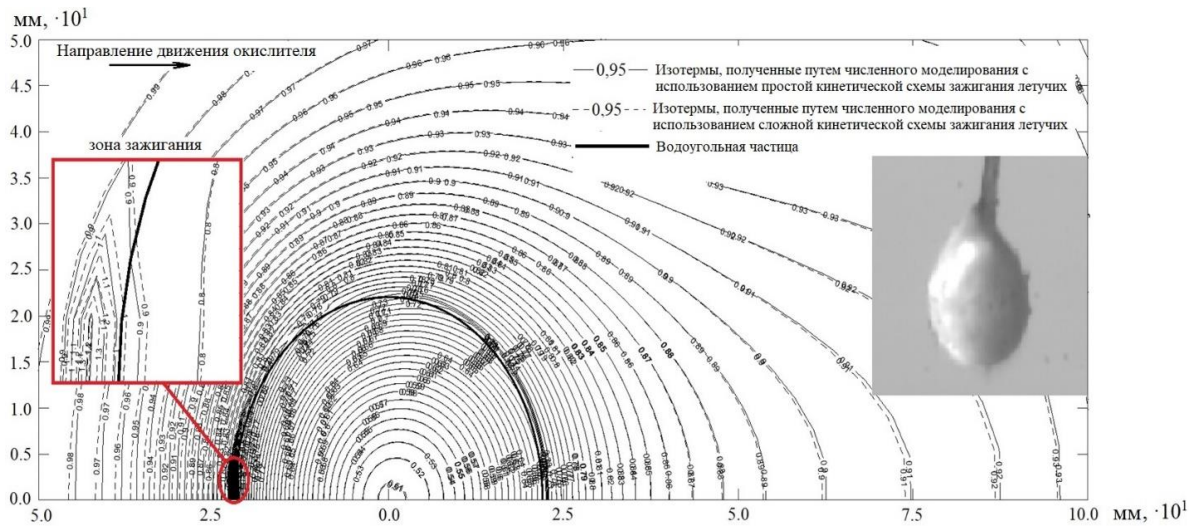


Рисунок 2.8.3 — Температурное поле в момент зажигания капли водоугольного топлива размером $d = 0.4$ мм (модели одностадийной и многостадийной кинетики)

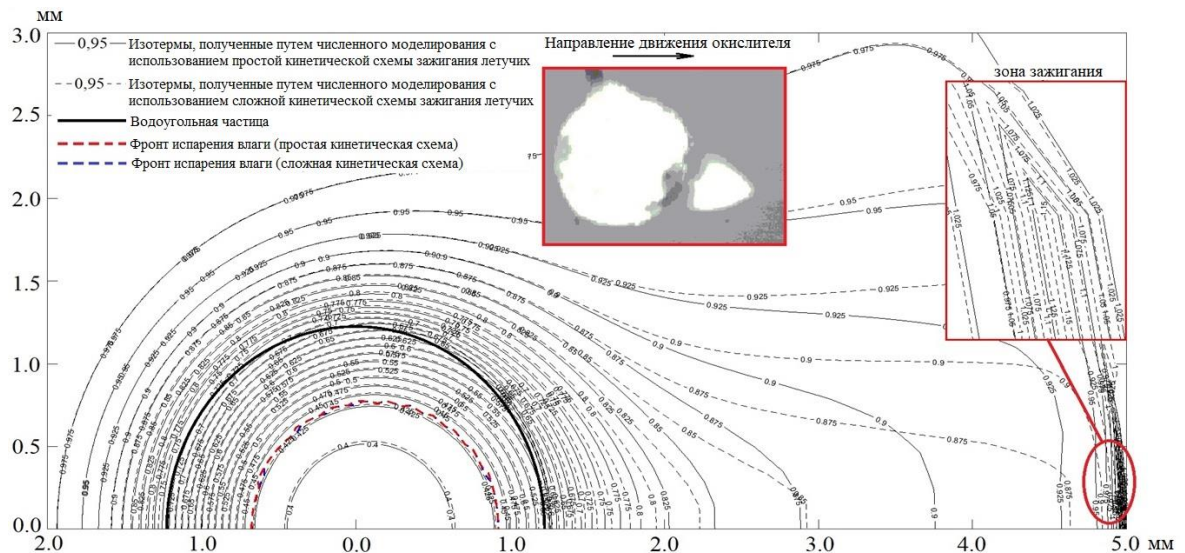


Рисунок 2.8.4 — Температурное поле в момент зажигания капли водоугольного топлива размером $d = 2.25$ мм, при рассмотрении одностадийной и многостадийной кинетики

Выводы по второй главе

1. По результатам экспериментальных исследований выделены основные закономерности процесса зажигания частиц водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочному пространству котельного агрегата. Сформулирована новая математическая модель воспламенения частиц ВУТ, учитывающая совместное протекание основных процессов

термической подготовки (инертный прогрев, испарение воды, термохимическое взаимодействие фильтрующихся паров воды с углеродом кокса, термическое разложение органической части угля, воспламенение частицы ВУТ) в индукционный период времени.

2. Результаты моделирования показали, что в условиях проведения эксперимента существенное влияние оказывает металлически держатель капли. Как показало математическое моделирование через последний происходит значительный отток теплоты, подводимой к капле за счет конвекции и излучения, во внешнюю среду.

3. Проведенные численные исследования показали, что способ вычисления теплофизических свойств водоугольного топлива оказывает влияние на характеристики и условия воспламенения. Показано, что при температуре внешней среды $T_g = 1000\text{K}$ отклонения $t_{\text{ign}}(T_g)$ составляет не более 10%. Увеличение же T_g приводит к росту отклонений времён задержки воспламенения до 15%. Соответственно, можно сделать вывод о том, что применение того или иного метода описания теплофизических характеристик неоднородных (в процессе термической подготовки) водоугольных топлив не приводит к значимым отклонениям расчетных характеристик (t_{ign}) процесса воспламенения. На основании численного моделирования воспламенения частиц ВУТ можно сделать достаточно обоснованный вывод о возможности использования простых моделей теплопроводности, теплоемкости и плотности таких топливных композитов.

4. По результатам выполненных экспериментальных и теоретических исследований установлены условия и характеристики воспламенения покрытых водяной пленкой частиц водоугольного топлива. Установленные зависимости показывают, что испарение слоя воды оказывает существенное влияние на характеристики процесса зажигания частиц ВУТ в потоке высокотемпературного окислителя. При этом механизм воспламенения топлива на основе угля отличается от зажигания таких же (по размерам) топливных частиц, но на базе фильтр – кека. Показано, что время испарения пленки может занимать до 60% от общего индукционного периода. С применением метода «квазистационарного теплового приближения» разработано аналитическое решение нелинейной задачи зажигания частицы ВУТ.

5. Сформулирована математическая модель термической подготовки и зажигания частицы водоугольного топлива, учитывающая кроме комплекса теплофизических и физико – химических процессов, протекающих совместно при газофазном воспламенении водоугольных капель, диффузию газообразных продуктов термического разложения угольной компоненты ВУТ в тонком слое газа вокруг частицы топлива. Проведенное прогностическое моделирование зажигания кокса показало, что инициирование горения коксового остатка происходит практически сразу после воспламенения летучих. Период времени

между воспламенением летучих и углерода кокса не превышает 0.5 секунды.

6. По результатам численного моделирования показано, что вид и марка угля может оказывать существенное влияние на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива. Установлено, что частицы ВУТ, выполненные из антрацита и полуантрацита, зажигаются быстрее (примерно на 20%) капель ВУТ, приготовленных из других каменных углей. Медленнее всего воспламеняются капли ВУТ из жирных углей. Это обусловлено прежде всего меньшей теплоемкостью и большой теплопроводностью углей типа «А» и «ПА» по сравнению с «Ж», а также относительно низким тепловым эффектом термического разложения топлива. Соответственно, можно обосновано сделать вывод, что длительность периода индукции водоугольного топлива определяется теплофизическими процессами, протекающими в период термической подготовки, а не только кинетикой воспламенения.

7. Выявлено влияние теплового излучения (с учетом условий проведенных экспериментов) на прогностические оценки значений времен задержки воспламенения. Установлено, что наиболее приближенные к экспериментальным значениям t_{ign} получаются времена задержки, рассчитанные при применении модели теплоизлучения типа «серая стенка». Учет же реальных условий эксперимента (совокупность расположения и форм источника и приемника теплового излучения) не оказывает значительного влияния на характеристики и условия воспламенения. Проведенный асимптотический анализ динамики нагрева частицы ВУТ показал, что наибольшее (определяющее) влияние оказывает комплекс процессов термической подготовки (в частности: инертный нагрев, испарение воды, термическое разложение), а не процесс термохимического взаимодействия горючего с окислителем.

8. Разработана математическая модель процесса воспламенения частицы водоугольного топлива, учитывающая полный комплекс теплофизических (нагрев основного слоя топлива, испарение влаги), термохимических (пиролиз угля, взаимодействие водяных паров с углеродом кокса, газофазное воспламенение продуктов пиролиза) и газодинамических (внутренний фильтрационный теплоперенос, обтекание частицы внешним газовым потоком) процессов. Показано, что увеличение скорости обтекания частицы приводит к удлинению общего периода воспламенения. Последнее обусловлено «сдувом» газообразных продуктов пиролиза в аэродинамический след частицы топлива. При этом установлено, что воспламенение газообразных продуктов пиролиза происходит в «хвостовой» зоне пограничного слоя топливной частицы. По результатам математического моделирования установлено, что топливные частицы могут воспламеняться еще до полного испарения

всей влаги. При этом в глубинных слоях топлива формируется фронт испарения, форма которого существенно не линейна и не поддается полиномиальной аппроксимации. Отмечено, что «лобная» зона топливной частицы сохнет более интенсивно по сравнению с «хвостовой». Это обусловлено высоким энергетическим напряжением, вследствие воздействия набегающего потока

9. Проведенный анализ влияния значений критерия Da на времена диспергирования показал существенное влияние проницаемости структуры топлива на характеристики и условия разрушения водоугольных частиц. Показано, что при $Da < 5$ диспергация частицы не происходит. Это обусловлено тем, что проницаемость пористой структуры настолько высока, что внутрипоровая влага успевает испариться, и водяные пары выходят на поверхность. При этом критический (для разрушения) перепада давления не достигается. При $Da > 10$ выполняются условия диспергирования водоугольной частицы. Анализ полей внутрипорового давления показал, что в слое топлива формируются существенно нелинейные и ассиметричные распределения давлений, которые зависят от формы фронта испарения. При этом в центральной части топлива образуется зона высокого давления без перепадов p . Это обусловлено очень низкой сжимаемостью воды, являющейся одним из основных компонентов топлива.

10. Впервые разработана математическая модель зажигания частицы водоугольного топлива, описывающая процесс газофазного реагирования газообразных продуктов пиролиза угля с окислителем в рамках многостадийной (с параллельно и последовательно протекающими реакциями) кинетической схемы зажигания основных компонентов летучих. Показано, что существенная детализация кинетической схемы процессов горения летучих слабо влияет на условия и характеристики процесса зажигания капли водоугольного топлива. Это обусловлено тем, что кинетика эффективной брутто реакции обобщает кинетики всех элементарных реакций.

Основные результаты главы 2 опубликованы в [151, 152, 159, 165, 171, 173, 178 – 180, 183 – 191].

ГЛАВА 3 ЗАЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Последние тенденции в энергетической политике ведущих экономически – развитых государств мирового сообщества показывают, что на настоящее время значимое влияние на тренды развития мирового энергетического сектора оказывают нерешенные экологические проблемы энергетики. К таковым относятся существенное антропогенное воздействие тепловых электрических станций и локальных котельных на атмосферу. Решением могли бы стать возобновляемые источники энергии, такие как ветеро – электрогенераторы [376] или фотоэлектрические преобразователи [377]. Но как уже говорилось выше, на примере стран Западной Европы попытки масштабного внедрения ВИЭ в энергетический сектор экономики не дало желаемых результатов – ВИЭ так и не стали базовыми производителями тепловой и электрической энергии. Достоверно, по результатам многих экспериментов (например, [378, 379]) установлено, что одним из самых перспективных, достаточно эффективных и в тоже относительно дешевых методов снижения воздействия ТЭС на атмосферу является использование в качестве топлива (основного или как добавка к углю или газу) древесной биомассы.

Стоит сказать, что анализом возможности внедрения в общий баланс тепло – и электрогенерации древесины занимаются ведущие специалисты многих стран, работающие в области энергетики. Однако, анализ статей в мировой научной периодике показывает, что основная тематика исследований посвящена пиролизу (например, [380, 381]) древесной биомассы или ее горению (например, [382, 383]). При этом процессы зажигания древесины изучены недостаточно для разработки общей теории термической подготовки, зажигания и горения частиц влажной древесной биомассы. Поэтому цель этой главы диссертации – разработка математической модели процессов воспламенения частиц влажной древесной биомассы в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов тепловых электрических станций.

3.1 Условия и характеристики зажигания частиц древесины в потоке высокотемпературных газов

Проведенный анализ современного состояния теории и практики процессов воспламенения и горения частиц древесины (например [254]) показывает, что современные математические модели не описывают в полной мере совместно протекающие в индукционный период процессы: испарение влаги, содержащейся в древесине; фильтрация водяных паров

к поверхности нагрева; взаимодействие водяного пара и углерода кокса, а также газообразных продуктов пиролиза и внешнего окислителя в малой области вокруг частицы; диффузия водяных паров и продуктов термического разложения во внешней среде [175]. Соответственно, разработка математической модели зажигания древесины в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов является актуальной и не решенной до настоящего времени задачей. По этой причине цель данного параграфа диссертации – экспериментальное и теоретическое исследование условий и характеристик зажигания одиночных частиц древесины в потоке высокотемпературных газов в рамках математической модели, описывающей основные физико – химические процессы, протекающие в период индукции.

Исследования проведены для частиц древесины выполненных из сибирской лиственницы. Теплофизические характеристики приведены в [159] (приложение А). В экспериментах использовались частицы, вырезанные из монолитного сухого фрагмента древесины больших размеров. В дальнейшем при помощи шлифовального станка с размером зерна 58 мкм проводилась доводка формы последних до сферической и достигались необходимые размеры. Затем проводилось взвешивание частиц, с целью определения сухой массы. После этого древесная биомасса помещалась в воду и выдерживалась в ней. После периода выдержки (5 суток) частицы взвешивались повторно, с целью определения влажности. Влажность частиц древесины в экспериментах при проведении экспериментов составила $\varphi = 60\%$.

Экспериментальные исследования проведены на стенде, который по своим методам регистрации основных значимых характеристик процесса воспламенения и методике обработки результатов экспериментов аналогичен описанному в разделе 2.2 экспериментальному стенду [170].

На Рисунке 3.1.1 приведены кадры типичной видеороликовой съемки процесса зажигания частицы влажной древесной биомассы (с характерным размером $\delta = 3$ мм). Температура внешней среды $T_g = 1270\text{K}$. Установлено, что период времени от начала нагрева до момента воспламенения $t_{\text{ign}} \approx 10$ с. Как показывают эксперименты процесс термической подготовки можно условно разделить на ряд последовательных взаимосвязанных стадий:

1. инертный радиационно – конвективный нагрев;
2. испарение внутрипоровой воды;
3. термическое разложение основных компонентов биомассы, сопровождающиеся выходом летучих;
4. воспламенение газообразных продуктов пиролиза;

5. зажигание углерода кокса.

Анализ видеogramмы экспериментов показал, что после введения частицы древесной биомассы в высокотемпературную среду инертный нагрев (кадр а) с испарением воды и термическим разложением (кадр б). Подробный (при большом увеличении) анализ кадра «в» показывает характерное изменение цвета (потемнение) поверхности частицы древесины. При $t = t_{\text{ign}}$ после начала нагрева происходит воспламенение (кадр с) летучих. Можно отметить, что зона воспламенения локализуется в верхней полусфере частицы. После зажигания летучих формируется сфера пламени (кадры в и г), размер которой в $2 \div 3$ раза превышает размер частицы. Соответственно, можно сделать вывод, что применение, например, метода «тонкой приведенной пленки» [324] при проведении прогностического моделирования процесса воспламенения и горения частицы влажной древесной биомассы может привести к существенным погрешностям в определении характеристик зажигания.

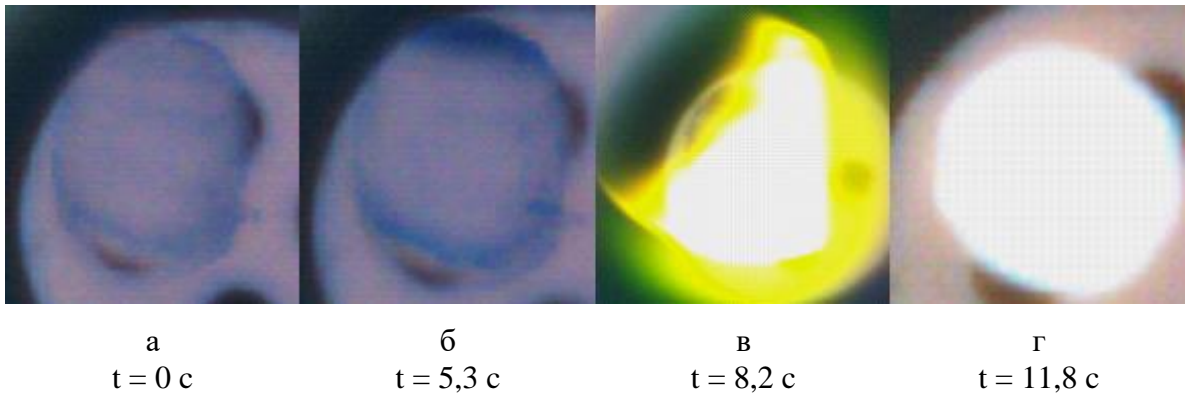


Рисунок 3.1.1 – Типичные кадры процессов зажигания частицы влажной древесной биомассы

По результатам экспериментов установлены времена задержки воспламенения частиц влажной древесины. Зависимости t_{ign} от условий теплообмена приведены ниже на Рисунках 3.1.3 и 3.1.4. Также по результатам анализа видеogramм сформулирована физическая и математическая модели, описывающие комплекс совместно протекающих процессов (передача тепла теплопроводностью, испарение воды, термическое разложение топлива, взаимодействие водяных паров с углеродом кокса, газофазное воспламенение продуктов пиролиза) термической подготовки и зажигания частиц древесины.

Принята физическая модель процессов тепло – и массопереноса (инертный нагрев, теплоперенос теплопроводностью) в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и физико – химических (термическое разложение, выход летучих, взаимодействие водяных паров и углерода, газофазное воспламенение продуктов пиролиза) превращений, протекающих совместно, соответствующая условиям эксперимента и установленным при его проведении закономерностям [170, 175].

В начальный момент времени древесная частица вводится в высокотемпературную среду и нагревается за счет конвекции и излучения. В результате интенсивного нагрева инициируется процесс испарения воды. Фронт испарения движется от поверхностных слоев топлива в глубинные. В результате формируется пористый древесный каркас с высоким термическим сопротивлением. Водяные пары, образующиеся при испарении, фильтруются сквозь слой сухого топлива, вступая в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса. Прогрев частицы древесины приводит к термическому разложению и выходу летучих. Последние совместно с парами воды и продуктами термохимического взаимодействия углерода и водяных паров фильтруются к поверхности частицы топлива [170]. В результате формируется парогазовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температур и концентраций горючего [175]. Необходимо отметить, что при термическом разложении образуется газовая смесь, химический состав которой зависит от множества факторов (породы древесины, степень гнилостного разрушения, влажность). Состав соответствующих компонентов летучих приведен в приложении А.

Математическая постановка задачи воспламенения частицы влажной древесной биомассы по своей структуре системы уравнений соответствует математической постановке задачи зажигания частицы водоугольного топлива по аналогии с §2.5 [171].

С целью верификации математической модели проведен сравнительный анализ экспериментальных и рассчитанных численно значений времен задержки воспламенения древесных частиц ($\delta = 3$ м). На Рисунке 3.1.2 приведены экспериментальные и теоретические зависимости времен задержки воспламенения частицы от температуры внешней среды. Анализ результатов экспериментов показывает, что температура внешней среды оказывает существенное влияние на динамику термической подготовки и воспламенения топлива. Так увеличение температуры на 400К (с 873К до 1273К) приводит к ускорению зажигания более чем в 4 раз. Линейный размер частицы также оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Так изменение диаметра частицы с $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$ м до $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м приводит к ускорению зажигания в 3 раза (с $t_{ign} = 30$ с до $t_{ign} = 10$ с). Также необходимо отметить нелинейный (можно сказать экспоненциальный) характер кривых (1) – (4) (Рисунок 3.1.3). Последнее свидетельствует о существенном влиянии комплекса совместно протекающих в индукционный период процессов термической подготовки (перенос тепла теплопроводностью, испарение влаги, термическое разложение органической части топлива, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода кокса, воспламенение летучих). Анализ зависимостей (1) – (4) показывает, что во всем интервале исследуемых температур отличия теоретических значений t_{ign} от экспериментальных не превышают 14%

(другими словами находятся в пределах доверительного интервала). Такое хорошее в целом соответствие теоретических и экспериментальных результатов сохраняется и для частиц диаметром 1,5 мм.

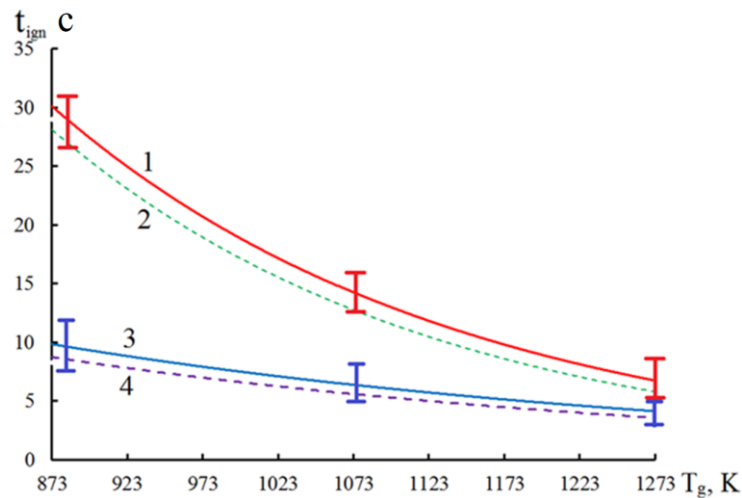


Рисунок 3.1.2 – Зависимость времени задержки воспламенения древесной частицы от температуры внешней среды: 1,2 – диаметр частицы $\delta = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м; 3,4 – $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; 1,3 – эксперимент; 2,4 – численное решение

На Рисунке 3.1.3 приведены экспериментальные и теоретические зависимости влияния начального содержания влаги (для удобства восприятия на Рисунке приведена доля сухого горючего $\gamma = 1 - \phi$) частицы древесины на условия и характеристики ее зажигания. В экспериментах исследовались частицы диаметром $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$ м, при температуре внешней среды $T_g = 1073$ К. Анализ полученных на Рисунке 3.1.3 зависимостей показывает, что влажность топлива оказывает достаточно существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Так увеличение ϕ на 20% (с 40% до 60%) приводит к повышению времени задержки воспламенения на 7 секунд (с 5 до 12 сек.). Последнее свидетельствует о существенном влиянии влажности топлива на условия формирования температурных полей внутри частиц. Также на Рисунке 3.1.3 приведены рассчитанные численно значения времен задержки воспламенения частиц влажной древесины. Можно отметить, что как уже отмечалось ранее математическая модель с достаточно высокой степенью достоверности описывает комплекс процессов тепломассопереноса при воспламенении топлива.

После верификации математической модели проведено прогностическое моделирование воспламенения древесных частиц в условиях, соответствующих топочному пространству котельных агрегатов. На Рисунке 3.1.4 приведены зависимости времени задержки воспламенения частиц влажной древесины от температуры внешней среды при различных линейных размерах последних.

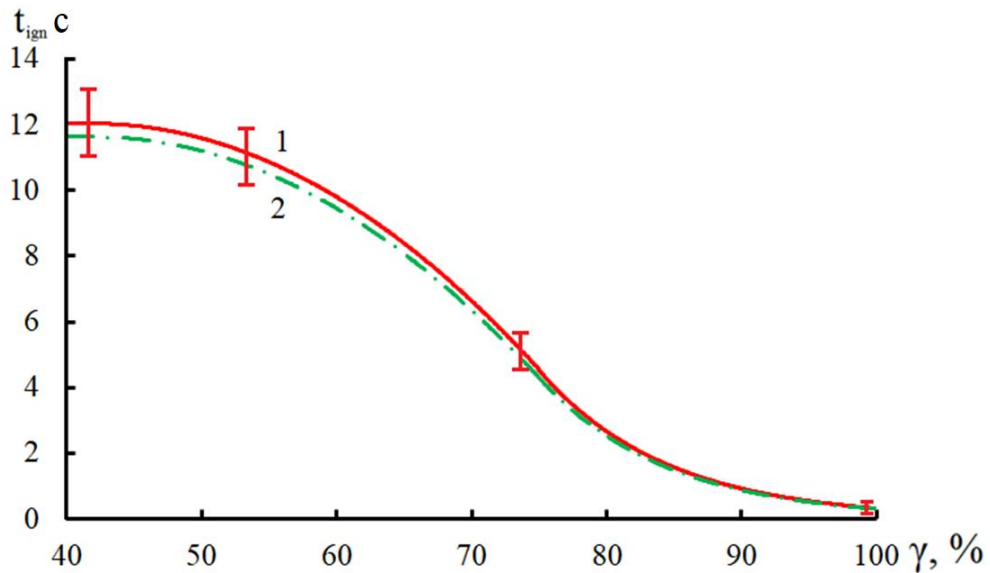


Рисунок 3.1.3 – Зависимость времени задержки воспламенения от степени влажности топлива диаметром частиц $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$ м и температуры окружающей среды $T_g = 1073\text{K}$:
1 – эксперимент; 2 – численное решение

На Рисунке 3.1.5. приведены распределения температур в системе «топливная частица – газовая среда» в момент воспламенения при температуре внешней среды $T_g = 1373\text{K}$. Анализ зависимостей показывает, что, как правило, зажигание происходит в газовой фазе. При этом стоит отметить, что зона воспламенения (экстремум температур) смещен к внешней границе газовой области. Последнее свидетельствует о неполной адекватности метода «приведенной тонкой пленки» [324] при расчетах процессов воспламенения древесных частиц. Также можно сделать вывод о том, что возможны (при размерах частиц $\delta > 1 \cdot 10^{-3}$ м) режимы зажигания еще водонасыщенных частиц древесины. Зажигание относительно мелких частиц древесины ($\delta < 1 \cdot 10^{-3}$ м) происходит только после их полного обезвоживания.

Очевидно, что горение топлива в условиях продолжающегося испарения будет существенно отличаться от окисления сухого горючего. Скорее всего высокий эндотермический эффект процесса испарения влаги будет приводить к формированию относительно холодных зон в корне топливного факела. Соответственно с целью стабилизации температурного режима горения в топочном пространстве необходимо организовать зоны постоянной рециркуляции (по аналогии с топкой конструкции Шершнева [384]), в которых будет производиться сушка древесной биомассы.

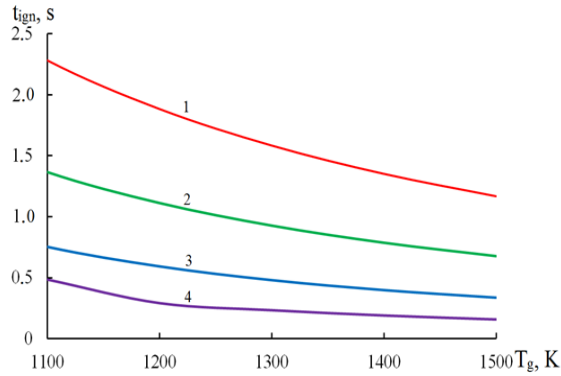


Рисунок 3.1.4 – Время задержки воспламенения влажных ($\varphi = 30\%$) частиц древесной биомассы в зависимости от температуры окружающей среды.

1 – диаметр частицы $\delta = 4,0$ мм;
 2 – $\delta = 3,0$ мм; 3 – $\delta = 2,0$ мм;
 4 – $\delta = 1,0$ мм

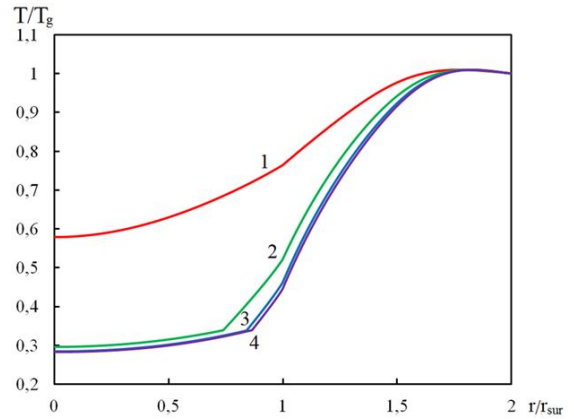


Рисунок 3.1.5 – Распределение температуры по радиусу в системе «древесная частица – газовая среда» в момент воспламенения (температура окружающей среды $T_g = 1100$ К) летучих при диаметре частиц:

1 – $\delta = 1,0$ мм; 2 – $\delta = 2,0$ мм;
 3 – $\delta = 3,0$ мм; $\delta = 4,0$ мм

Стоит отметить, что относительное положение фронта испарения в момент зажигания для частиц $\delta > 1 \cdot 10^{-3}$ м с ростом диаметра меняется незначительно. Последнее показывает, что зажигание происходит только после формирования сухого слоя древесины и как следствие выделения определенного (критического) количества летучих.

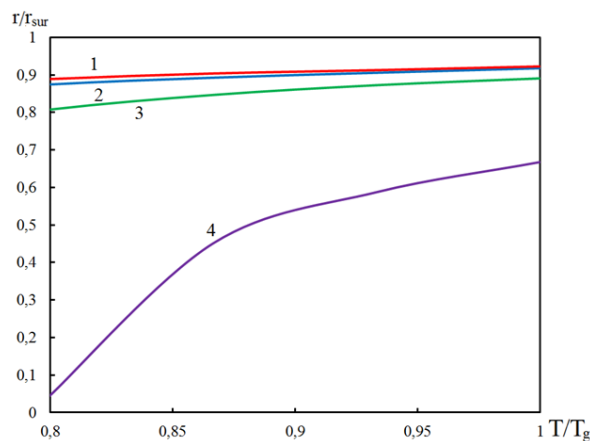


Рисунок 3.1.6 — Зависимость положения фронта испарения в момент воспламенения древесной частицы диаметром: 1 – $\delta = 1,0$ мм; 2 – $\delta = 2,0$ мм; 3 – $\delta = 3,0$ мм; $\delta = 4,0$ мм

На Рисунке 3.1.6 приведены зависимости положений фронта испарения в момент воспламенения. Анализ показывает, что при увеличении диаметров частиц, размер сухого слоя, необходимого для воспламенения, уменьшается. Так при температуре внешней среды

$T_g = 1200\text{K}$ увлечение δ с $1,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ до $4,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ приводит к тому, что размер сухой зоны возрастает в 9 раз. Также можно сказать, что температура внешней среды оказывает существенное влияние на условия и характеристики зажигания только для относительно мелких частиц ($\delta < 1,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}$). Для более крупных частиц влияние температуры внешней среды не оказывает значительного влияния на положения фронта испарения в момент воспламенения.

3.2 Влияние формы частицы влажной древесной биомассы на характеристики ее воспламенения в высокотемпературной среде

Из теории воспламенения и горения твердого топлива [315] (в том числе древесины [383]) известно, что динамика процессов воспламенения определяется влиянием многих факторов (размер частиц топлива, влажность и порода древесины, форма частиц). В то же время, по мнению Б.Д. Сподинга [250] и Д.А. Франк – Каменецкого [249] динамика термического разложения органической части топлива оказывает самое значительное влияние на характеристики и условия воспламенения частиц древесины. В то же время, как установлено по результатам экспериментальных [385] и теоретических [386] исследований, что наиболее интенсивный процесс термического разложения (соответственно и выход газообразных продуктов пиролиза) протекает в древесных частицах в форме шара, затем в форме цилиндра и кубиков. В этом случае можно сказать, что характеристики и условия процесса воспламенения древесных частиц, протекающего практически всегда в газовой фазе, будет напрямую зависеть от формы частицы.

По результатам экспериментальных и теоретических исследований установлено, что размер частиц также оказывает существенное влияние на скорость воспламенения [170]. При этом, результаты исследований [170] показывают, что влажность топлива также оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Так, при внешней температуре $T_g = 1073\text{K}$ время задержки воспламенения частицы (с характерным размером $d = 3\text{ мм}$) влажной древесины уменьшается с 12 с до 0,5 с при уменьшении влажности (φ) с 60% до 0 % (то есть в 24 раза). Но сжигание влажных древесных частиц технологически и экономически более выгодно, чем окисление предварительно высушенных ($\varphi = 0\%$) за счет исключения из технологического цикла предварительной термической подготовки топлива (сушки) крупногабаритного оборудования (сушильных агрегатов) и металлоконструкции систем транспортировки сушильного агента (высокотемпературные возду-

хопроводы). По этой причине можно сказать, что фактор формы частицы сравним по своему значению с факторами влажности древесины и размером частиц топлива. Поэтому целью этого параграфа является экспериментальные и теоретические исследования воспламенения частиц влажной древесной биомассы различной формы на примере наиболее типичных геометрических тел (сферы, куба и цилиндра).

Экспериментальные исследования проведены на установке, которая по своим методам регистрации основных значимых параметров (температура внешней среды) и обработки результатов экспериментов (времена задержки зажигания – t_{ign}) соответствует стенду, описанному выше в разделе 2.2. Исследования проводились для частиц влажной древесины, выполненных из лиственницы сибирской.

На Рисунке 3.2.1 приведены кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения частицы влажной древесной биомассы (с характерным размером $\delta = 3$ мм) в форме куба [160]. Температура окислителя $T_g = 1270\text{K}$. Общее время от начала нагрева до момента зажигания в эксперименте составило $t_{\text{ign}} \approx 2,59$ с. Анализ кадров показывает, что процесс термической подготовки древесины условно можно разделить на ряд последовательных этапов [160].

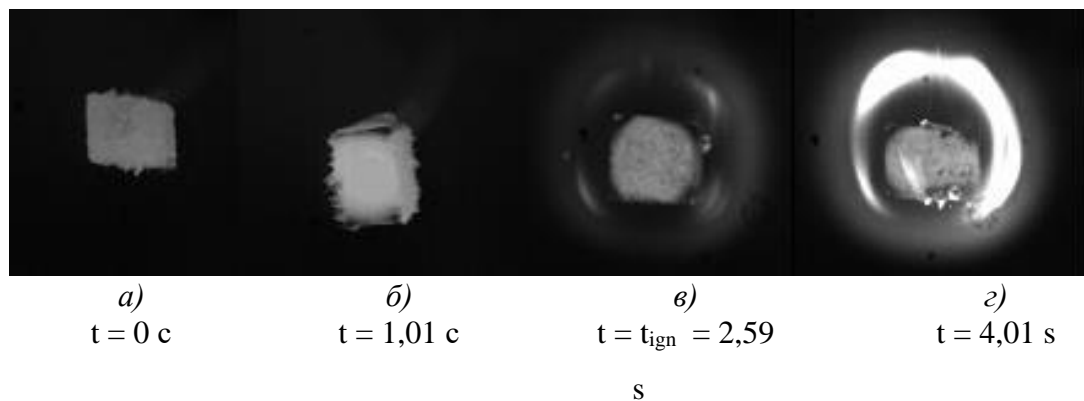


Рисунок 3.2.1 — Типичные кадры видеогаммы процесса воспламенения влажных частиц древесины кубической формы [160].

После введения частицы в высокотемпературную среду инициируется интенсивный нагрев топлива (кадр *a*) и, соответственно, испарение воды. Отчетливо видно усиление яркости поверхности частицы. Нагревание топлива приводит к термическому разложению основных компонентов биомассы (кадр *б*). Детальный (при большом увеличении) анализ кадров (в частности кадр *б*) показывает характерное потемнение поверхности частицы древесины. Это связано с интенсификации процесса пиролиза с образованием, соответственно, газообразных (летучих) и твердых (кокс) продуктов. Можно отметить, что образование коксового остатка в направлении поперек волокон, формирующих древесину, протекает более

интенсивно, чем вдоль них. Последнее, скорее всего, связано с тем, что древесина является существенно анизотропным материалом: теплопроводность вдоль волокон много больше, чем поперек их.

Воспламенение летучих веществ происходит (кадр *в*) в момент $t = t_{\text{ign}}$ после начала нагрева частицы. После воспламенения летучих веществ образуется сфера пламени (кадр *г*), размер которой в 2–3 раза превышает размер исходной частицы. По результатам экспериментов определены времена задержки воспламенения влажных частиц древесины (от 2 до 25 секунд) в зависимости от размеров и формы [161].

На Рисунке 3.2.2 показаны типичные кадры зажигания влажных частиц древесины в форме цилиндра. Анализ видеокadres показывает, что, как и при зажигании куба (Рисунок 3.2.1), можно выделить характерные стадии процесса термической подготовки: инертный нагрев, испарение влаги, термическое разложение и зажигание.

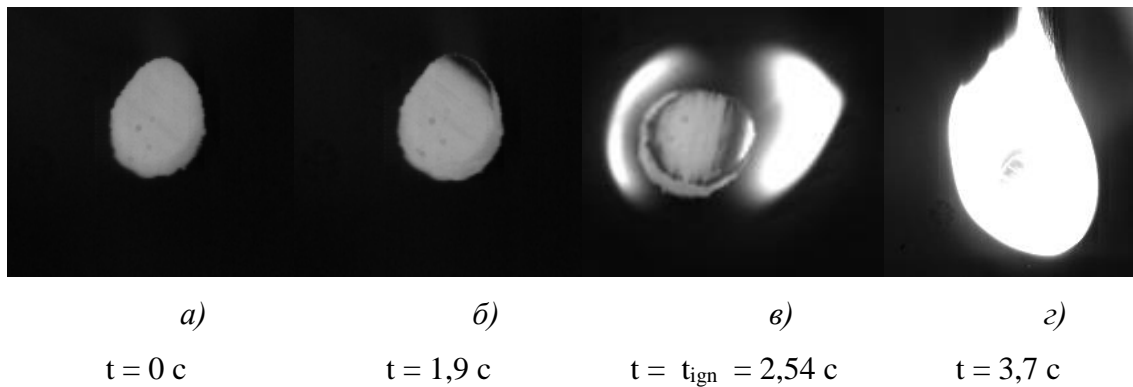


Рисунок 3.2.2. Типичные кадры видеोगраммы процесса воспламенения влажных древесных частиц цилиндрической формы

Физическая постановка задачи по основным закономерностям процессов протекающих при зажигании частиц влажной древесины соответствует приведённой выше (в разделе 3.1). Математическая постановка задачи зажигания частиц влажной древесной биомассы по своей структуре дифференциальных уравнений, замыкающих соотношений и граничных условий соответствует приведенным в разделе 2.5 математической модели [161]. Отличие последней от приведенных в разделе 2.5 заключается в том, что описывается процесс зажигания частиц трех форм (куб, цилиндр, сфера) в двумерной постановке в трех различных системах координат соответственно: Декартовой, цилиндрической, сферической.

С целью верификации математической модели проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений времен задержки воспламенения древесных частиц в форме цилиндра и куба [161]. На Рисунке 3.2.3 показаны экспериментальные и теорети-

ческие зависимости времен задержки воспламенения частицы (двух типичных форм: цилиндр и куб) влажной древесины от температуры внешней среды. Характерный размер частиц ~ 3 мм. Анализ этих зависимостей показывает, что форма частицы оказывает существенное (до 10% задержки воспламенения) влияние на характеристики и условия воспламенения древесины. Можно отметить, что цилиндрические частицы древесины начинают гореть раньше кубических. Следует отметить, что зависимости $t_{ign} = f(T)$ имеют экспоненциальный характер. Последнее связано со значительным влиянием комплекса процессов термической подготовки (радиационно – конвективный нагрев, испарение воды, пиролиз твердого топлива) и воспламенения (воспламенение летучих веществ, зажигание кокса).

На Рисунке 3.2.4 показаны экспериментальные и теоретические зависимости времен задержки воспламенения от температуры окислителя. Характерный размер частиц древесной биомассы ~ 1 мм. По результатам анализа на Рисунке 3.2.4 можно сделать выводы, аналогичные рисунку 3.2.3.

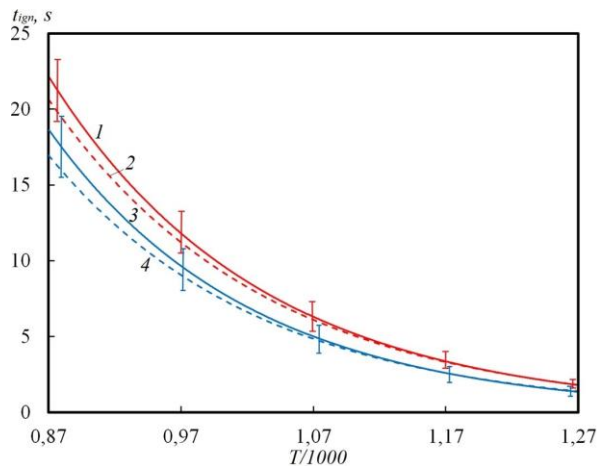


Рисунок 3.2.3 – Зависимость времени задержки воспламенения древесных частиц кубической (кривые 1, 2) и цилиндрической (3, 4) форм от температуры внешней среды. Характерный размер частиц $\delta = 3$ мм: 1, 3 – эксперимент; 2, 4 – теоретические следствия

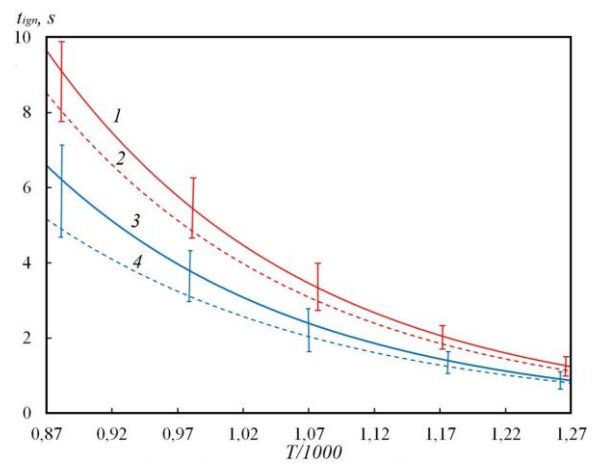


Рисунок 3.2.4 – Зависимость времени задержки воспламенения древесных частиц кубической (кривые 1, 2) и цилиндрической (3, 4) формы от температуры внешней среды. Характерный размер частиц $\delta = 1$ мм: 1, 3 – эксперимент; 2, 4 – решение системы (1) – (7)

Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений времен задержки воспламенения показывает их хорошее соответствие. Можно сделать вывод, что разработанная математическая модель воспламенения частиц влажной древесной биомассы имеет достаточно высокий прогностический потенциал. После верификации математиче-

ской модели проведено численное моделирование процессов воспламенения влажных древесных частиц трех (сфера, цилиндр и куб) различной формы. Следует отметить, что для проведения сравнительного анализа динамики воспламенения древесных частиц различных форм необходимо выбрать критерий оценки сравнения частиц. Использование для этой цели характерного размера частиц недостаточно обосновано. Это связано, прежде всего, с тем, что геометрия частиц существенно отличается, а кубические частицы с ребрами ≈ 3 мм по объему и массе превосходят цилиндрические и сферические частицы диаметром ≈ 3 мм. По этой причине основным критерием сравнения является масса частицы:

$$m_{kub} = m_{cil} = m_{sph}$$

В этом случае можно рассчитать соотношения характерных размеров частиц кубической, сферической и цилиндрической форм:

$$m_i = \delta^3 \rho_w = \pi r_{out}^3 \delta \rho_w = \frac{4}{3} r_{out}^3 \rho_w$$

На Рисунке 3.2.5 показаны значения времен задержки воспламенения для влажных древесных частиц трех форм (куб, цилиндр и сфера) при условии равенства масс. Сравнительный анализ зависимостей показывает, что частицы древесины в форме шара

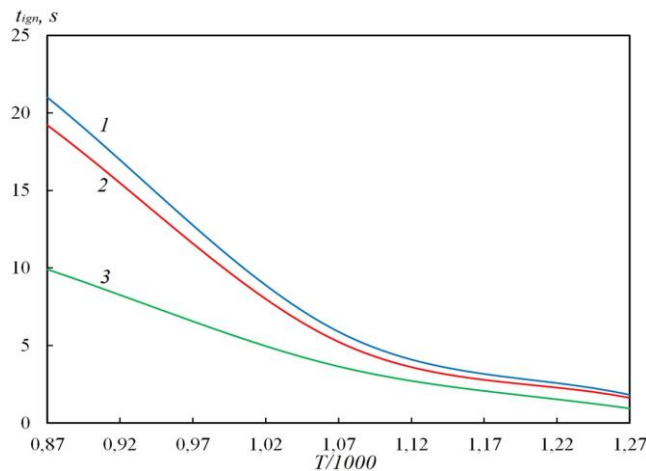


Рисунок 3.2.5 — Зависимость времени задержки воспламенения влажных древесных частиц различной формы при условии идентичности масс последних:

1 — частица дерева в виде куба; 2 — цилиндр; 3 — сфера

воспламеняются при $870\text{K} \leq T_g \leq 1270\text{K}$ намного быстрее, чем цилиндрические и кубические. Это связано с тем, что, как известно из теории теплообмена [413], тела в форме шара нагреваются намного быстрее, чем тела цилиндрической и кубической формы. Соответственно, основные стадии (испарение воды, термическое разложение, выделение летучих)

термической подготовки топлива к воспламенению также протекают быстрее. В этом случае можно сказать, что с точки зрения динамики воспламенения древесные частицы в форме шара являются наиболее предпочтительными при подготовке топлива к сжиганию.

Для обоснования тезиса о существенно большей скорости нагрева слоя топлива при воспламенении сферических частиц по сравнению с цилиндрическими и кубическими частицами введем функцию скорости нагрева:

$$\Psi = \frac{\partial \bar{T}}{\partial t}$$

где

$$\bar{T} = \frac{1}{V} \iiint_V T(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t) dV$$

На Рисунке 3.2.6 показаны зависимости скорости нагрева топливной частицы от времени при температуре окружающей среды. Можно отметить, что сферические частицы нагреваются намного интенсивнее, чем цилиндрические и кубические, с учетом идентичности их масс. Это связано с геометрией частиц.

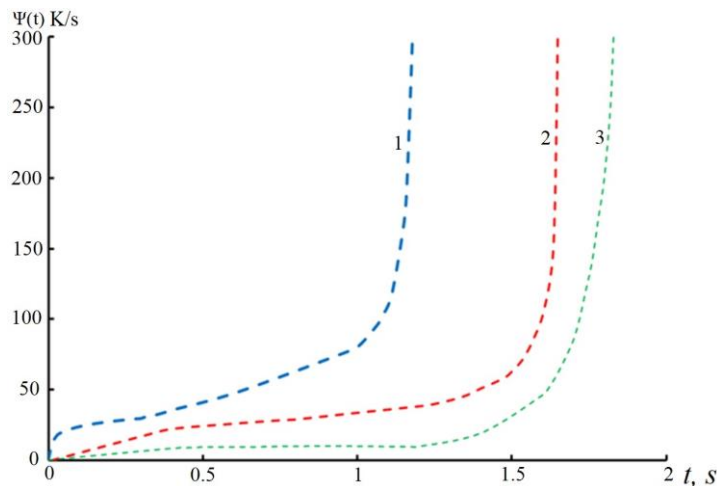


Рисунок 3.2.6 — Зависимость скорости нагрева древесных частиц трех разных форм:

1 – частица дерева в виде сфер; 2 – цилиндр; 3 – куб

На Рисунке 3.2.7 показаны времена задержки воспламенения частиц углеродистого остатка биомассы трех форм (куб, цилиндр и сфера). Анализ зависимостей $t_{\text{ign}}(T_g)$ показывает, что полукоксы начинают гореть практически сразу после воспламенения газообразных продуктов пиролиза. Интервал между моментами воспламенения газообразных и твердых продуктов пиролиза не превышает 1,0 секунды. Это связано с тем, что в условиях горения летучих веществ тепловой поток к поверхности частицы существенно возрастает. В результате начинается процесс сгорания полукоксового остатка топлива.

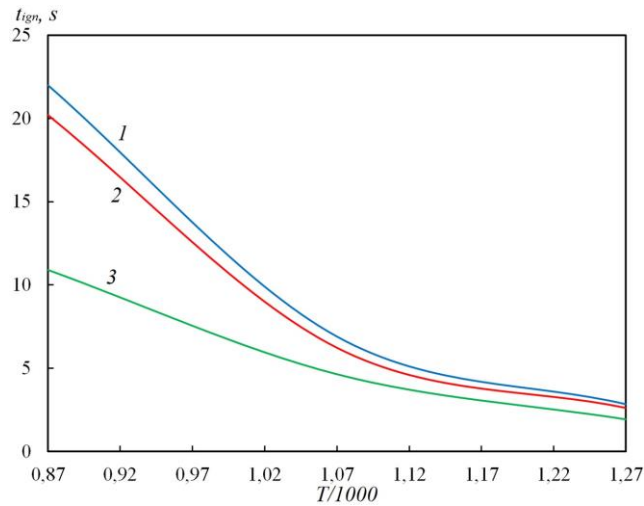


Рисунок 3.2.7 — Зависимость времени задержки коксового остатка влажных древесных частиц различной формы: 1 – частица дерева в виде куба; 2 – цилиндр; 3 – сфера

На Рисунке 3.2.8 (*a*, *б*) приведены численно рассчитанные температурные поля в моменты воспламенения газообразных продуктов пиролиза (*a*) и углерода кокса (*б*) при нагревании влажных частиц древесной биомассы цилиндрической формы (диаметр $\delta = 3$ мм, температура внешней среды $T_g = 1270\text{K}$) [161]. Хорошо видно, что воспламенение летучих происходит на внешней границе газовой зоны. Численное моделирование показало, что частицы с характерным размером 3 мм воспламеняются до полного обезвоживания

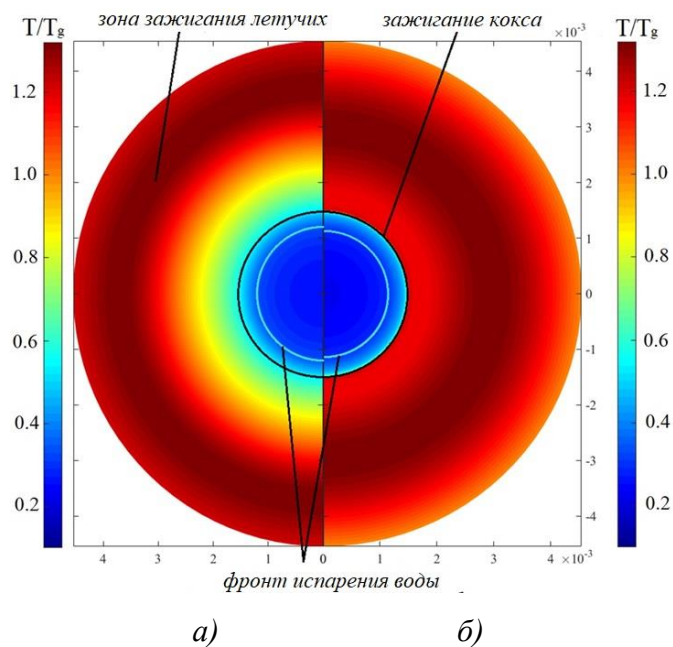


Рисунок 3.2.8 — Температурные поля в момент воспламенения летучих (*a*) и полукокса (*б*) при нагревании частицы влажной древесной биомассы цилиндрической формы в высокотемпературной среде

ния. Очевидно, что механизм горения такой древесины в условиях продолжающегося испарения существенно отличается от окисления предварительно высушенной биомассы. Пары воды вдуваются в пограничный слой частицы и, соответственно, увеличивают зону реакции газообразных продуктов пиролиза с кислородом воздуха. Можно отметить, что инициирование гетерогенного горения происходит до полного испарения воды в глубинных слоях древесины.

На Рисунке 3.2.9 (а, б) показаны температурные поля в момент воспламенения кубической частицы древесины [161]. Можно отметить, что воспламенения газообразных продуктов пиролиза протекает на расстоянии примерно 1,0 мм от поверхности частицы. Соответственно, можно сделать аналогичный Рисунку 3.2.8 вывод, о формировании парами воды некой «буферной» зоны в пограничном слое частицы. Можно отметить, что возгорание коксового остатка локализовано в углах частицы. Это связано с тем, что при нагреве частицы биомассы в угловые точки куба являются своеобразными концентраторами тепловых потоков. Поскольку воспламенение летучих веществ (а) и углерода кокса (б) происходит до полного испарения воды, то в пористой структуре древесины образуется нелинейный фронт испарения. Последний фактор приводит к значительной неоднородности температурного поля.

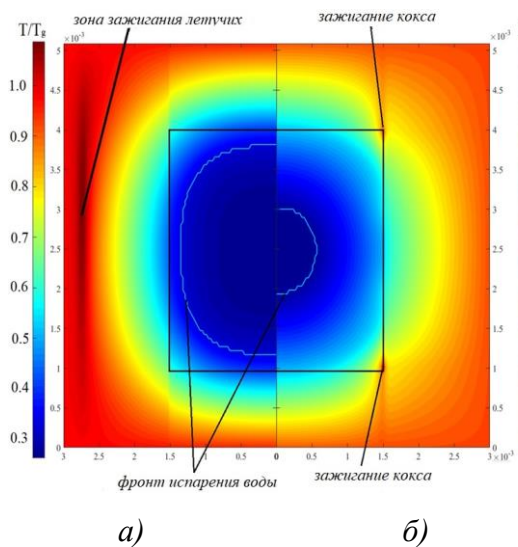


Рисунок 3.2.9 — Температурные поля в момент воспламенения летучих (а) и полукокса (б) при нагревании кубических частиц древесной биомассы

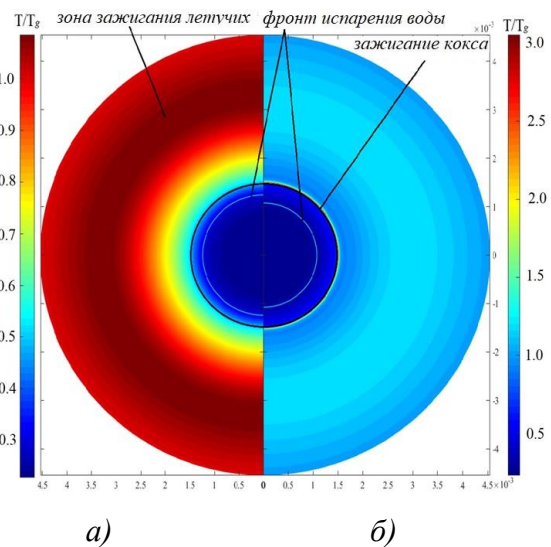


Рисунок 3.3.10 — Температурные поля в момент воспламенения летучих (а) и кокса (б), при нагревании частиц сферических частиц биомассы

На Рисунке 3.2.10 (а, б) показаны температурные поля в системе «частица древесины – окислитель» в момент воспламенения газообразных (а) и твердых (б) продуктов пиролиза основных компонентов биомассы при нагревании сферических частиц (диаметр) влажной

древесной биомассы. По аналогии с Рисунками 3.2.8 и 3.2.9 можно сделать вывод, что иницирование горения происходит во внешней газовой зоне на расстоянии 1~1,5 мм от поверхности частицы. В этом случае воспламенение как газообразных продуктов пиролиза, так и углерода кокса происходит еще до полного испарения влаги [161].

Анализ рисунков 3.2.7 – 3.2.10 показывает, что образование сухого пиролизованного слоя необходимо для воспламенения древесной частицы. В случае воспламенения частиц сферической формы размеры этого слоя меньше, чем при воспламенении частиц цилиндрической или кубической формы.

3.3 Влияние механизма пиролиза на прогностические характеристики процесса воспламенения частицы древесной биомассы

По результатам экспериментов [385, 386] установлено, что при высокоскоростном нагреве древесины происходит ее термическое разложение с выделением твердых, жидких и газообразных продуктов пиролиза. Интенсивность формирования последних оказывает существенное влияние на характеристики воспламенения топливных частиц [387].

Известно [388], что пиролиз древесины является сложным, проходящим в несколько этапов, физико – химическим процессом. При этом стоит сказать, что разработанные к настоящему времени кинетические схемы пиролиза древесины по своей цикломатической сложности варьируются от простых (с малыми числами Бетти [389]) до существенно разветвлённых с большим числом последовательных и параллельных реакций (значение чисел Бетти может достигать нескольких десятков). В тоже время до настоящего времени не проведено теоретических исследований, дающих ответ на вопрос: как влияет выбор кинетической схемы процесса термического разложения основных компонентом древесины на прогноз характеристики и условия воспламенения. По этой причине представляет определенный интерес анализ влияния выбора кинетической схемы процесса пиролиза на результат математического моделирования процесса воспламенения частицы древесной биомассы.

Как было показано в [182], в настоящее время в научной периодической литературе нет примеров публикаций, посвященных исследованиям влияния выбора кинетической схемы пиролиза на результаты моделирования процесса зажигания частиц древесной биомассы. Это в первую очередь связано с тем, что древесина является сложным (с химической точки зрения) композиционным материалом, состоящим из целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, пентозанов и других полисахаридов и кислот [390]. Состав же последних может значительно меняться в зависимости от вида древесины и места ее роста [390]. Термическое

разложение такого вещества представляет собой сложный термохимический процесс, протекающий, как правило, в несколько стадий с последовательными и параллельными химическими экзо – и эндотермическими реакциями [391, 392]. При этом тепловые эффекты (Q) и кинетические константы (предэкспонент – k , и энергия активации – E) этих реакций, полученные различными авторами (обзорная статья [388]), могут существенно отличаться по своим значениям [182]. В реальных условиях, в процессе нагрева в результате пиролиза в структуре древесины могут возникать существенно неоднородные температурные поля с зонами преимущественно эндо – или экзотермических реакций [350].

Состав образующихся в результате термического разложения древесины твердых (кокс) [182], жидких (биомасло и смола) [393] и газообразных (летучие) продуктов [394] зависит от вида древесины и скорости нагрева топлива. Как правило, летучие включают как горючие (CO , CH_4 , H_2), так и негорючие (CO_2 , N_2) газы [395 – 400]. Состав пиролитической жидкости существенно зависит от температуры внешней среды [401, 402] и содержания углерода в древесине [176]. При этом в результате длительного или интенсивного нагрева биомасло и смола также претерпевают термическое разложение с выделением газообразных и твердых (неразлагающаяся смола, кокс) продуктов [403]. Жидкие продукты пиролиза смолы также могут включать в себя значительную долю воды, образующейся при нагреве древесины в результате выхода адсорбционно – связанной влаги [404].

Наиболее часто используемые простые математические модели пиролиза [405] базируются на предположении об одностадийности процесса термического разложения [182]. Так в [405] предполагается, что термическое разложение древесины происходит в один этап (Рисунок 3.3.1), и в результате пиролиза выделяются только летучие. Также предполагается [405], что процесс пиролиза является эндотермическим, с поглощением теплоты термохимического преобразования (Q_{ign}), необходимой для разрыва химических связей. Кинетика процесса описывается с использованием эффективных констант (предэкспоненциального множителя (k) и энергии активации (E)), определяемых экспериментально во всем диапазоне температур от начала до конца термического разложения [182].

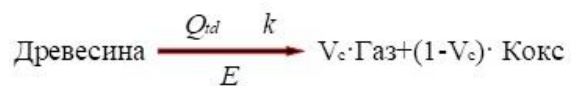


Рисунок 3.3.1 – Схема термического разложения [405, 178]

Но известно [388, 391], что при пиролизе древесины образуется несколько промежуточных продуктов термического разложения различных, как по химическому составу, так и по фазовому состоянию (твердые, жидкие и газообразные) [182]. При этом в условиях нагрева в структуре биомассы одновременно могут протекать термохимические реакции,

обусловленные взаимодействием этих продуктов пиролиза между собой. Поэтому применение схемы [405] при описании термического разложения древесины в условиях интенсивного нагрева, рядом авторов [406, 407], считается недостаточно обоснованным [182].

В [176] указано, Шафизаде и Чином [408] предложена схема пиролиза (Рисунок 3.3.2), описывающая термическое разложение в одну стадию, но с образованием трех компонентов: уголь, смола и газ. Формирование этих компонентов протекает параллельно с различными скоростями. Такой подход недостаточно обоснован, исходя из представлений аналитической химии [409]. Но в [408] отмечается, что сопоставимость энергий активаций нескольких процессов «не позволяет сместиться равновесию химической реакции в сторону формирования одного доминирующего продукта реакции» [388].



Рисунок 3.3.2 — Одностадийная схема пиролиза с параллельным образованием трех продуктов реакции [408, 178]

Известны модели [410], при разработке которых предполагалось, что процесс термического разложения древесины протекает в несколько стадий с образованием промежуточных продуктов. Соответственно, применение модели одностадийного пиролиза может быть как обоснованным, так и недостаточно обоснованной при прогнозировании процессов зажигания частиц древесной биомассы. Установлено [411], что каждый из трех основных органических компонентов древесной биомассы: целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин при нагревании термически разлагаются. При этом образуются продукты пиролиза: твердые (уголь), жидкие (смолы и биомасло), газообразные (летучие). Пиролиз же вышеперечисленных компонентов протекает, как правило, через промежуточную стадию с формированием буферных веществ. Ричардом Миллером [412] предложена модель (Рисунок 3.3.3), учитывающая многостадийный механизм термического разложения трех компонентов древесной биомассы (гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина).

В таких условиях при пиролизе древесины в структуре топлива протекают три параллельных реакции термического разложения с различными кинетическими параметрами

[182, 388]. Известно, что газофазное воспламенение конденсированных веществ происходит если концентрация горючих газообразных продуктов пиролиза и температура их смеси с окислителем достигают значений, достаточных для быстрого роста скорости взаимодействия окислителя и горючего [182, 249, 250]. Представляет интерес ответ на вопрос насколько характеристики воспламенения частиц древесной биомассы при сложной кинетической схеме описания процесса пиролиза [406, 412] будут отличаться от характеристик зажигания таких же частиц при использовании простой (одностадийной) модели пиролиза [405].

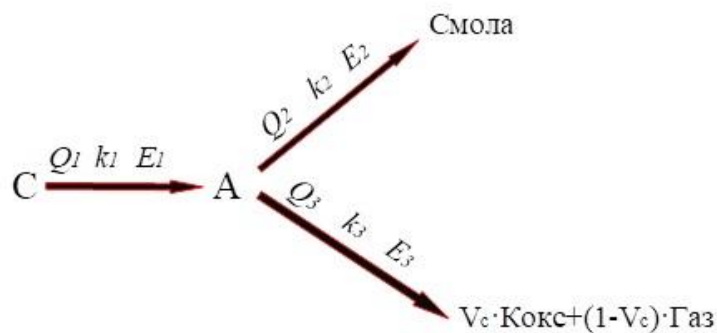


Рисунок 3.3.3 — Схема трехкомпонентного многостадийного пиролиза, основанная на вкладе трех компонентов древесины [178, 412]

Анализ современного состояния проблемы показывает [405 – 412], что оценка влияния схемы формального описания процесса термического разложения на характеристики и условия воспламенения частиц древесной биомассы является актуальной и не решенной на настоящее время задачей [182]. По этой причине основная цель работы – анализ влияния кинетической модели процесса пиролиза на характеристики и условия воспламенения частиц древесины в условиях высокотемпературного нагрева.

Экспериментальные исследования проведены на установке, которая по своим методам регистрации основных значимых параметров (температура внешней среды) и обработки результатов экспериментов (времена задержки зажигания – t_{ign}) соответствует стенду, описанному выше в разделе 3.1. Результаты экспериментов по основным зависимостям и закономерностям аналогичны приведенным ранее §3.1, 3.2.

Физическая постановка задачи по своим основным закономерностям соответствует изложенной выше физической модели процесса воспламенения частицы древесной биомассы. Отличия заключаются в том, что процесс термического разложения древесины описывается в рамках многостадийной модели термического разложения основных компонентов биомассы.

Математическая постановка задачи воспламенения древесины, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Распределение температуры в частице описывает уравнение энергии:

$$\frac{\partial H_w}{\partial t} + C_s \cdot \rho_s \cdot \left(u_s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_s \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_w \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_w \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \pm \sum_{i=1}^m Q_{td} W_{td}; \quad (3.3.1)$$

Q_{td} , W_{td} – тепловой эффект и скорость реакции термического разложения. Рассматривались три варианта модели пиролиза:

$$Q_{td} \cdot W_{td} = Q_{w \rightarrow gas} \cdot W_{w \rightarrow gas}; \quad [405]$$

$$Q_{td} \cdot W_{td} = Q_{w \rightarrow gas} \cdot W_{w \rightarrow gas} + Q_{w \rightarrow char} \cdot W_{w \rightarrow char} + Q_{w \rightarrow tar} \cdot W_{w \rightarrow tar}; \quad [408]$$

$$Q_{td} \cdot W_{td} = Q_{C \rightarrow A} \cdot W_{C \rightarrow A} + Q_{A \rightarrow char+gas} \cdot W_{A \rightarrow char+gas} + Q_{A \rightarrow tar} \cdot W_{A \rightarrow tar}; \quad [412]$$

Распределение температуры в слое газа вокруг частицы описывается уравнением энергии [182]:

$$C_g \rho_g \frac{\partial T}{\partial t} + C_g \rho_g \left[u(x) \frac{\partial T}{\partial x} + v(y) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_g \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^{n=3} Q_i W_i; \quad (3.3.2)$$

$$\sum_{i=1}^{n=3} Q_i \cdot W_i = Q_{CH_4+O_2} \cdot W_{CH_4+O_2} + Q_{CO+O_2} \cdot W_{CO+O_2} + Q_{H_2+O_2} \cdot W_{H_2+O_2}$$

Скорости газовой смеси в малой окрестности частицы топлива вычислялись с использованием аппроксимационных выражений [182, 342]:

$$u(x) = U_s(x_{out}, y, t) \cdot \frac{0.96}{\frac{0.07 \cdot x}{s(x_{out}, y, t)} + 0.29}; \quad (3.3.3)$$

$$v(y) = V_s(x, y_{out}, t) \cdot \frac{0.96}{\frac{0.07 \cdot y}{s(x, y_{out}, t)} + 0.29}; \quad (3.3.4)$$

На границе раздела системы «частица древесины – газовая среда» приняты граничные условия 4 – го рода [182]:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{out}-0} = K_\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{out}+0} + \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T|_{x=x_{out}}^4) + Q_{C+O_2} \cdot W_{C+O_2}}{\lambda_w}; \quad (3.3.5)$$

$$T(x, y, t) \Big|_{x=x_{out}+0} = T(x, y, t) \Big|_{x=x_{out}-0};$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\substack{y=y_1-0 \\ y=y_2-0}} = K_\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\substack{y=y_1+0 \\ y=y_2+0}} + \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \left(T_g^4 - T \Big|_{\substack{y=y_1 \\ y=y_2}}^4 \right) + Q_{C+O_2} \cdot W_{C+O_2}}{\lambda_w}; \quad (3.3.6)$$

$$T(x, y, t) \Big|_{\substack{y=y_1+0 \\ y=y_2+0}} = T(x, y, t) \Big|_{\substack{y=y_1-0 \\ y=y_2-0}};$$

Скорость реакции $C+O_2 = CO_2+18,67\text{МДж/кг}$ вычислялась с использованием математического выражения закона Аррениуса. Распределение давления газообразных продуктов пиролиза по частице вычислялось при решении уравнения пьезопроводности [182]:

$$\frac{\partial Pp}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_p}{\nu \cdot \beta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_p}{\nu \cdot \beta} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{W_{id}}{\rho \cdot \beta}; \quad (3.3.7)$$

Скорость фильтрации газообразных продуктов пиролиза определялась из дифференциального выражения закона Дарси [182]:

$$U_s = -\frac{K_p}{\nu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}; \quad \text{в направлении оси } ox \quad (3.3.8)$$

$$V_s = -\frac{K_p}{\nu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}; \quad \text{в направлении оси } oy \quad (3.3.9)$$

Принято, что термическое разложение топлива с выделением летучих начинается при достижении на поверхности частицы условия $T_{sur} \geq T_{stign}$ (T_{sur} – температура поверхности частицы, T_{stign} – температура начала термического разложения). Как было отмечено выше термическое разложение является сложным физико – химическим процессом, который может протекать в несколько стадий (до 4). При этом в древесине могут протекать одновременно до трех разных реакций, скорость каждой из них описывается уравнением химической кинетики [182]:

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial t} = (1 - \eta_i) \cdot k_i \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T}\right); \quad (3.3.10)$$

Учитывался процесс приток продуктов термического разложения в пристенную зону частицы. В результате формируется газовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температуры и концентрации горючего. В непосредственной близости от поверхности частицы учитывалось протекание трех наиболее значимых реакций [182]:

1. $H_2+0.5O_2 = H_2O$;
2. $CO+0.5O_2 = CO_2$;
3. $CH_4+2O_2 = 2H_2O+CO_2$;

Скорость этих реакций вычислялась из математического выражения закона Аррениуса. Концентрации компонентов газовой смеси (H_2 , CO , CH_4 , CO_2) в пристенной области частицы рассчитывались при решении уравнений диффузии:

$$\rho_g \cdot \frac{\partial c_i}{\partial t} + \rho_g \cdot \left[u(x) \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} + v(y) \cdot \frac{\partial c_i}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_i \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) - \sum_{i=1}^{i=3} W_i; \quad (3.3.11)$$

При постановке задачи учитывалось изменение ρ и Π топлива:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = (\rho - \rho_{etd}) \cdot k_{etd} \cdot \exp\left(-\frac{E_{etd}}{R \cdot T}\right); \quad (3.3.12)$$

$$\Pi_p = \Pi_0 \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho_{etd} - \rho_0}; \quad (3.3.13)$$

Система уравнений решалась при следующих начальных:

$$t=0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T(x, y, 0) = T_0 = 298K, p(x, y, 0) = p_{atm}, \\ \rho(x, y, 0) = \rho_0; \eta(x, y, 0) = 0; \end{array} \right\} 0 < x < x_{out}, y_1 < y < y_2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, y, 0) = T_g, c_i(x, y, 0) = 0; \\ T(x, y, 0) = T_g, c_i(x, y, 0) = 0; \end{array} \right\} 0 < x < x_{out}, 0 < y < y_1, y_2 < y < y_g, x_{out} < x < x_g.$$

и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\substack{x=0 \\ 0 < y < y_g}} = 0; \quad (3.3.14) \quad \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{\substack{x=x_g \\ 0 < y < y_g}} = 0 \quad (3.3.15) \quad \left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{\substack{0 < x < x_g \\ y=0 \\ y=y_g}} = 0; \quad (3.3.16)$$

;

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{\substack{x=0 \\ y_1 < y < y_2}} = 0; \quad (3.3.17) \quad p \Big|_{\substack{0 < x < x_{out} \\ y=y_1 \\ y=y_2}} = p_{atm}; \quad (3.3.18) \quad \left. \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right|_{\substack{x=x_g \\ 0 < y < y_g}} = 0; \quad (3.3.19)$$

$$\rho_g \cdot D_i \left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_{out} \\ y_1 < y < y_2}} = \rho_s \cdot U_s(x, y, t); \quad (3.3.20)$$

$$\rho_g \cdot D_i \left. \frac{\partial c_i}{\partial y} \right|_{\substack{y=y_1 \\ y=y_2 \\ x_1 < x < x_2}} = \rho_s \cdot U_s(x, y, t); \quad (3.3.21) \quad \left. \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right|_{\substack{y=0 \\ y=y_g \\ 0 < x < x_g}} = 0. \quad (3.3.22)$$

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г. На Рисунке 3.3.4 приведены значения t_{ign} частиц древесной биомассы в зависимости от T_g , вычисленные по результатам численного моделирования в рамках трех разных

моделей пиролиза и результаты эксперимента. Сравнительный анализ (рис. 3.3.6) показал хорошее соотношение теория/эксперимент. При этом стоит отметить, что наилучшее соответствие теоретических и экспериментальных значений t_{ign} установлено при применении модели термического разложения древесины [405]. Это свидетельствует о высоком уровне уровне прогнозов математической модели (3.3.1) – (3.3.22) при применении схемы [405]. В то же время стоит отметить, что наибольшие отклонения t_{ign} от эксперимента (до 5%) регистрируются при использовании подхода [412]. Кинетическая схема пиролиза древесной биомассы малое влияние на прогностические характеристики процесса зажигания. Это обусловлено тем, что общий тепловой эффект процесса пиролиза древесины незначительно (не более 5%) отличается в трех рассмотренных кинетических моделях [405, 408, 412].

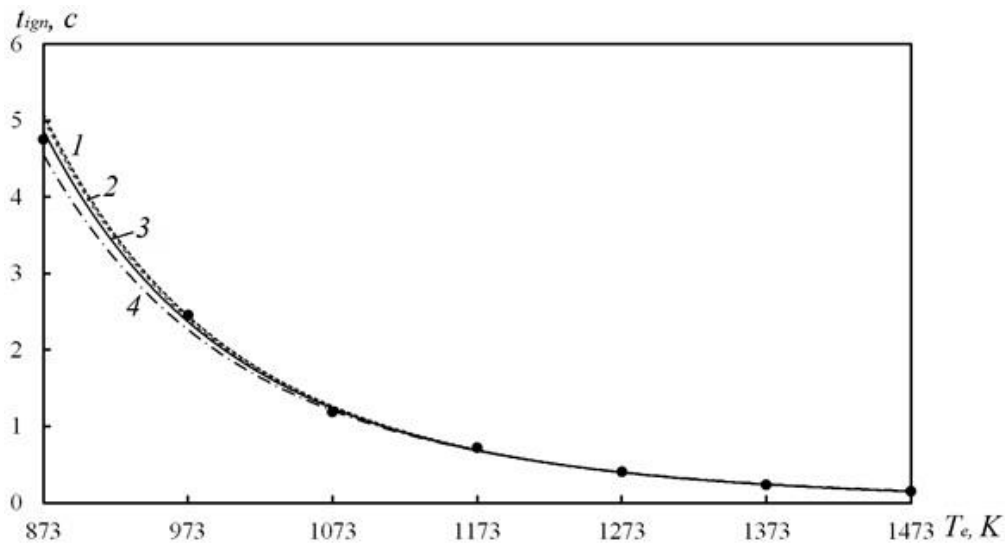


Рисунок 3.3.4 – Зависимости времени задержки воспламенения частицы древесной биомассы от температуры внешней среды, полученные экспериментально (кривая 3) и теоретически (кривые 1, 2, 4), при применении различных моделей пиролиза: 1 – [405], 2 – [408], 4 – [412]

На Рисунке 3.3.5 (а, б) приведены рассчитанные (при применении модели пиролиза [405]) температурные поля (в безразмерном виде $\theta = T/T_g$) в момент воспламенения частицы древесины кубической формы при температуре внешней среды $T_g = 1470\text{K}$ [182]. Можно отметить, что зажигание газообразных продуктов пиролиза происходит на расстоянии около $2.5 \cdot 10^{-3}$ м от поверхности частицы. Зажигание летучих происходит в районе ребер топливной частицы (кубической формы), а не граней (где наибольшая концентрация горючего). Последнее обусловлено тем, что при нагреве топливной частицы кубической формы ребра куба являются своеобразными концентраторами тепловых потоков [182].

На Рисунке 3.3.5 б приведены поля температур в системе «древесная частица – высокотемпературная среда» в момент зажигания коксового остатка [182]. Можно отметить,

что инициирование горения коксового остатка происходит на поверхностях ребер куба. Как уже говорилось ранее, это обусловлено тем, что они являются «концентраторами» тепловых потоков, подводимых из внешней среды к топливу [182].

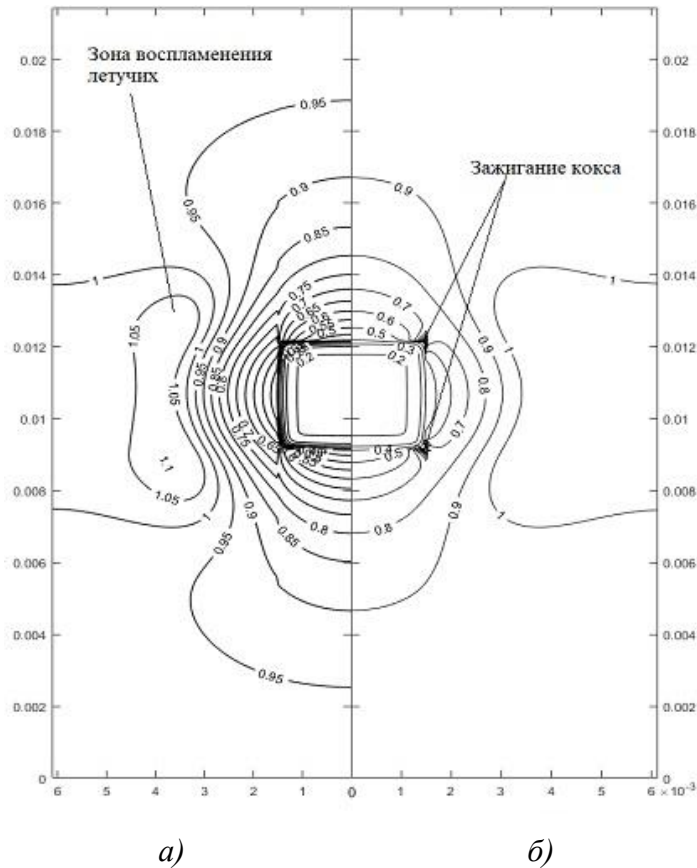


Рисунок 3.3.5 — Температурные поля ($\theta = T/T_g$) в момент воспламенения летучих (а) и кокса (б) при нагревании частицы древесной биомассы кубической формы в высокотемпературной среде [178]

3.4 Воспламенение частиц древесной биомассы в условиях приповерхностной фрагментации топливного слоя

Известно, что в период подготовки древесины к сжиганию, последняя проходит ряд технологических операций, обязательно включающих в себя процесс диспергирования до необходимых (по условиям сжигания) размеров фракции [414]. При этом как установлено по результатам экспериментов [415] по измельчению древесины в коническом шредере показано, что при размалывании биомассы формируются частицы древесины поверхность которых представляет собой существенно неоднородную структуру со сложным трещиноватым рельефом. При этом эти трещины по форме представляют собой сложносоставной канал глубина, ширина и длина которого существенно неравномерны [415]. Очевидно, что

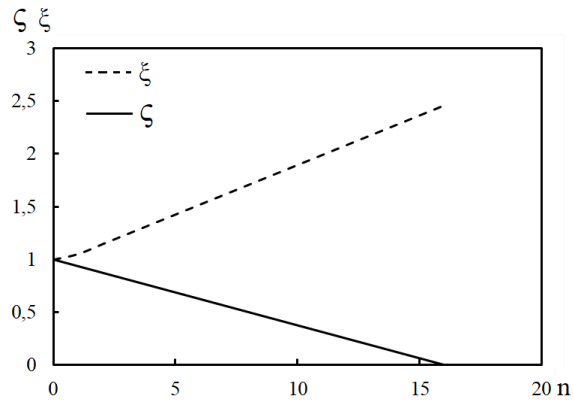


Рисунок 3.4.1 – Зависимость значений функций ξ и ζ от числа трещит.

такая фрагментация приповерхностного слоя может оказать значительное влияние на динамику зажигания частицы влажной древесной биомассы. Последнее обусловлено тем, что такие трещины, туннели и ходы значительно увеличивают площадь теплообмена и массоотдачи (при пиролизе древесины и испарении внутрипоровой и адсорбционно – связанной влаги). В результате все процессы термической подготовки (нагрев за счет конвекции и излучения; испарение воды; термическое разложение основных компонентов биомассы; газофазное зажигание продуктов пиролиза) протекают значительно быстрее чем для частиц древесины с гладкой поверхностью. При этом стоит сказать, что значимого изменения полной теплоты сгорания за счет уменьшения объема древесной частицы не происходит. Последнее можно показать: На Рисунке 3.4.1 приведены зависимости изменения безразмерных площади ($\xi = S/S_0$) и объема ($\zeta = V/V_0$) частицы при увеличении количества приповерхностных трещин (при $A = B = 1\text{ мм}$, $l = 4\text{ мм}$; где A , B – глубина и ширина трещины; l – длина). Можно отметить, линейный характер зависимостей. При этом изменение $\xi(n)$ более значительно по сравнению с $\zeta(n)$. Зависимости $\xi(n)$ и $\zeta(n)$ можно представить в виде следующих аппроксимационных выражениях

$$\xi(n) = 0.0929n + 1$$

$$\zeta(n) = -0.0625n + 1$$

Соответственно, можно сказать, что эффект увеличения площади взаимодействия топливной частицы с внешней газовой окислительной средой играет более существенную роль в процессе воспламенения, чем уменьшение объема. При этом можно отметить, что степень влияния увеличения площади реагирования за счет растрескивания в реальной практике приповерхностного слоя топлива возрастает при уменьшении поперечных размеров приповерхностных трещин и увеличение их количества.

Эксперименты проведены на установке, описанной в разделе 3.1. Исследования проведены для частиц древесины, выполненных из сибирской лиственницы. Структура этой

древесины обеспечивает, в отличие, например, от березы или ели, устойчивую конфигурацию частицы при ее обработке перед экспериментом.

В экспериментах использовались частицы, вырезанные из монолитного сухого фрагмента древесины больших размеров. В дальнейшем при помощи шлифовального и фрезерного устройств проводилась подготовка поверхности частиц и придание соответствующей формы (куб) с фрагментированным приповерхностным слоем. В работе исследовалось процесс зажигания частиц древесной биомассы, конфигурация которых приведены на Рисунке 3.4.2 здесь: *a* – поверхность без канавок; *б* – одна; *в* – две; *г* – три; *д* – четыре канавки (или щели). Канавки моделировали трещины, которые могут образовываться на поверхности частиц топлива при механоактивации (или измельчении).

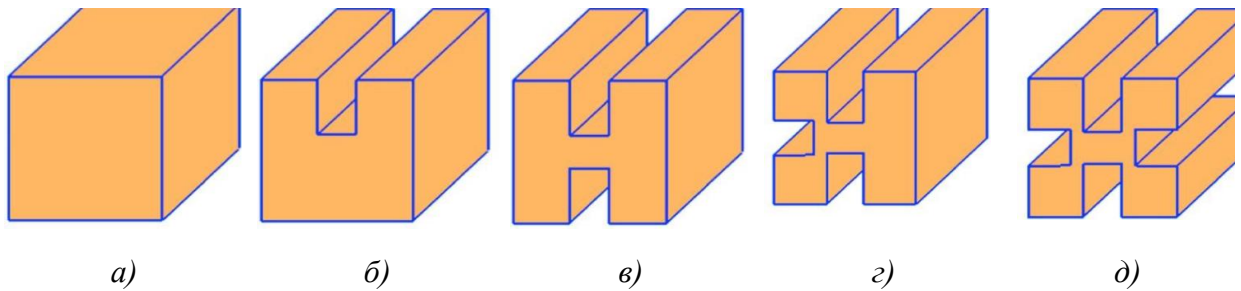


Рисунок 3.4.2 — Варианты конфигураций исследуемых в работе частиц: *a* – поверхность без трещин; *б* – одна трещина; *в* – две; *г* – три; *д* – четыре штробы (или прорези)

После этого для определения массы сухой древесины (m_{dry}) частицы взвешивали на весах MASSA – К (погрешность измерения 0,05г). На следующем этапе частицы древесины замачивали в воде и выдерживались в ней в течении 5 часов. Для определения влажности древесины повторно взвешивали (определяли массу влажных частиц (m_{wet})). Влажность топлива определялась по формуле:

$$\varphi = \frac{|m_{wet} - m_{dry}|}{m_{wet}} 100$$

Влажность топлива в экспериментах составляла $\approx 50\%$. Такое значение влажности древесины характерно для свежесрубленных деревьев (по данным [416]). На Рисунке 3.4.3 приведены кадры типичной видеोगраммы процесса воспламенения частицы древесины (с характерным размером $\delta = 4 \cdot 10^{-3}$ м) кубической формы с не фрагментированной

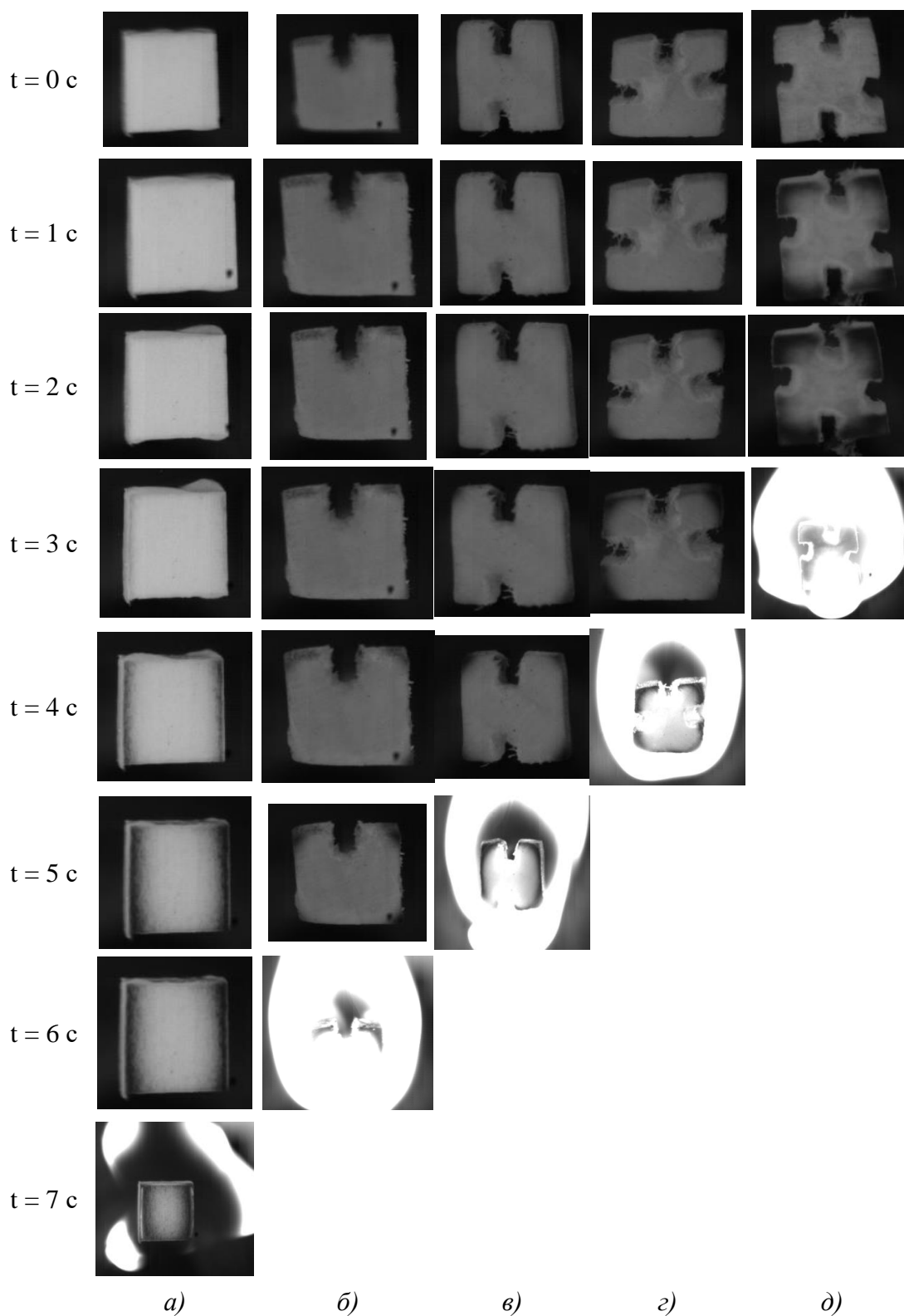


Рисунок 3.4.3 — Кадры типичной видеозаписи процесса воспламенения частицы влажной древесной биомассы. Номера кадров соответствуют конфигурациям частиц, приведенных на схеме Рисунка 3.4.2 [157]

поверхностью (Рисунок 3.4.2 а), с одной (Рисунок 3.4.2 б), двумя (Рисунок 3.4.2 в), тремя

(Рисунок 3.4.2 *з*) и четырьмя (Рисунок 3.4.2 *д*) приповерхностными канавками. По результатам анализа видеogramм сформулированы физическая и математическая модели процессов термической подготовки и зажигания частиц древесины в условиях фрагментации их поверхностей [156].

На Рисунке 3.4.4 приведены значения времен задержки воспламенения в зависимости от температуры при различных конфигурациях поверхности. Анализ зависимостей рисунка 3.4.4 показывает, что эффект увеличения площади поверхности тепло – и массообмена вследствие приповерхностной фрагментации топливной частицы оказывает достаточно значительное влияние на характеристики и условия зажигания древесины. При $T_g = 1073$ К увеличение количества «трещин» на поверхности древесины приводит к снижению времени задержки зажигания с 21,1 с (частица с не фрагментированной поверхностью (Рисунок 3.4.3 *а*)) до 13,4 с (частицы с 4 – мя «щелями» (Рисунок 3.4.3 *д*)). Это обуславливается тем, что в результате фрагментации приповерхностного слоя топлива интенсифицируется процесс притока массы газообразных продуктов пиролиза (горючих компонентов) во внешней газовой области. В результате критические условия воспламенения (по концентрациям горючего) достигаются быстрее, чем для частиц с не фрагментированной поверхностью [157].



Рисунок 3.4.4 – Зависимость времен задержки зажигания частиц древесной биомассы в зависимости от температуры внешней среды в условия фрагментации приповерхностного слоя топлива [157]

Физическая модель по совокупности физико – химических процессов, соответствует модели, описанной в разделе 3.1. Математическая постановка задачи воспламенения

древесины, соответствующая физической модели, включает систему нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных [156]. Область решения задачи зажигания частицы древесины приведена на Рисунке 3.4.5. Частицу древесины в период индукции можно условно разделить на две зоны. Первая – влагонасыщенная древесина, вторая – сухой древесный каркас.

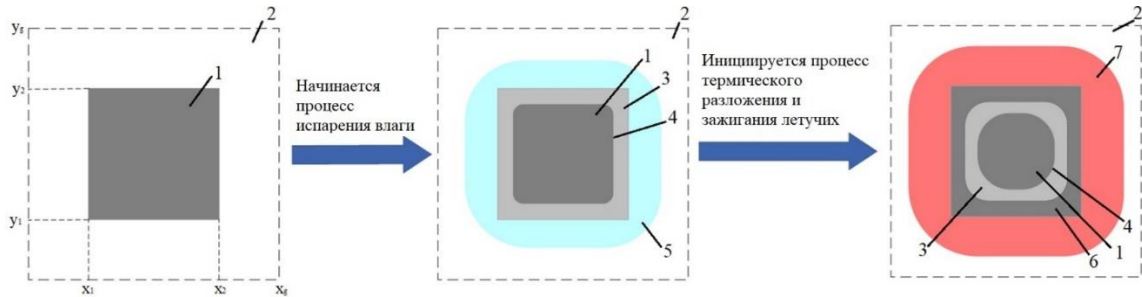


Рисунок 3.4.5 — Схема области решения задачи зажигания частицы древесной биомассы, соответствующая схеме, приведенной На Рисунке 3.5.2 а:

1 – частица древесины; 2 – высокотемпературная газовая среда; 3 – слой сухой древесины при температуре $T < T_{std}$ (T_{std} – температура начала термического разложения); 4 – граница раздела системы «влажная – сухая древесина»; 5 – зона диффузии водяных паров; 3 – слой сухой древесины при температуре $T > T_{std}$; 5 – зона воспламенения газообразных продуктов пиролиза

Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии:

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + c_s \rho_s \left(u_s \frac{\partial T}{\partial x} + v_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Theta(x_{eva}, y_{eva}) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_w \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \quad (3.4.1)$$

$$- \frac{Q_{eva}(T) \rho_{wat}}{\Delta} \frac{d\xi}{dt} \delta(x_{eva}, y_{eva}) - \sum_{i=1}^{i=2} Q_i W_i \Theta(x_{eva}, y_{eva});$$

$$\sum_{i=1}^{n=2} Q_i \cdot W_i = \sum_{j=1}^{m=3} Q_{td} \cdot W_{td} + Q_{C+H_2O} \cdot W_{C+H_2O},$$

$$h_w = c_w(x, y, t) \rho_w(x, y, t) T(x, y, t).$$

$$\sum_{j=1}^{m=3} Q_{td} \cdot W_{td} = Q_{w \rightarrow gas} \cdot W_{w \rightarrow gas} + Q_{w \rightarrow char} \cdot W_{w \rightarrow char} + Q_{w \rightarrow tar} \cdot W_{w \rightarrow tar}$$

Массовая скорость испарения и скорость движения фронта фазового перехода рассчитывались по аналогии с §2.1 [157]. Распределение давления (p) по радиусу частицы вычислялось при решении уравнения пьезопроводности:

$$\frac{\partial mp}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(r^2 \frac{K_p}{\nu\beta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_p}{\nu\beta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho\beta} \sum_{i=1}^{n=3} f_i; \quad (3.4.2)$$

$$\sum_{i=1}^{n=3} f_i = \left[\left(W_{c \rightarrow vol} + \frac{W_{C+H_2O \rightarrow CO+H_2}}{s} \right) \Theta(r - r_{eva}, \theta - \theta_{eva}) + \frac{W_{eva} \delta(r_{eva}, \theta_{eva})}{s} \right]$$

Скорость фильтрации пара определялась из дифференциального выражения закона Дарси [417]. Распределение температуры в слое газа вокруг частицы описывается уравнением энергии. Последнее учитывает экзотермические эффекты реакций окисления основных горючих компонентов воздухом и поглощение теплового излучения [144, 157]:

$$\frac{\partial h_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial h_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial h_g}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_g \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^{i=3} Q_i \cdot W_i + div(I_R); \quad (3.4.3)$$

$$\sum_{i=1}^{i=3} Q_i W_i = Q_{CH_4+O_2} W_{CH_4+O_2} + Q_{CO+O_2} W_{CO+O_2} + Q_{H_2+O_2} W_{H_2+O_2}$$

Скорости парогазовой смеси в малой окрестности вычислялись из решения системы уравнений движения и неразрывности [418, 419]:

$$\frac{\partial \rho_g u_g}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v_g}{\partial y} = 0; \quad (3.4.4)$$

$$\rho_g \left(\frac{\partial u_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_g \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right); \quad (3.4.5)$$

$$\rho_g \left(\frac{\partial v_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial v_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial v_g}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_g \left(\frac{\partial^2 v_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_g}{\partial y^2} \right) + \rho\beta g(T_e - T); \quad (3.4.6)$$

На границе раздела системы «частица древесины – газовая среда» принято граничное условие 4 – го рода [157]:

$$\lambda_w \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_g \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \left(I_R \Big|_{x=x_2+0}^{x=x_1+0} - I_R \Big|_{x=x_2}^{x=x_1} \right) + Q_{C+O_2} W_{C+O_2}; \quad (3.4.7)$$

$$T(x, y, t) \Big|_{x=x_2+0}^{x=x_1+0} = T(x, y, t) \Big|_{x=x_2-0}^{x=x_1-0};$$

$$\lambda_w \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_g \frac{\partial T}{\partial y} + \varepsilon \left(I_R \Big|_{y=y_2+0}^{y=y_1+0} - I_R \Big|_{y=y_2}^{y=y_1} \right) + Q_{C+O_2} W_{C+O_2}; \quad (3.4.8)$$

$$T(x, y, t) \Big|_{y=y_2+0}^{y=y_1+0} = T(x, y, t) \Big|_{y=y_2-0}^{y=y_1-0};$$

Интенсивность теплового излучения (I_R) внешней среды рассчитывалась из решения уравнения переноса энергии излучения [144, 157]:

$$\Omega grad(I) + h_\lambda I_g(\bar{n}) = \frac{h_\lambda}{\pi} \eta_{own}(\bar{n}); \quad (3.4.9)$$

$$\eta_{own}(\bar{n}) = \int_0^{\infty} \frac{\hbar \omega_w^3}{4\pi^2 c_w^2 \exp\left(\frac{\hbar \omega_w}{kT}\right) - 1} d\omega_w; \quad - \text{Интенсивность собственного излучения.}$$

Скорость реакции $C+O_2 = CO_2 + 18.67 \text{ МДж/кг}$ вычислялась с использованием математического выражения закона Аррениуса. Процесс термического разложения описывается уравнением химической кинетики [157]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = [1 - \eta] k_{w \rightarrow i} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right); \quad (3.4.10)$$

Принята модель пиролиза [408] (Рисунок 3.4.6.), учитывающая формирование трех (летучие, кокс, смола) продуктов пиролиза. При постановке задачи зажигания частицы древесины принята кинетическая схема газофазного воспламенения аналогичная указанным выше (в разделе 3.1 – §3.3). Концентрации H_2 , CO , CH_4 , CO_2 и H_2O в пограничном слое рассчитывались при решении уравнений диффузии:

$$\rho_g \frac{\partial \zeta_i}{\partial t} + \rho_g \left(u_g \frac{\partial \zeta_i}{\partial x} + v_g \frac{\partial \zeta_i}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(r^2 \rho_g d_i \frac{\partial \zeta_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(r^2 \rho_g d_i \frac{\partial \zeta_i}{\partial y} \right) - \sum_{i=1}^{i=3} W_i; \quad (3.4.11)$$

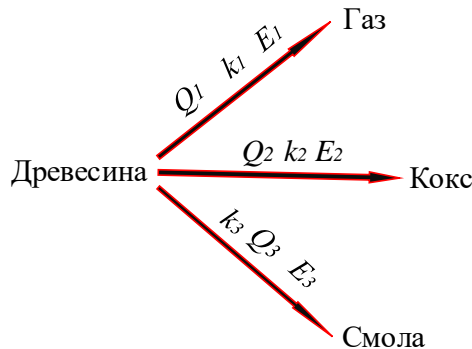


Рисунок 3.4.6 – Схема пиролиза древесины [157, 408]

Учитывалось изменение плотности (ρ_3) и пористости (Π) топлива:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = [\rho - \rho_{eid}] k_{id} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right); \quad (3.4.12)$$

$$\Pi_p = \Pi_0 \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho_{eid} - \rho_0}; \quad (3.4.13)$$

Система уравнений решалась при следующих начальных:

$$t=0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T(x, y, 0) = T_0 = 298K, p(x, y, 0) = p_{atm}, \\ \rho(x, y, 0) = \rho_0; \eta(x, y, 0) = 0; \end{array} \right\} x_1 < x < x_2, y_1 < y < y_2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, y, 0) = T_g, c_i(x, y, 0) = 0; \\ T(x, y, 0) = T_g, c_i(x, y, 0) = 0; \end{array} \right\} 0 < x < x_1, x_2 < x < x_g, 0 < y < y_2; 0 < y < y_1, y_2 < y < y_g, x_1 < x < x_2.$$

и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{\substack{x=0; 0 < y < y_g \\ x=x_g; 0 < y < y_g}} = 0; \quad (3.4.14) \quad \left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{\substack{y=0; 0 < x < x_g \\ y=y_g; 0 < x < x_g}} = 0; \quad (3.4.15) \quad p \Big|_{\substack{y=y_1; y=y_2; x_1 < x < x_2 \\ x=x_1; x=x_2; y_1 < y < y_2}} = P_{am}; \quad (3.4.16)$$

$$\rho_g d_i \left. \frac{\partial \zeta_i}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_1; x=x_2 \\ y_1 < y < y_2}} = \rho_s u_s(x, y, t); \quad (3.4.17) \quad \rho_g d_i \left. \frac{\partial \zeta_i}{\partial y} \right|_{\substack{y=y_1; y=y_2 \\ x_1 < x < x_2}} = \rho_s v_s(x, y, t); \quad (3.4.18)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right|_{\substack{x=0; 0 < y < y_g \\ x=x_g; 0 < y < y_g}} = 0; \quad (3.4.19) \quad \left. \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right|_{\substack{y=0; 0 < x < x_g \\ y=y_g; 0 < x < x_g}} = 0; \quad (3.4.20)$$

$$u_g \Big|_{\substack{x=x_1; x=x_2; \\ y_1 < y < y_2}} = u_s \Big|_{\substack{x=x_1; x=x_2; \\ y_1 < y < y_2}}; \quad (3.4.21) \quad v_g \Big|_{\substack{y=y_1; y=y_2; \\ x_1 < x < x_2}} = v_s \Big|_{\substack{y=y_1; y=y_2; \\ x_1 < x < x_2}}; \quad (3.4.22)$$

$$\left. \frac{\partial u_g}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_1; x=x_2; \\ y_1 < y < y_2}} = 0; \quad (3.4.23) \quad \left. \frac{\partial v_g}{\partial y} \right|_{\substack{y=y_1; y=y_2; \\ x_1 < x < x_2}} = 0; \quad (3.4.24)$$

$$I_g \Big|_{\substack{x=0; 0 < y < y_g \\ x=x_g; 0 < y < y_g}} = \varepsilon \sigma T_g^4; \quad (3.4.25)$$

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г. Апробация математической модели процесса зажигания частиц древесины проведена методом сравнительного анализа прогностических значений времен задержек воспламенения летучих с результатами экспериментов. На Рисунке 3.4.7 (а — г) приведены зависимости безразмерных времен задержек воспламенения $\xi = t_{ign}/t_{ign}^0$ (где: t_{ign} , t_{ign}^0 — время задержки зажигания частицы с фрагментированной и не фрагментированной поверхностью, соответственно) от приведенной площади поверхности $F = f/f_0$ (где f , f_0 — площадь поверхности частицы с фрагментированной и не фрагментированной поверхностью, соответственно) частицы при различных температурах внешней среды. Анализ зависимостей показывает, что f оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения частиц древесины. Так, увеличение приведенной площади поверхности на 30% приводит к существенному снижению времени задержки зажигания (на 30 – 40%). Такая тенденция сохраняется для всего исследуемого диапазона температур (673 – 1273К). Последнее связано с тем, что в результате фрагментирования поверхности частицы древесины происходит интенсификация процесса притока массы газообразных продуктов пиролиза. В результате критические условия (по концентрациям) в пограничном слое частицы достигаются быстрее. Проведенный сравнительный анализ теоретических и экспериментальных времен задержек зажигания (Рисунок 3.4.7) показал их хорошее соответствие (отклонение

не более 8,7%). Соответственно можно сделать обоснованный вывод о высоком уровне прогностического потенциала математической модели.

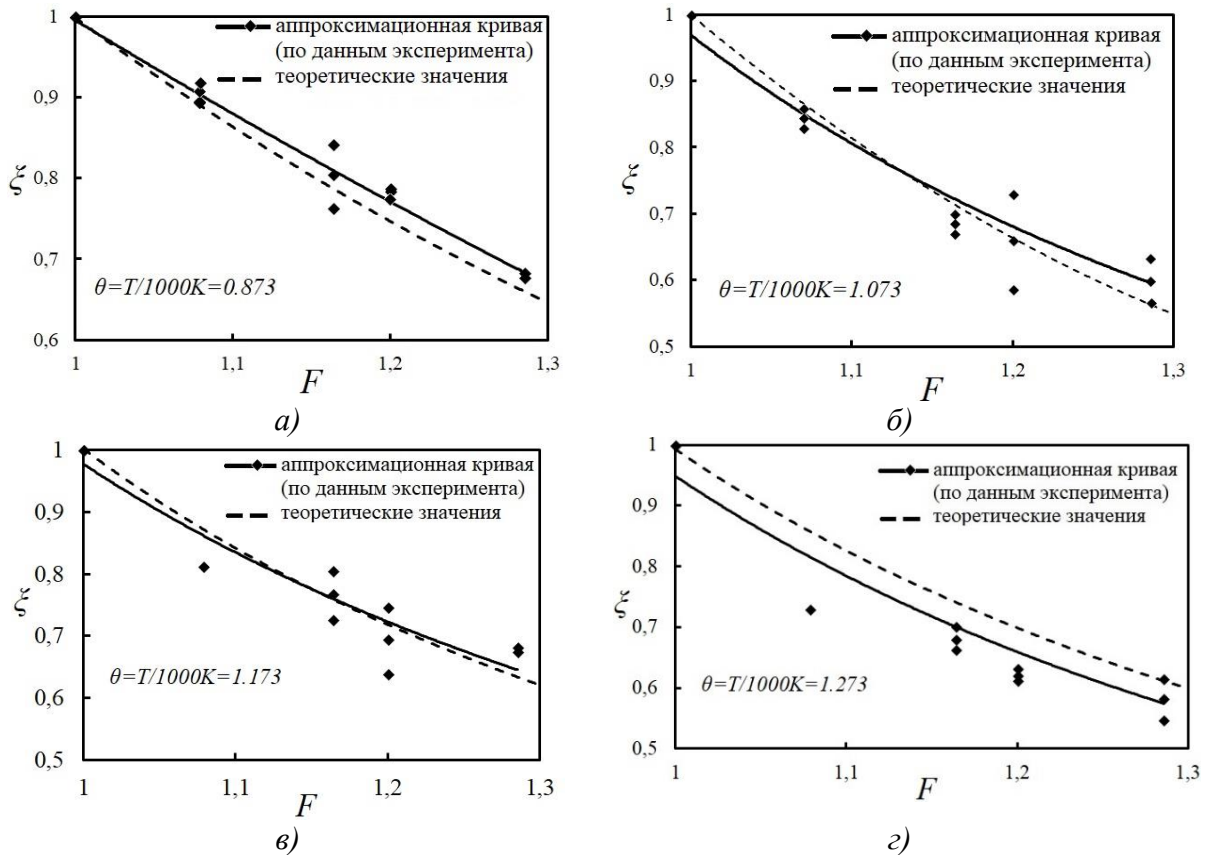


Рисунок 3.4.7 — Теоретические и экспериментальные зависимости безразмерных времен задержки зажигания от приведенной площади при различных температурах внешней среды [157]

На Рисунке 3.4.8 (а, б, в, г, д) приведены рассчитанные температурные поля (в безразмерном виде θ) в момент воспламенения летучих для частицы древесины (характерным размером $\delta = 4 \cdot 10^{-3}$ м) при температуре внешней среды $T_g = 1070K$. Можно отметить, что зажигание газообразных продуктов пиролиза происходит на расстоянии около $2.5 \cdot 10^{-3}$ м от поверхности частицы [157]. При этом, формируется несимметричный факел горящих летучих, форма которого зависит от условий течения газов в пограничном слое частицы. Можно отметить, что зажигание летучих инициируется в районе ребер топливной частицы, а не граней. Это соответствует кадру видеогамы. Последнее обусловлено тем, что при нагреве топливной частицы кубической формы ребра куба являются своеобразными концентраторами тепловых потоков. В результате воспламенения и горения летучих интенсифицируется лучистый тепловой поток к поверхности частицы. Это приводит в дальнейшем к инициированию горения кокса [157]. На Рисунке 3.4.9 приведены поля интенсивности

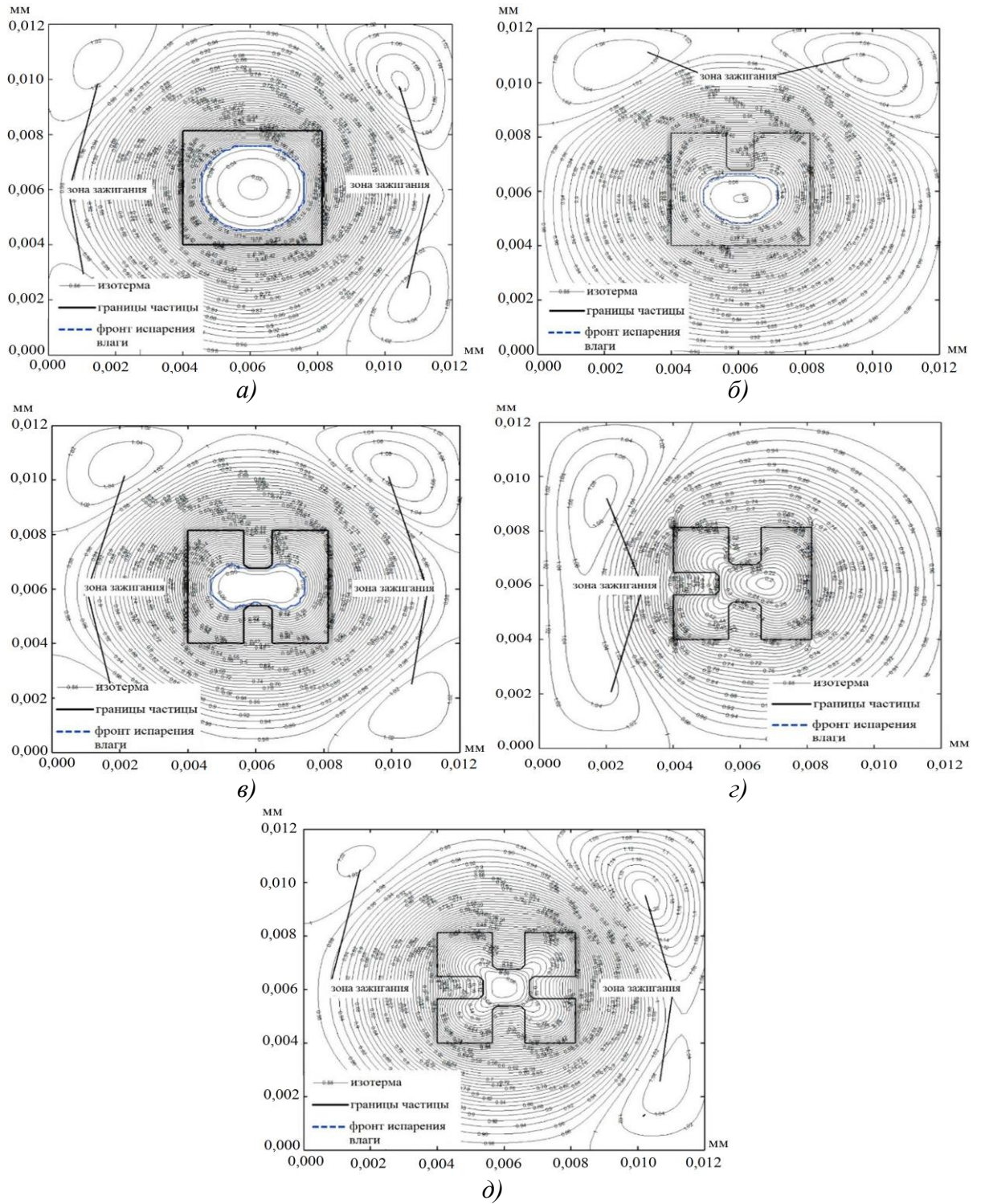


Рисунок 3.4.8 — Температурные поля в момент воспламенения летучих при нагреве частиц древесной биомассы: *a* – не фрагментированная поверхность; *б* – с одной; *в* – с двумя; *г* – с тремя; *д* – с четырьмя щелями [157]

излучения (Γ) в малой окрестности частицы древесины в момент воспламенения летучих. Можно отметить, что в малой окрестности частицы формируется достаточно сложная картина радиационных полей, обусловленных совместным протеканием комплекса процессов

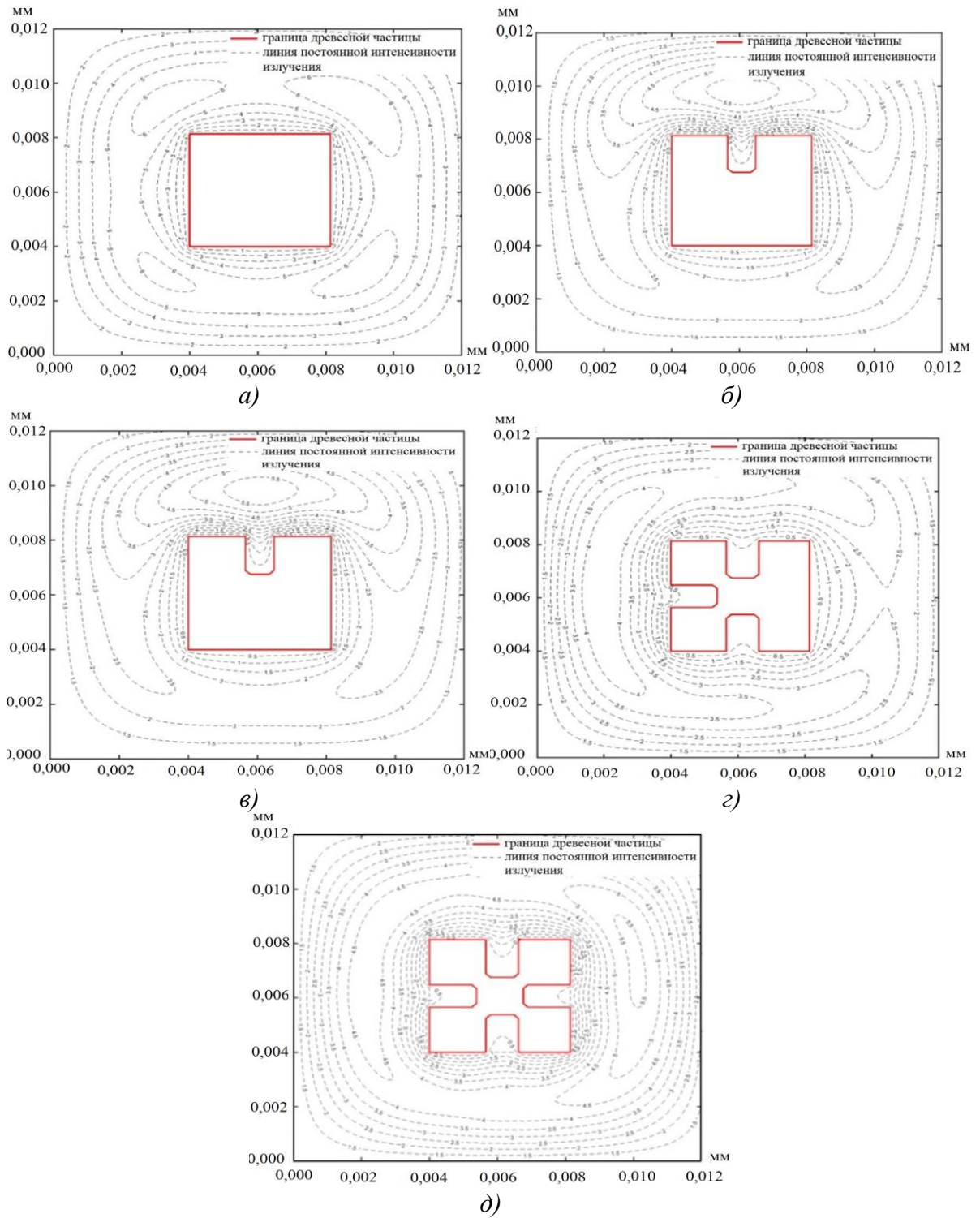


Рисунок 3.4.9 — Поля интенсивностей излучения в малой окрестности частицы влажной древесины в момент воспламенения: *а* – не фрагментированная поверхность; *б* – с одной; *в* – с двумя; *г* – с тремя; *д* – с четырьмя щелями

термохимического взаимодействия газообразных продуктов пиролиза и диффузией трехатомных газов (CO_2 и H_2O), обладающих высокими поглощательными свойствами. При этом максимум значения Γ соответствует зоне зажигания летучих. В результате инициируется процесс зажигания кокса частицы [156].

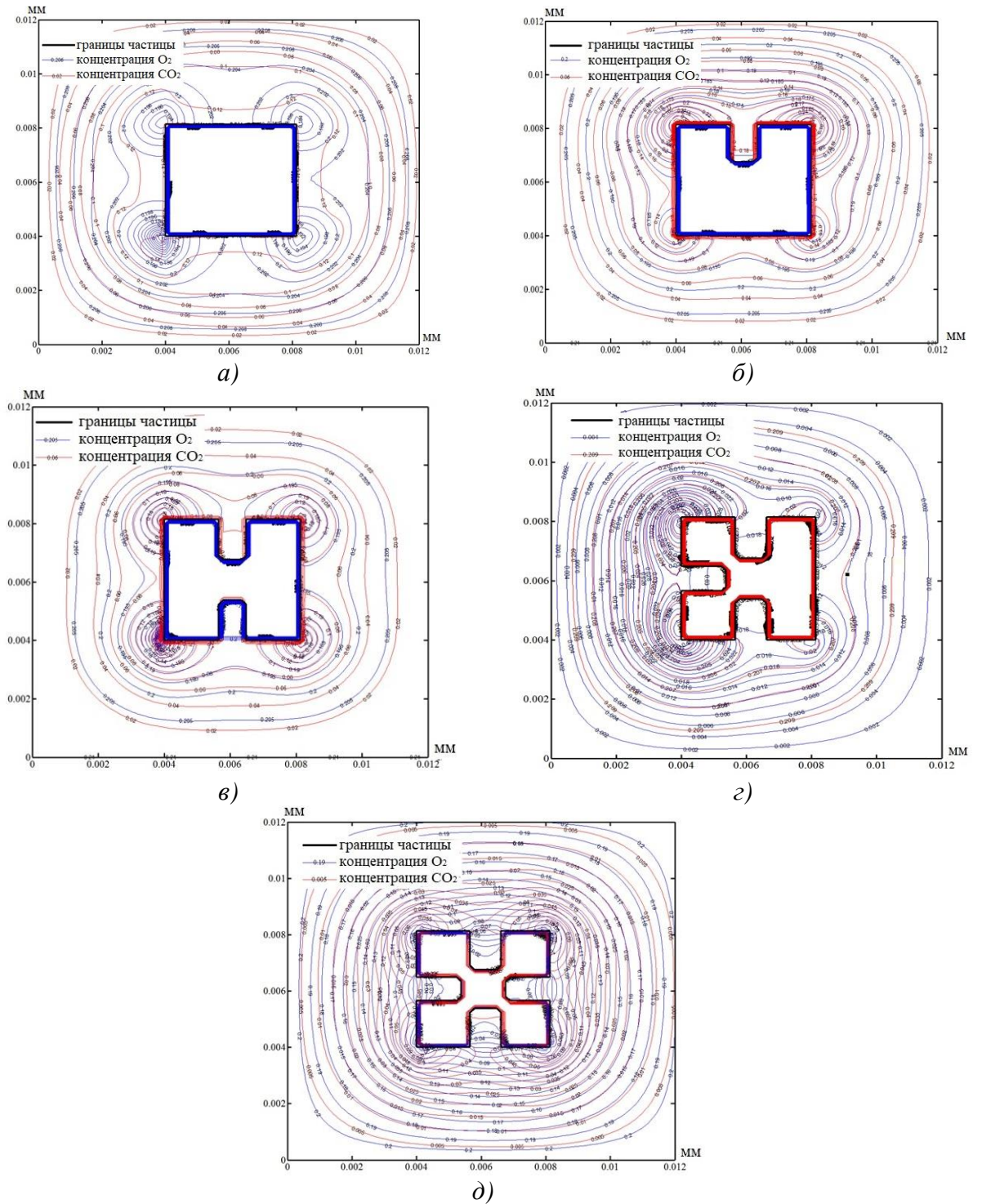


Рисунок 3.4.10 — Поля концентраций CO_2 и O_2 в момент воспламенения древесной частицы: а – поверхность не фрагментирована; б – с одним; в – с двумя; г – с тремя; д – с четырьмя прорезями [157]

На Рисунке 3.4.10 приведены поля концентраций кислорода (O_2) и диоксида углерода (CO_2), в момент времени, соответствующий моменту воспламенения частицы древе-

сины. Можно отметить, что для всех конфигураций частиц характерно увеличение концентрации CO_2 в их малой окрестности (газовой области). Можно сказать, что содержание углекислого газа увеличивается у границы раздела системы «частица древесины – газовая среда». При этом максимум концентраций CO_2 наблюдается в районе ребер куба.

На Рисунке 3.4.11 приведено поле безразмерных давлений в момент воспламенения кубической частицы (без дефектов) влажной древесной биомассы. Анализ зависимостей показывает, что в процессе испарения внутри топливной частицы формируются зоны с повышенным давлением парогазовой смеси. Это обусловлено сопротивлением, которое оказывает углеродистый каркас фильтрующимся сквозь него водяным парами.

Можно отметить, что в частице древесины можно условно выделить две зоны. Первая – периферийная зона с высокими градиентами давления. Вторая – центральная (в пределах водонасыщенного слоя топлива) часть топлива с низким перепадом давления. Это обусловлено тем, что в центральной части поры древесины заполнены водой. Последняя является практически несжимаемой средой. По этой причине давление в центре частицы растет значительно быстрее чем в периферийной части топлива.

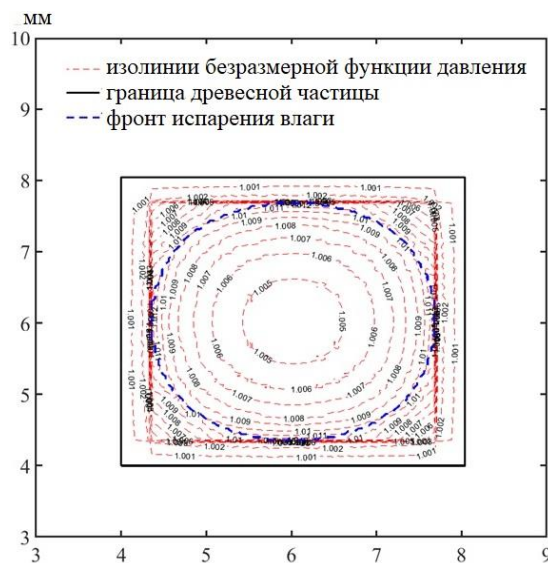


Рисунок 3.4.11 — Поле безразмерных давлений (Н) в момент воспламенения летучих

Выводы по третьей главе

1. Впервые сформулирована математическая модель воспламенения влажных древесных частиц, учитывающая совместное протекание основных процессов тепломассопереноса в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и физико – химических (термохимическое взаимодействие паров воды с углеродом, термическое разложение органической части

топлива, окисление летучих в газовой фазе) превращений в индукционный период времени. Установлено, что влажность топлива оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения древесных частиц. Увеличение содержания влаги приводит к значительному затягиванию периода индукции. С изменением влагосодержания от 25% до 60% времена задержки зажигания увеличиваются в 2 – 3 раза при прочих адекватных условиях. Последние вносят существенные коррективы в основы проектирования топков котельных агрегатов, сжигающих влажное древесное топливо.

2. Установлено существенное влияние формы частицы влажной древесной биомассы на характеристики ее воспламенения. Экспериментальные исследования процессов воспламенения проводились для топливных частиц двух различных форм: куба и цилиндра. Показано, что частицы топлива цилиндрической формы с сопоставимыми размерами воспламеняются быстрее кубических. Сравнительный анализ (по результатам моделирования) показал, что при условии сопоставимости масс топливных частиц; сферические воспламеняются быстрее, чем кубические и цилиндрические. Самый медленный, воспламеняются частицы в виде куба. Последнее подтверждается анализом функций скоростей нагрева топливных частиц трех форм. Сферы нагреваются намного быстрее, чем цилиндры и кубы.
3. По результатам выполненных исследований установлено, что вид кинетической схемы термического разложения основных компонентов биомассы не оказывает значимого влияния на результаты математического моделирования процесса воспламенения частицы древесной биомассы. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований не только расширяют современные представления о процессах газофазного зажигания конденсированных веществ в части отношения характерных времен тепловых и химических процессов, но также и в отношении времен пиролиза и газофазного реагирования горючего с окислителем. Полученные теоретические следствия является основой развития моделей газофазного зажигания конденсированных веществ с существенно более сложным (по сравнению с гомогенными) компонентным составом структуры топлива и схем процесса образования горючих газообразных и твердых продуктов термического разложения.
4. По результатам проведенных экспериментальных исследований процессов зажигания частиц древесной биомассы в условиях фрагментации поверхности топлива установлено, что увеличение площади поверхности частицы за счет фрагментации приводит к значительному снижению времени задержки зажигания. Последнее обусловлено существенной интенсификации процесса притока газообразных продуктов пиролиза в малую окрестность частицы. Разработана новая прогностическая математическая модель физико – химических процессов, протекающих при нагревании частицы древесного биотоплива, отличающаяся

от известных детальным описанием комплекса процессов термической подготовки (нагрева конвекцией и излучением, перенос тепла теплопроводностью и излучением), протекающих в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (пиролиз древесины) превращений.

Основные результаты главы 3 опубликованы в [157, 161, 174, 177, 181, 182].

ГЛАВА 4 ЗАЖИГАНИЕ КАПЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЯ (ОРГАНО – ВОДОУГОЛЬНЫХ И БИО – ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ)

В главе 2 приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов воспламенения частиц водоугольного топлива. По результатам этих исследований установлено, что времена задержки зажигания таких существенно неоднородных и высокообводненных топлив могут достигать несколько десятков секунд (до 40). Такие высокие значения t_{ign} создают существенные трудности на этапе проведения опытно – конструкторских работ по проектированию камер сгорания котельных агрегатов, сжигающих водоугольные топлива. Последнее обусловлено тем, что, как известно из теории проектирования топок котельных агрегатов [324], геометрические характеристики (размеры и форма) последних определяются временем «пробытия» топлива в них. Соответственно, удлинение общего времени сгорания топлива ($t_b = t_{tp} + t_{ign} + t_c$; где: t_{tp} – время термической подготовки; t_{ign} – время задержки зажигания; t_c – время горения) приведет к увеличению размеров камеры и, соответственно, к росту металлоемкости и дороговизны конструкции котла. В этих условиях топочное устройство должно состоять из нескольких взаимосвязанных зон, в которых осуществляются процессы термической подготовки, зажигания и горение (по аналогии с топками Шершнева [384]). Такая ситуация создает предпосылки для разработки новых технологий, позволяющих существенно снизить времена термической подготовки и зажигания. К примеру, можно сжигать водоугольные топлива в условиях воздействия на ВУТ микроволновым излучением или в потоке сверх высокотемпературного воздуха (так называемая плазменная подсветка факела [296]). Ряд авторов для ускорения инициирования горения водоугольного топлива предлагают использовать лазерное излучение (например [420]). Но наиболее перспективным способом увеличения реактивности водоугольных топлив это внедрение в их структуру легковоспламеняющихся веществ (например: нефть и продукты ее перегонки (мазут [97, 98], масла различного назначения [117]), синтетические нефтепродукты (например продукты пиролиза резины [162]), биомасса (отходы лесопиления или деревопереработки [165], отходы жизнедеятельности леса [164])). В этих условиях последние являются своеобразным «разгонщиком» реакции горения основного топлива. Стоит сказать, что это уже новые классы многокомпонентных топлив: органо – водоугольное (или смесь вода – уголь/нефть) и био – водоугольное (вода – уголь/биомасса). На настоящее время в мировой научной периодике нет примеров математических моделей, описывающих комплекс термохимических процессов, протекающих при воспламенении частиц

таких существенно неоднородных и сложносоставных многокомпонентных топлив. Поэтому основная цель этой главы диссертации – разработка по результатам экспериментов математической базы процессов воспламенения капель (в начальный период нагрева), а затем частиц (после подсушивания приповерхностного слоя топлива) органо – и био – водоугольных топлив.

4.1 Зажигание био – водоугольных топлив

Сравнительный анализ времен задержки зажигания частиц древесины [174] и водоугольного топлива (например [151]) в условиях идентичности размеров последних и режимов нагрева показывает, что первые зажигаются значительно быстрее (в 3 – 4 раза). При этом по результатам многочисленных экспериментов (например [421]) установлен положительный (с точки зрения экологии) синергетический эффект от совместного сжигания угля и биомассы: существенно снижаются выбросы оксидов азота и серы. По этой причине имеет место интерес изучение процессов воспламенения и горения смесевых суспензионных топлив на основе угля, биомассы и воды. Но до настоящего времени систематических теоретических и экспериментальных исследований зажигания такого топлива не проводилось.

4.1.1 Математическое моделирование процессов зажигания капель

био – водоугольного топлива на основе угля и типичных отходов

деревообработки в условиях высокотемпературного нагрева

Как уже подчеркивалось выше на настоящее время в мировой научной периодике нет примеров задокументированных научных результатов, описывающих результаты исследований комплекса процессов тепло – и массопереноса, протекающих совместно при воспламенении частиц существенно неоднородных био – водоугольных топлив. При этом известно [341], что для проведения опытно – конструкторских работ по проектированию топочных устройств котельных агрегатов, сжигающих био – водоугольные топлива необходима база данных о интегральных характеристиках процессов воспламенения и горения частиц Био – ВУТ. При этом достаточно очевидно, что проведение систематических экспериментов по изучению процессов воспламенения био – водоугольных топлив в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов с учетом всех возможных вариан-

ций сочетания компонентного состава Био – ВУТ, степени метаморфизма углей и вида древесины, условий теплообмена и размеров распыла топлива, практически невозможны. По этой причине цель этого параграфа диссертации можно условно разделить на две подцели:

1. экспериментальное исследование процессов зажигания капель биоводоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания камер сгорания типичных парогенераторов (или теплогенераторов) ТЭС.
2. разработка математической модели процесса зажигания капель БВУТ, обеспечивающей достаточно высокий уровень прогностического потенциала процессов воспламенения в условиях высокотемпературного нагрева.

Экспериментальные исследования процессов зажигания и горения одиночных капель Био – ВУТ проводились на стенде, который по конструкции и методам регистрации характеристик процессов зажигания аналогичен установке, описанной выше (раздел 3.1).

Частица био – водоугольного топлива закреплялась на неподвижном металлическом держателе. Окислитель (воздух) нагревался до высоких температур (максимально достижимые $T^{\max} = 1273\text{K}$) внутри полого керамического цилиндра, на внешнюю поверхность которого крепился электрический нагреватель. Температура воздуха в канале цилиндра контролировалась хромель – алюмелевой термопарой. Вся нагревательная система устанавливалась в теплоизолированном защитном кожухе, закрепленном на подвижной каретке, которая могла передвигаться по рельсам.

Био – водоугольные суспензии отличаются компонентным составом и массовой концентрацией угля, древесины и воды. Эти составы приведены в Таблице 4.1.1.1.

Таблица 4.1.1.1 – Составы био – водоугольных топлив

| Состав Био – ВУТ | Уголь | | Древесина | | Вода % |
|------------------|------------|----------------|-------------|----------------|-----------|
| | Марка угля | Концентрация % | Тип | Концентрация % | |
| №1 | Уголь «Д» | 30 | Сосна | 0,05 | 65 |
| №2 | Уголь «Д» | 30 | Береза | 0,05 | 65 |
| №3 | Уголь «Д» | 30 | Лиственница | 0,05 | 65 |

На Рисунке 4.1.1.1 приведены кадры типичной видеозаписи процесса воспламенения частицы (диаметром $\delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м) био – водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля и древесных опилок (береза). Температура внешней среды $T_g = 1470\text{K}$. Общее

время от начала нагрева до момента воспламенения $t_{\text{ign}} \approx 2,5$ с. Как показывают эксперименты процесс термической подготовки можно условно разделить на ряд последовательных взаимосвязанных стадий. Каждую из них можно охарактеризовать доминированием одного конкретного физического процесса (инертный нагрев, испарение воды, термическое разложение органической части топлива (угля и древесины), воспламенение). В начальный момент времени (кадр *a*) частица Био – ВУТ представляет собой суспензию, поверхность которой покрыта тонким слоем воды. Инертный нагрев инициирует испарение воды и термическое разложение органической части топлива (кадр *б*). Подробный (при большом увеличении) анализ кадра *в* показывает характерное увеличение яркости свечения поверхности частицы. Через $t = 0,3 \cdot t_{\text{ign}}$ после начала нагрева происходит воспламенение (кадр *в*) летучих. Можно отметить, что зона воспламенения локализуется в верхней полусфере частицы. После зажигания летучих формируется сфера пламени (кадры *г*), размер которой в несколько раз (2 – 3) превышает диаметр частицы. Соответственно, можно сделать вывод, что применение метода бесконечно тонкой зоны термохимического газофазного реагирования при расчете процессов горения таких топлив может привести к существенным погрешностям.

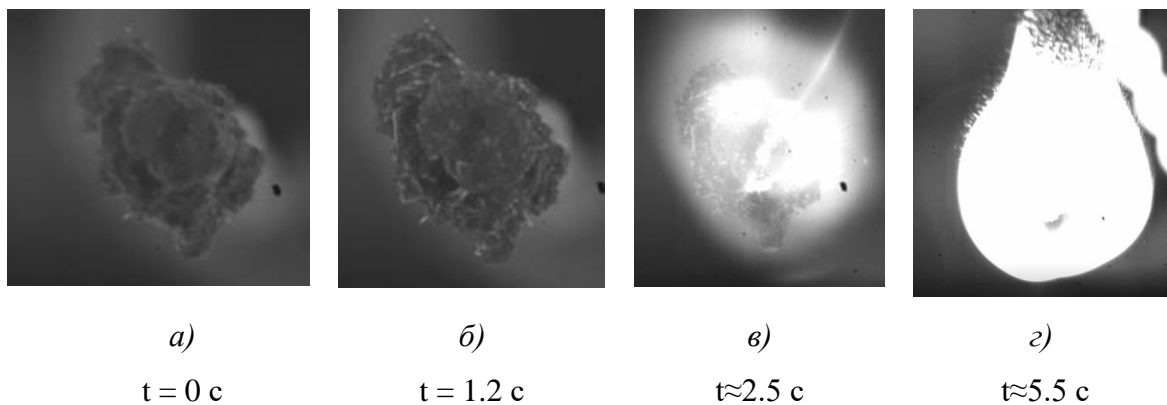


Рисунок 4.1.1.1 — Типичные кадры процесса воспламенения частицы био – водоугольного топлива

По результатам проведенных экспериментов разработана математическая модель процесса зажигания частиц био – водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания типичных парогенераторов тепловых электрических станций. Принято, что капля (или частица сферической формы) Био – ВУТ попадает в высокотемпературную окислительную среду (воздух) и нагревается за счет конвекции и излучения. В результате инициируется процесс испарения воды. Как показано в [154] фронт испарения с ростом времени смещается от поверхности нагрева вглубь топлива. В результате формируется пористый древесно – угольный каркас с высоким термическим сопротивлением. Водяные пары, образующиеся при испарении, фильтруются сквозь слой сухого топлива, охлаждая его и

вступают в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса. В результате образуется горючие газообразные продукты (CO и H_2). Дальнейший нагрев частицы приводит к термическому разложению органической части угля и основных компонентов древесины (целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина) и, как следствие, выходу летучих [154]. Последние совместно с парами воды и газообразными продуктами их термохимического взаимодействия с углеродом кокса фильтруются к нагреваемой поверхности частицы топлива и вдуваются во внешнюю высокотемпературную среду [154]. В результате в пограничном слое частицы формируются смесь водяных паров, воздуха и горючих газов с существенным градиентом концентраций. При достижении критических значений температур и массового соотношения летучих и окислителя происходит воспламенение этой смеси [154].

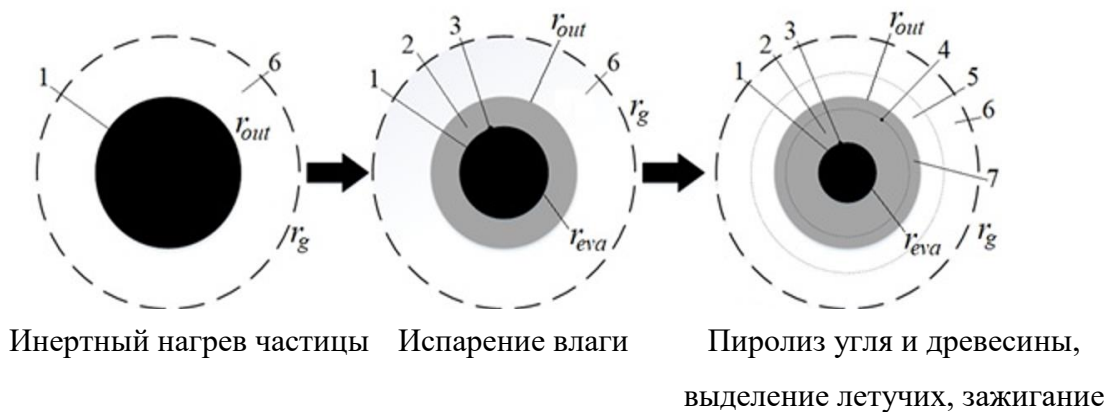


Рисунок 4.1.1.2 — Схема области решения проблемы [154]:

1 – исходная (водонасыщенная) часть топлива; 2 – сухой топливный каркас; 3 – граница раздела системы «сухое топливо – водонасыщенное топливо»; 4 – условная граница раздела системы «сухое топливо – пиролизированный угольный каркас»; 5 – зона взаимодействия газообразных продуктов пиролиза и окислителя; 6 – высокотемпературный газ; 7 – топливо в условиях термического разложения

Математическая постановка задачи воспламенения Био – ВУТ, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных переменных [154]. Область решения задачи – «частица топлива – газовая среда» (Рисунок 4.1.1.2). В период термической подготовки каплю Био – ВУТ можно условно разделить на две зоны: исходное (насыщенное влагой) топливо и сухой древесно – угольный каркас. Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии [154]:

$$\frac{1}{Fo_{b_wcf}} \frac{\partial E}{\partial \tau} - C_{gm} P_{gm} \frac{Pe_{gm}}{Da} \left[\frac{\partial H}{\partial R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial H}{\partial \Phi} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right] \Psi(\xi) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \Lambda_{b_wcf} \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) +$$

$$+ \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} \Lambda_{b_wcf} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) - \frac{\Omega \delta(\xi)}{Ste} \frac{d\xi}{d\tau} + \sum_{i=1}^{i=3} Po_i \Psi(\xi) \quad (4.1.1.1)$$

$$\sum_{i=1}^{i=3} Po_i^{wcf} = Po_{td}^{coal} (1 - \eta_{td}^{coal}) \exp(-Arr_{td}^{coal}) + Po_{C+H_2O} Y_{C+H_2O} \exp(-Arr_{C+H_2O}) +$$

$$+ \sum_{n=1}^3 \left[Po_{td}^{wood} (1 - \eta_{td}^{wood}) \exp(-Arr_{td}^{wood}) \right]$$

$$E = C_{b_wcf}(R, \Phi, \tau) P_{b_wcf}(R, \Phi, \tau) \theta(R, \Phi, \tau);$$

Распределение давления (H) по радиусу частицы вычислялось при решении уравнения пьезопроводности [154]:

$$\frac{1}{Fo_H} \frac{\partial(\Pi H)}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 X \frac{\partial H}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} X \frac{\partial H}{\partial \Phi} \right) + Po_{\Sigma}^H; \quad (4.1.1.2)$$

$$Po_{\Sigma}^H = \left[Po_{td-c}^H + Po_{td-w}^H + Po_{C+H_2O}^H \right] \Psi(\xi) + Po_{eva}^H \delta(\xi);$$

Распределение температуры в тонком слое газа вокруг частицы описывается уравнением энергии [154]:

$$\frac{K_a}{Fo_{b_wcf}} \frac{\partial E_g}{\partial \tau} + Pe \left[U_g \frac{\partial E_g}{\partial R} + \frac{V_g}{R} \frac{\partial E_g}{\partial \Phi} \right] = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \Lambda_g \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} \Lambda_g \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) + \sum_{i=1}^{i=3} Po_i; \quad (4.1.1.3)$$

$$\sum_{i=1}^{i=3} Po_i = Po_{CH_4+O_2} \prod_{i=1}^m \left[Y_i \exp(-Arr_i) \right] + Po_{H_2+O_2} \prod_{i=1}^m \left[Y_i \exp(-Arr_i) \right] + Po_{CO+O_2} \prod_{i=1}^m \left[Y_i \exp(-Arr_i) \right];$$

$$E_g = C_g(R, \Phi, \tau) P_g(R, \Phi, \tau) \theta(R, \Phi, \tau);$$

Скорость и давление газа в пограничном слое частицы ВУТ вычислялась с использованием аналитического решения задачи Стокса об обтекании шара [154]:

$$H_g = 1 + \frac{3}{2} \Upsilon R_{out} U_g \frac{\cos \Phi}{R^2}; \quad \text{распределение давления в газовой области} \quad (4.1.1.4)$$

$$U_g = -2U_g^{fl} \cos \Phi \left(\frac{1}{2} - \frac{3R_{out}}{4R} + \frac{R_{put}^3}{4R^3} \right); \quad \text{в радиальном направлении} \quad (4.1.1.5)$$

$$V_g = U_g^{fl} \sin \Phi \left(1 - \frac{3R_{out}}{4R} - \frac{R_{put}^3}{4R^3} \right); \quad \text{в азимутальном направлении} \quad (4.1.1.6)$$

На границе раздела системы «частица ВУТ – газовая среда» принято граничное условие 4 – го рода [154]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = K_{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial R} + Ki_{\Sigma}; \quad (4.1.1.7)$$

$$\theta(R_{out}, \varphi, \tau) \Big|_{R=R_{out}+0} = \theta(R_{out}, \varphi, \tau) \Big|_{R=R_{out}-0};$$

$$Ki_{\Sigma} = Sk(\theta) \cdot \sum_{i=1}^{n=4} \left[\chi \cdot \left(\frac{T_0}{T_{eva} - T_0} \right)^{i-1} \left(\theta_s^{n+1-i} - \theta \Big|_{R=R_{out}}^{n+1-i} \right) \right] + Ki_{C+O_2};$$

$$\chi = \begin{cases} 1, & i=1 \\ 4, & i=2 \vee 4 \\ 6, & i=3 \end{cases};$$

Процесс термического разложения органической части угля и основных компонентов древесины описывается уравнением химической кинетики [154]:

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial \tau} = [1 - \eta_i] K_{td-i} (-Arr_i); \quad (4.1.1.8)$$

В работе принята модель пиролиза [154, 388] (Рисунок 4.1.1.3), учитывающая формирование трех (летучие, кокс, смола) продуктов пиролиза

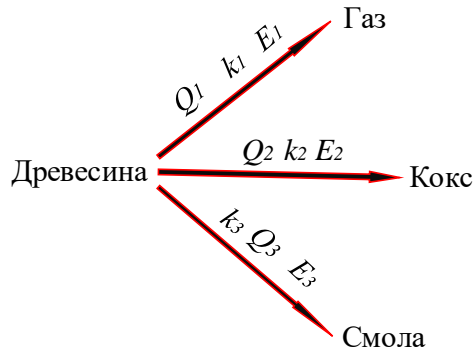


Рисунок 4.1.1.3 — Схема пиролиза древесины [154, 408]

При постановке задачи зажигания принята кинетическая схема воспламенения основных горючих компонентов газообразных продуктов пиролиза древесины и угля (метан – CH_4 ; окись углерода – CO ; водород – H_2), соответствующая схеме воспламенения летучих водоугольного топлива §3.1. В непосредственной близости от поверхности частицы учитывалось протекание трех наиболее значимых [151] реакций. Концентрации компонентов парогазовой смеси (H_2 , CO , CH_4 , CO_2 и H_2O) в пограничном слое частицы рассчитывались при решении уравнений диффузии для соответствующего компонента реакции [154]:

$$\frac{1}{Fo_{dif}} \frac{\partial P_g Y_i}{\partial \tau} + Pe_{dif} \left[U_g \frac{\partial P_g Y_i}{\partial R} + \frac{V_g}{R} \frac{\partial P_g Y_i}{\partial \Phi} \right] = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 P_g D_i \frac{\partial Y_i}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} P_g D_i \frac{\partial Y_i}{\partial \Phi} \right) -$$

$$- P O_i^{dif} \prod_{i=1}^n [Y_i \exp(-Arr)] \quad (4.1.1.9)$$

Изменение плотности (ρ_3) и пористости (Π) топлива рассчитывались из выражения:

$$\frac{\partial P_c}{\partial \tau} = (P_c - P_c^{etd}) K_{td} (-Arr), \quad (4.1.1.10)$$

$$\Pi = \Pi_0 \frac{P_c - P_c^0}{P_c^{etd} - P_c^0}; \quad (4.1.1.11)$$

Система уравнений решалась при следующих начальных:

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

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

и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{\substack{R=0 \\ 0 < \Phi < \pi}} = 0 \quad (4.1.1.12) \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right|_{\substack{0 < R < R_g \\ \Phi=0 \\ \Phi=\pi}} = 0 \quad (4.1.1.13) \quad \left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} \right|_{\substack{R=R_g \\ 0 < \Phi < \pi}} = 0 \quad (4.1.1.14)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial R} \right|_{\substack{R=0 \\ 0 < \Phi < \pi}} = 0 \quad (4.1.1.15) \quad \left. \frac{\partial H}{\partial \Phi} \right|_{\substack{0 < R < R_{out} \\ \Phi=0 \\ \Phi=\pi}} = 0 \quad (4.1.1.16) \quad H \Big|_{\substack{R=R_{out} \\ 0 < \Phi < \pi}} = 1 \quad (4.1.1.17)$$

$$\left. \frac{\partial^2 Y_i}{\partial R^2} \right|_{\substack{R=R_g \\ 0 < \Phi < \pi}} = 0 \quad (4.1.1.18) \quad \left. \frac{\partial Y_i}{\partial \Phi} \right|_{\substack{0 < R < R_g \\ \Phi=0 \\ \Phi=\pi}} = 0 \quad (4.1.1.19)$$

$$D_{i \rightarrow air} P_g \left. \frac{\partial Y_i}{\partial R} \right|_{\substack{R=R_{out} \\ 0 < \Phi < \pi}} = P_{gm} \frac{N}{Da} \left. \frac{\partial H}{\partial R} \right|_{R=R_{out}-0} \quad (4.1.1.20)$$

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложение В. Условные обозначения приведены в приложении Г. На Рисунке 4.1.1.4 приведены зависимость времен задержки воспламенения частиц био – водоугольного в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов. Анализ зависимостей, приведенных на Рисунке 4.1.1.4 показывает, что размер топливной частицы оказывать существенное влияния на характеристики и условия воспламенения капель Био – ВУТ. Но можно отметить, что с увеличением температуры внешней среды фактор влияния характерного размера топливной частицы на характеристики и условия воспламенения капель Био – ВУТ снижается. Это скорее всего обусловлено, тем что, в условиях высоких температур воспламенение топлива протекает, как правило в газовой фазе. Соответственно для стабильного зажигания необходимым условием является формирование в пограничном слое частицы смеси газообразных продуктов пиролиза и окислителя.

Также на Рисунке 4.1.1.4 приведены полученные теоретически зависимости $t_{ign}(d)$. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений времен задержек зажигания показывает их хорошее (в пределах естественного разлета экспериментальных ре-

зультатов) соответствие. Соответственно можно сказать, что разработанная математическая модель обладает достаточно высоким прогностическим потенциалом прогнозирования характеристик и условия воспламенения существенно неоднородных капель био – водоугольного топлива.

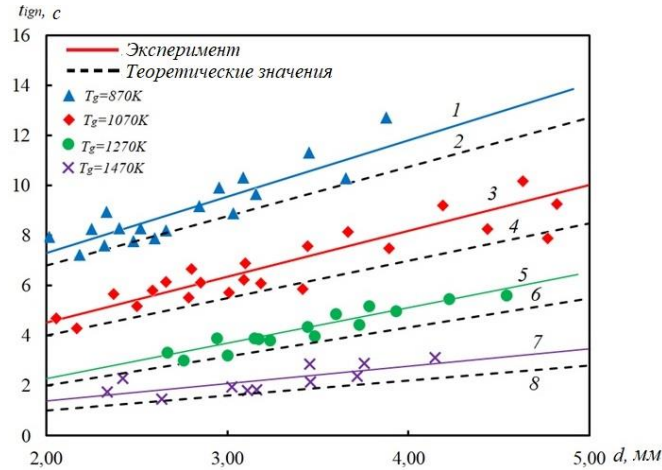


Рисунок 4.1.1.4 — Зависимость времен задержки зажигания частиц био – водоугольного топлива (Био – ВУТ №1) в условиях высокотемпературного нагрева: 1,2 – $T_g = 870\text{K}$; 3,4 – $T_g = 1070$; 5,6 – $T_g = 1270$; 7,8 – $T_g = 1470$

1, 3, 5, 7 – экспериментальные результаты;

2, 4, 6, 8 – результаты математического моделирования

На Рисунке 4.1.1.5 приведены времена задержки воспламенения капель Био – ВУТ №2 (на основе угля и березы). Сравнительный анализ Рисунков 4.1.1.5 и 4.1.1.6 показывает, что интегральные характеристики процесса зажигания частиц био – водоугольного топлива №1 и №2 отличаются незначительно. Последнее обусловлено скорее всего тем, что содержание летучих у березы и сосны практически одинаковое. Также стоит отметить, что теплофизические характеристики (теплопроводность – λ , теплоемкость – C и плотность – ρ) этих древесин, имеют близкие (по своим величинам) значения. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений $t_{ign}(d)$ также показал их хорошее соответствие.

На Рисунке 4.1.1.6 приведены зависимости времен задержек воспламенения частиц био – водоугольного топлива №3 (на основе угля и опилок из лиственницы) в условиях высокотемпературного нагрева. Можно отметить, что времена задержки Био – ВУТ №3 в целом меньше, чем для Био – ВУТ №1 и №2. Это обусловлено тем, что в результате содержание основного пиролизируемого компонента древесины – целлюлозы, в лиственнице меньше, чем у березы и сосны. Также аналогично Рисункам 4.1.1.5 и 4.1.1.6 сравнительный

анализ теоретических и экспериментальных значений времен задержки воспламенения показал их хорошее соответствие.

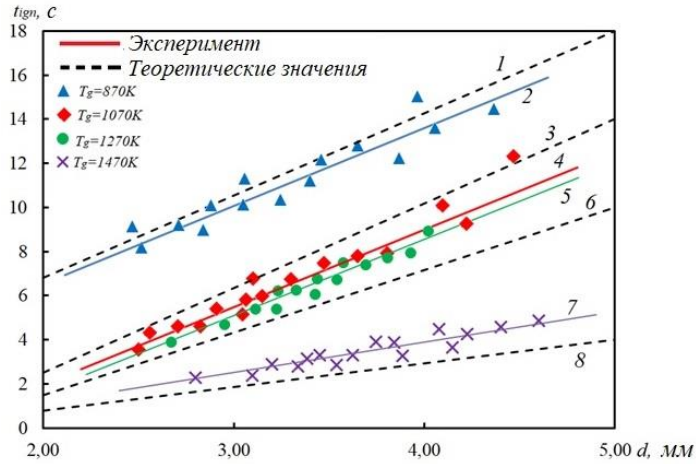


Рисунок 4.1.1.5 — Зависимость времен задержки зажигания частиц био – водоугольного топлива (Био – ВУТ №2) в условиях высокотемпературного нагрева [154]: 1, 2 – $T_g = 870\text{K}$; 3, 4 – $T_g = 1070\text{K}$; 5, 6 – $T_g = 1270\text{K}$; 7, 8 – $T_g = 1470\text{K}$
1, 3, 5, 7 – экспериментальные результаты; 2, 4, 6, 8 – результаты математического моделирования

В целом, проведя сравнительный анализ времен задержек воспламенения частиц водоугольного [151] и био – водоугольных топлив можно сказать, что несмотря на более высокую влажность капель Био – ВУТ (по сравнению с ВУТ), они зажигаются значительно быстрее чем частицы водоугольного топлива. Скорее всего это обусловлено тем, что древесина обладает более высоким, по сравнению с углем, содержанием летучих.

Рисунок 4.1.1.6 иллюстрирует динамику изменения температуры поверхности (T_{sur}) капли Био – ВУТ в процессе ее зажигания. Анализ зависимостей $T_{\text{sur}}(t)$ показывает, что весь период термической подготовки можно условно разделить на ряд последовательных характерных стадий. В начальный период времени (до $t \approx 0.4 \cdot t_{\text{ign}}$) происходит инертный нагрев топливной капли (температура растет медленно). После этого инициируется процесс интенсивного испарения воды. Можно отметить характерный перелом кривой $T_{\text{sur}}(t)$ и увеличение скорости роста температуры поверхности топлива. Это обусловлено тем, что в результате влагоудаления формируется пористый древесно – угольный каркас с низкой теплопроводностью и теплоемкостью. В результате приповерхностный слой топлива начинает нагреваться значительно быстрее.

На Рисунке 4.1.1.7 можно отметить характерное изменение характера кривой $T_{\text{sur}}(t)$ в момент времени $t \approx 0.8 \cdot t_{\text{ign}}$, который соответствует моменту воспламенением летучих. В

результате интенсивного теплового воздействия пламени их факела происходит инициирование горения коксового остатка. Последнее приводит к резкому изменению скорости роста T_{sur} . Можно отметить, что кривая $T_{sur}(t)$ принимает экспоненциальный характер ($\partial T/\partial t \approx \exp[-E/(RT_{sur})]$).

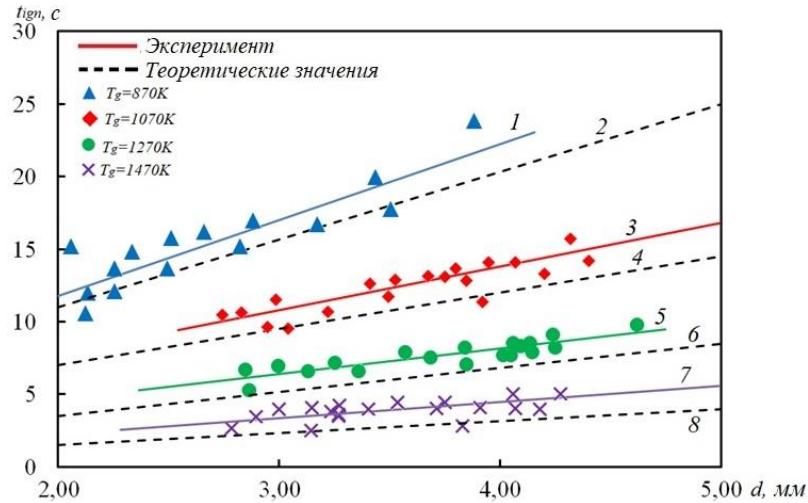


Рисунок 4.1.1.6 — Зависимость времен задержки воспламенения частиц био – водоугольного топлива (Био – ВУТ №3) в условиях высокотемпературного нагрева [154]

1, 2 – $T_g = 870\text{K}$; 3, 4 – $T_g = 1070$; 5, 6 – $T_g = 1270$; 7, 8 – $T_g = 1470$; 1, 3, 5, 7 – экспериментальные результаты; 2, 4, 6, 8 – результаты математического моделирования

На Рисунке 4.1.1.8 представлены глубины проникновения фронта испарения ($\psi_{eva} = r_{eva}/r_0$) в глубь топлива в зависимости от T_g для трех вариантов Био – ВУТ. Можно сказать, что при зажигании капли Био – ВУТ возможны режимы воспламенения еще водонасыщенных частиц. Можно отметить, что с увеличением температуры внешней среды значение ψ_{eva} также увеличивается. Но при этом стоит сказать, что, как показывает анализ зависимостей Рисунка 4.1.1.8, для зажигания необходимо формирование сухого слоя топлива. Это обеспечивает стабильное протекание процесса пиролизу органической части угля, а также основных компонентов древесины с выделением горючих газообразных компонентов. Также необходимо сказать, что при высоких температурах внешней среды значения ψ_{eva} максимальны (другими словами толщина слоя сухого топлива незначительна). Соответственно можно обоснованно предположить, что в условиях постоянной фильтрации водяных паров и газообразных продуктов и больших градиентов температур в приповерхностном слое частице могут формироваться существенные напряжения, которые могут привести к разрушению основного слоя топлива.

Одним из важнейших технологических параметров, влияющих на выбор оптимальных конструктивных характеристик топочных устройств котельных агрегатов, является

компонентный состав газообразных продуктов пиролиза угля. Следует сказать, что компонентный состав летучих веществ существенно зависит от температуры нагрева угля (согласно, например [422]). По этой причине представляет интерес оценка влияния компонентного состава газообразных продуктов пиролиза (приведенного в Таблице 4.1.1.2) на характеристики и условия воспламенения при различных температурах угля.

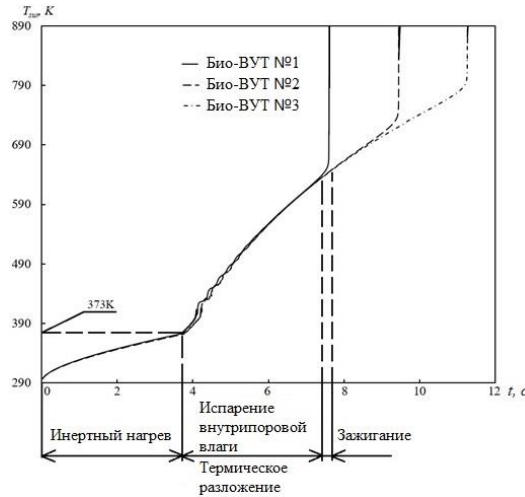


Рисунок 4.1.1.7 — Динамика изменения температуры поверхности в процессе зажигания при температуре $T_g = 873\text{К}$. Номера кривых соответствуют номерам составов био – водоугольных топлив [154]

На Рисунке 4.1.1.9 показана зависимость безразмерных времен задержки воспламенения $\xi = t_{ign}/t_{ign}^0$ (где t_{ign} – время задержки воспламенения, t_{ign}^0 – время задержки воспламенения при начальном (характерном для длиннопламенного угля) составе летучих $t_{ign}^0 = 12,87\text{ с}$) частицы био – водоугольного топлива (характерный размер капли Био – ВУТ $d = 5\text{ мм}$) от компонентного состава летучих. Можно отметить, что наименьшие значения

Таблица 4.1.1.2 — Компонентный состав летучих [154, 423]

| Номер состава | T, К | H ₂ | CO | CO ₂ | CH ₄ | Другие |
|---------------|------|----------------|-------|-----------------|-----------------|--------|
| 1 | 673 | 1.71 | 16.61 | 49.87 | 18.82 | 12.99 |
| 2 | 773 | 8.64 | 16.06 | 27.98 | 34.00 | 13.32 |
| 3 | 823 | 15.94 | 16.83 | 21.75 | 35.64 | 9.84 |
| 4 | 873 | 19.5 | 16.93 | 19.65 | 35.47 | 8.45 |
| 5 | 923 | 26.29 | 15.86 | 15.51 | 35.54 | 6.8 |

времен задержки воспламенения характерны для состава летучих №5 (таблица 4.1.1.2). Анализ компонентов, перечисленных в Таблице 4.1.1.2, дает основание сделать вывод о существенном влиянии содержания водорода и метана на условия возгорания. Скорее всего, это

связано с тем, что H_2 и CH_4 являются высокорекреационными топливами [368]. Также стоит отметить, что на динамику воспламенения существенное влияние (по результатам анализа данных Таблицы 4.1.1.2) содержание углекислого газа. Снижение концентрации CO_2 также приводит к ускорению процесса воспламенения частицы топлива. Это связано с тем, что углекислый газ в период термической подготовки образует своеобразный «барьер» в пограничном слое, препятствующий диффузии окислителя к поверхности топлива.

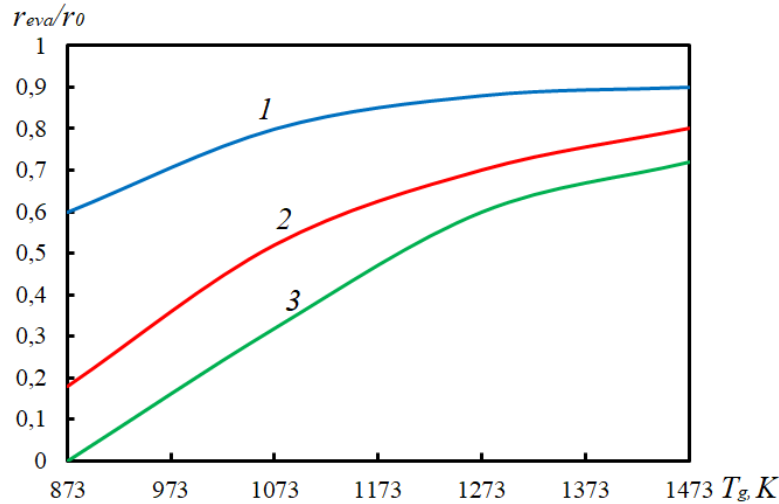


Рисунок 4.1.1.8 — Глубина проникновения фронта испарения в момент воспламенения [154]:

1 – $d \geq 3,0$ мм; 2 – $d = 2,0$ мм; 3 – $d = 1,0$ мм

Одним из важнейших параметров, влияющих на выбор конструктивных характеристик и режимов работы камер сгорания котлоагрегатов, является минимальная температура внутренней топочной среды, при которой происходит воспламенение топлива. Последний параметр существенно влияет на режимы работы запальных и горелочных устройств котельного агрегата.

На Рисунке 4.1.1.10 представлена зависимость времени задержки воспламенения капли (с характерным размером $d = 5$ мм) био – водоугольного топлива от температуры окружающей среды. Можно сделать вывод, что предельная температура воспламенения (T_{sti}) топлива составляет $\approx 714K$. Стоит отметить, что к аналогичному выводу авторы пришли [424] по результатам экспериментальных исследований процесса воспламенения капель водоугольного топлива в проточной реакционной трубе ($T_{sti} \approx 740K$) [154].

Снижение температуры окружающей среды приводит к экспоненциальному увеличению времени задержки воспламенения, значения которого становятся настолько большими, что использование Био – ВУТ становится практически нецелесообразным в реальной практике.

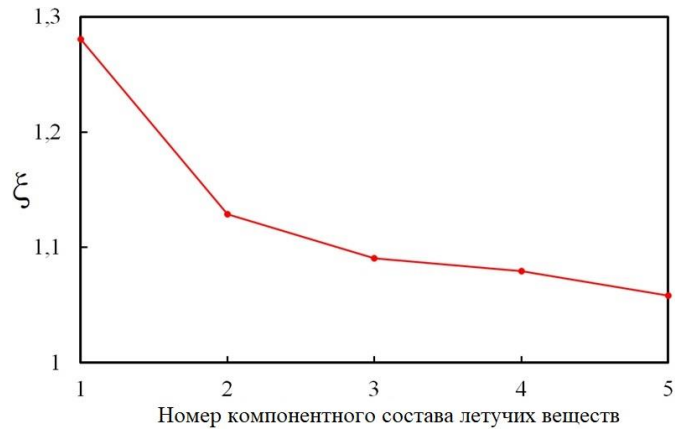


Рисунок 4.1.1.9 — Зависимость безразмерной временной задержки воспламенения частиц Био – ВУТ от компонентного состава газообразных продуктов пиролиза. Номер компонентного состава летучих веществ соответствует количеству, приведенному в Таблице 4.1.1.2 [154]

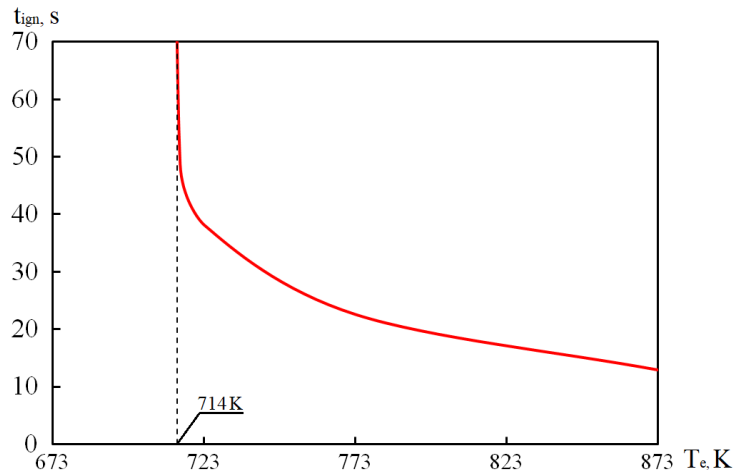


Рисунок 4.1.1.10 — Зависимость времени задержки воспламенения частицы Био – ВУТ (с характерным размером $d = 5$ мм) от температуры [154]

4.1.2 Математическое моделирование зажигания частиц био – водоугольного топлива на основе угля и лесного горючего материала

Можно обосновано сказать, что на настоящее время не проведена оценка влияния внедрения лесного горючего материала (ЛГМ) в структуру водоугольного топлива на характеристики его воспламенения. ЛГМ представляет собой мелкодиспергированный лиственный и хвойной опад, сухостой, бурелом и т.д. При этом математического моделирования процесса воспламенения смесей вода – уголь – ЛГМ не проводилось. По этой причине ос-

новной целью этого параграфа является определение по результатам численного моделирования основных закономерностей процесса воспламенения частиц био – водоугольного топлива на основе угля.

Экспериментальные исследования процессов зажигания и горения одиночных капель Био – ВУТ проводились на стенде, который по своему устройству и методам регистрации характеристик процессов зажигания аналогичен установке, описанной выше в разделе 2.2. Физическая постановка соответствует установленным в разделе 4.1.1 закономерностям процесса воспламенения и горения частиц Био – ВУТ.

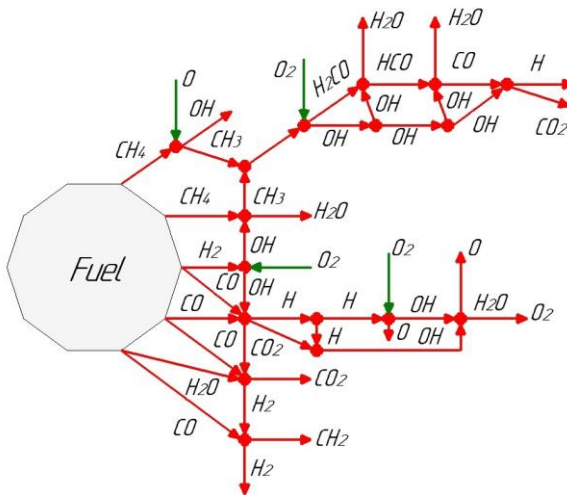


Рисунок 4.1.2.1 — Кинетическая схема реагирования газообразных продуктов пиролиза (H_2 ; CO ; CH_4) с окислителем (O_2)

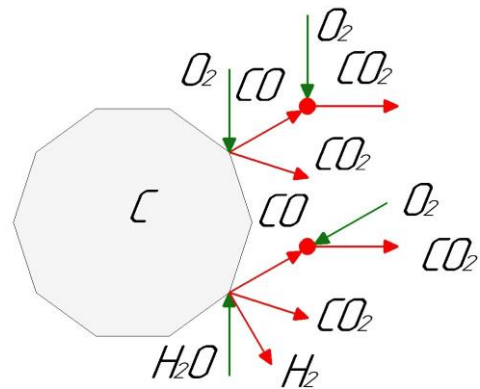


Рисунок 4.1.2.2 — Кинетическая схема реагирования углерода кокса с водяным паром (H_2O), диоксидом углерода (CO_2) и кислородом (O_2)

Математическая постановка задачи воспламенения Био – ВУТ, по своей структуре системы дифференциальных уравнений и граничных условий соответствует математической модели, приведенной в разделе 4.1.1. Отличие заключается в том, что при разработке математической постановки задачи воспламенения принята многостадийная (с последовательными и параллельными реакциями) кинетическая схема термохимического реагирования газообразных и конденсированных продуктов пиролиза угля и биомассы с окислителем. Кинетическая схема реакций водорода (H_2), монооксида углерода (CO) и метана (CH_4) с кислородом воздуха приведена на Рисунке 4.1.2.1. Схема реакций углерода с водяными парами, диоксидом углерода и кислородом приведена на Рисунке 4.1.2.2.

На Рисунке 4.1.2.3 приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных и полученных по результатам численного моделирования значения времен задержки зажигания частицы био – водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля и листьев березы [160]. Анализ теоретических и экспериментальных значений t_{ign} показал их

хорошее соответствие. Можно сделать вывод, что разработанная математическая модель обладает достаточно высоким прогностическим потенциалом при моделировании процессов зажигания капель водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов.

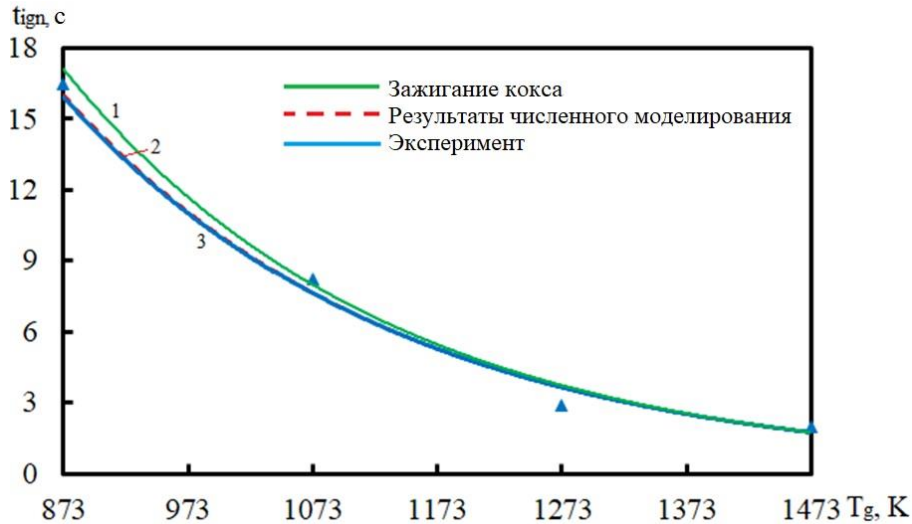


Рисунок 4.1.2.3 — Зависимость времен задержки воспламенения капель био – водоугольного топлива от температуры внешней среды, в условиях высокотемпературного нагрева [160]:

1 – время задержки зажигания кокса;

2 – время задержки воспламенения летучих, полученное по результатам численного моделирования;

3 – экспериментальные значения времен задержки воспламенения

Также на Рисунке 4.1.2.3 приведены результаты численного моделирования зажигания углерода кокса при воспламенении капель био – водоугольного топлива. Можно отметить, что период времени (Δt_{ign}) между моментами времен задержки зажигания летучих и углерода кокса незначителен. В условиях высоких температур $\Delta t_{ign} \rightarrow 0$ [160]. Это скорее всего обусловлено тем, что при $T_g \geq 1073$ существенную роль играет тепловое излучение внешней среды. Последнее хорошо показано в [180]. В период термической подготовки капель Био – ВУТ происходит прогрев основного слоя топлива, после воспламенения летучих существенно интенсифицируется нагрев поверхности капли Био – ВУТ и, соответственно, инициируется горение кокса.

На Рисунках 4.1.2.4 (а, б) приведены динамики температуры поверхности (θ_{sur}) и центральной части (θ_{cen}) капли био – водоугольного в зависимости от безразмерного вре-

мени зажигания $\xi = t/t_{ign}$ топлива в индукционный период времени. Рисунок 4.1.2.4 *a* иллюстрирует динамику изменения (θ_{sur}) и (θ_{cen}) при различных температурах внешней среды в условиях зажигания капли топлива.

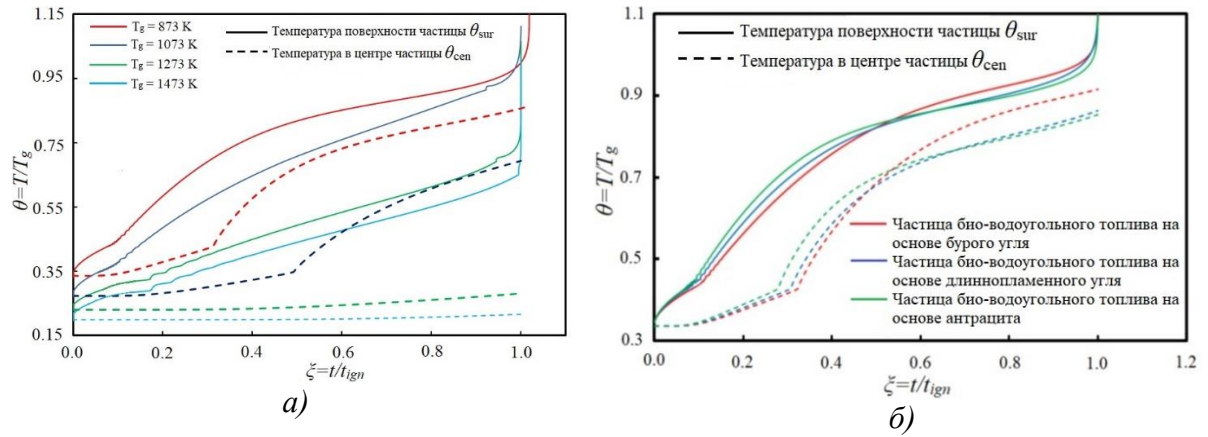


Рисунок 4.1.2.4 — Динамика безразмерной температуры поверхности и центра частицы био – водоугольного топлива (диаметром $d = 0,45$ мм) в период индукции [159].

a – в зависимости от вида угля; *б* – в зависимости от температуры внешней среды

$$\text{где } \theta_{sur} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \theta(R, \Phi, Fo) d\Phi$$

Анализ зависимостей $\theta_{sur}(Fo)$ показывает, что весь период термической подготовки можно условно разделить на ряд последовательных характерных стадий [160]. В начальный период времени происходит инертный нагрев капли Био – ВУТ. После этого инициируется процесс интенсивного испарения воды. В результате формируется пористый угольный каркас с низкой теплопроводностью и теплоемкостью. При этом можно отметить, что период испарения воды самый продолжительный. Это обусловлено тем, что в результате совместного действия фазового перехода и фильтрации водяных паров происходит охлаждение угля [160]. На финальной стадии (при $t > 0.9 \cdot t_{ign}$) можно отметить, характерный излом кривой и резкое увеличение температуры. Это обусловлено воспламенением газообразных продуктов пиролиза. Это обусловлено тем, что при зажигании летучих существенно интенсифицируется нагрев поверхности топлива, что приводит к инициированию горения кокса. Также на Рисунке 4.1.2.4 *a* приведен тренд безразмерной температуры частицы в ее центре $\theta_{cen}(t)$.

$$\text{где } \theta_{cen} = \theta(0, 0, Fo)$$

Можно отметить характерный излом кривых, советующих процессам зажигания при $T_g \leq 1073\text{K}$. Такое изменение характера функции $\theta_{cen}(t)$ обусловлено полным удалением влаги топлива. В результате существенно уменьшается его теплоемкость. По этой причине

температура с изменением времени начинает расти значительно быстрее. Можно отметить, что в момент воспламенения разница значений температур между центром и поверхностью частицы незначительна. Это, скорее всего, обусловлено тем, что на условие воспламенения частиц водоугольного топлива влияет концентрация продуктов пиролиза в их пограничном слое. По этой причине малые по размерам частицы ($d < 3 \text{ mm}$) зажигаются только после достаточно глубоко прогрева всего слоя топлива и выделения критического (по условиям воспламенения) количества летучих. Совершенно другая динамика изменения $\theta_{cen}(t)$ наблюдается в условиях высокотемпературного воспламенения ($T_g \geq 1273\text{K}$). Можно отметить, что зажигание происходит до полного испарения внутрислойной влаги топлива (нет характерного излома кривой $\theta_{cen}(t)$). Соответственно, можно сказать, что процесс горения частицы топлива в условиях, продолжающегося испарения воды, будет существенно отличаться от окисления сухого угля.

На Рисунке 4.1.2.4 б приведены зависимости $\theta_{sur}(t)$ и $\theta_{cen}(t)$ при зажигании частиц био – водоугольного топлива, выполненных на основе углей различной степени метаморфизма (антрацита, длиннопламенного и бурого угля), при температуре внешней среды $T_g = 873\text{K}$. Можно отметить отличающиеся динамики $\theta_{sur}(t)$ для частиц Био – ВУТ, выполненных из разных углей. Температура поверхности капли Био – ВУТ на основе антрацита в начальный период времени ($\xi < 0.5$) растет медленнее чем у частиц топлива, выполненных на основе бурого и каменного угля. При этом в период времени $\xi \geq 0.5$ θ_{sur} для частиц Био – ВУТ на основе антрацита растет быстрее чем, для капель био – водоугольного топлива на основе каменного и бурого углей. Это обусловлено в первую очередь отличающимися теплофизическими характеристиками. Как известно увеличение степени метаморфизма угля приводит к уменьшению их теплоемкости и увеличению коэффициента теплопроводности. Соответственно, в начальный период времени вся капля Био – ВУТ прогревается целиком, за счет оттока теплоты от поверхности вглубь топлива. Для частиц, выполненных на основе бурого угля вследствие малой теплопроводности, поступающее от внешней среды тепло концентрируется в приповерхностном слое частицы. Но после высыхания частицы температуры поверхности частицы био – водоугольного топлива на основе антрацита из – за низкой теплоемкости базового топлива (угля) растет быстрее чем у капель Био – ВУТ на основе углей марок Б и Д. Аналогичный вывод можно сделать и вывод по результатам анализа зависимостей $\theta_{cen}(t)$.

С целью оценки динамики прогрева топливной частицы в зависимости от марки угля введем следующие безразмерные критерии:

$$\Xi = \frac{d\theta_{sur}}{d\xi} - \text{ скорость нагрева частицы;}$$

$$\zeta = \frac{d\Xi}{d\xi} - \text{ускорение нагрева топливной частицы.}$$

На Рисунках 4.1.2.5 (а, б) приведены значения безразмерных параметров ζ и Ξ в зависимости от безразмерного времени ξ для разных составов био – водоугольного топлива. Анализ зависимости на Рисунке 4.1.2.5а показывает, что можно условно выделить два режима прогрева каплей (в начальный период термической подготовки), а за тем частиц (после высушивания) с границей раздела по $\xi \approx 0,3 - 0,35$. При значениях $\xi < 0,3$ топливные частицы на основе суббитумного и бурого углей нагреваются значительно быстрее по сравнению с Био – ВУТ на основе антрацита. Как известно [160] с увеличением степени мета

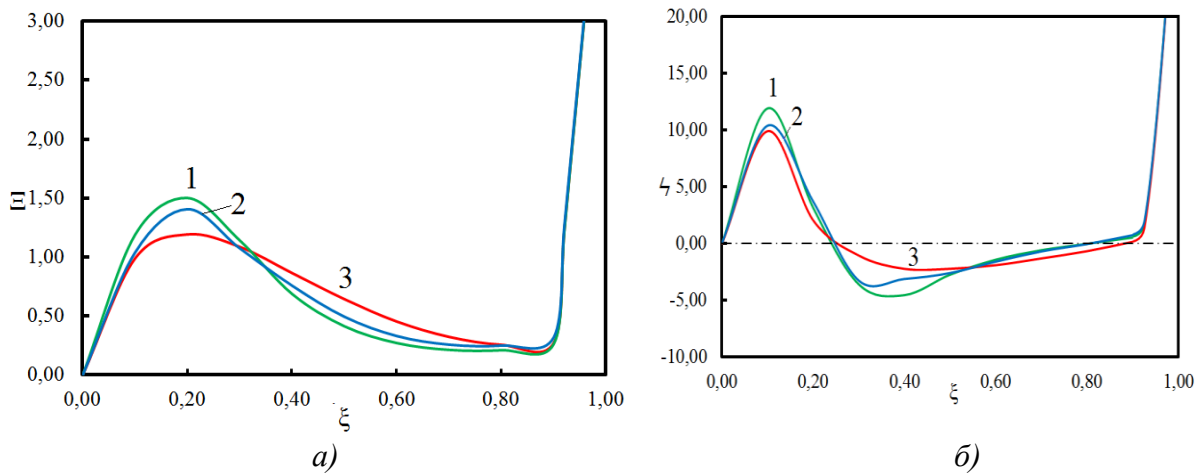


Рисунок 4.1.2.5 — Зависимости значений безразмерных параметров Ξ и ζ от безразмерного времени ξ для различных составов био – водоугольного топлива.

- 1 – Био – ВУТ на основе антрацита;
- 2 – Био – ВУТ на основе длиннопламенного угля;
- 3 – Био – ВУТ на основе бурого угля

морфизма угля его теплопроводность увеличивается, а теплоемкость уменьшается. Скорее всего в начальный период времени вследствие высокой теплопроводности антрацита капля топлива на его основе прогревается на большую глубину (вплоть до центра сферической частицы). В тоже время у частиц на основе других углей (бурый и суббитумный) нагревается только приповерхностный слой топлива (тепло как бы «аккумулируется» в близи поверхности), в результате температура в этой области начинает интенсивно расти. После испарения ($\xi > 0,4$) всей влаги скорость изменения температуры частиц Био – ВУТ на базе антрацита существенно возрастает. При этом значение параметра Ξ для антрацитовых частиц Био – ВУТ больше чем для буроугольных (или суббитумных). Это обусловлено низкой теплоемкостью антрацита. При $\xi > 0,9$ значение Ξ начинают экспоненциально увеличиваться.

Это обусловлено воспламенением топлива (по сравнению с другими исследовавшимися углями).

На Рисунке 4.1.2.5 б приведена зависимость значений второй производной температуры поверхности частицы по времени (ζ) от безразмерного времени (ξ) для различных составов топлива. Можно сделать аналогичный рисунок 4.1.2.5 а вывод о двух разных режимах нагрева топливных капель в зависимости от их составов. Можно отметить, что для $\xi \leq 0,25$ капли Био – ВУТ на основе антрацита прогреваются значительно медленнее чем частицы на основе других углей. При $\xi > 0,3$ параметр ζ для антрацитовых частиц существенно возрастает. При этом в период времени $0,3 < \xi < 0,9$ значения ζ для всех видов топлива изменяются незначительно ($-4,5 < \zeta < 0$). Это обусловлено, скорее всего тем, что капля Био – ВУТ прогревается в так называемом «регулярном» режиме нагрева. При $\xi > 0,9$ как видно из Рисунка 4.1.2.5 б происходит экспоненциальное возрастание ζ .

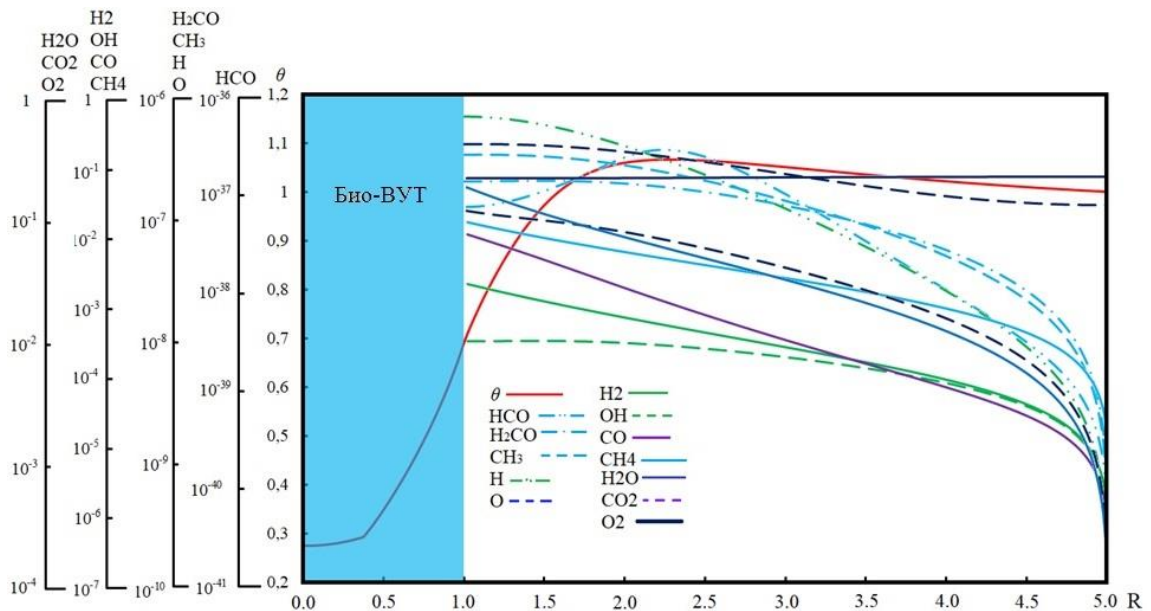


Рисунок 4.1.2.6 — Зависимости безразмерных температуры и концентрации основных газообразных компонентов пиролиза и промежуточных продуктов их термохимического реагирования с кислородом воздуха в момент воспламенения летучих [159]

На Рисунке 4.1.2.6 приведены значения температур и концентраций газообразных продуктов пиролиза и продуктов газофазных термохимических реакций в момент воспламенения летучих в пограничном слое частицы. Можно отметить, что кислород, как правило, в избытке. Его концентрация уменьшается только в очень малой (по размерам) окрестности частицы. Это, скорее всего обусловлено, реагированием O_2 с углеродом кокса, а также сжигание окиси углерода и метана. О последнем свидетельствует увеличение концентрации CO_2 и уменьшением концентрации основных горючих компонент газообразных продуктов

пиролиза (CO , CH_4 , H_2) а также окислителя (O_2), в области характерного увеличения температуры. Также стоит отметить малые (по значению) концентрации промежуточных продуктов реакций водорода и метана (H , CH_3 , H_2CO , HCO , O) по сравнению с концентрациями газообразных продуктов пиролиза. Это обусловлено в первую очередь тем, что эти компонент являются промежуточными в цепочке реакций горения H_2 и CH_4 , соответственно время их существования несоизмеримо мало ($t \rightarrow 0$). По этой причине можно сказать, что при проведении математического моделирования выбор в качестве основных брутто – реакций ($\text{CO} + \text{O}_2$; $\text{H}_2 + \text{O}_2$; $\text{CH}_4 + \text{O}_2$) по аналогии с §4.1.1, достаточно обоснован. Последний тезис подтверждается теоретическими исследованиями [167]. При этом можно отметить повышение концентрации OH в зоне воспламенения летучих, это обусловлено процесса интенсификацией горения водорода.

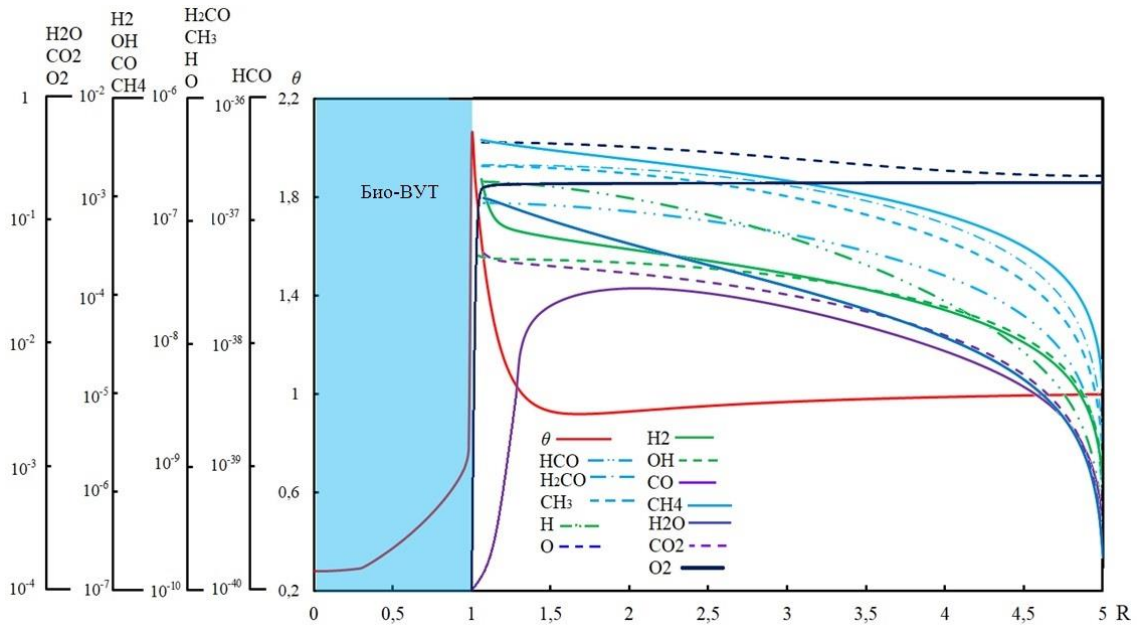


Рисунок 4.1.2.7 — Зависимости безразмерных температуры и концентрации основных газообразных компонентов пиролиза и промежуточных продуктов их термохимического реагирования с кислородом воздуха в момент зажигания кокса [160]

На Рисунке 4.1.2.7 приведены распределение температуры и концентраций газообразных продуктов пиролиз и промежуточных продуктов их термохимического реагирования с кислородом воздуха в момент времени, соответствующий процессу зажигания твердых продуктов пиролиза частицы био – водоугольного топлива. Можно отметить существенное снижение концентрации кислорода (Y_{O_2}) в малой (по размерам) окрестности частицы Био – ВУТ. Это обусловлено поглощением O_2 в результате его реагирования с углеродом кокса. Также можно отметить, существенное снижение значений (Y_{CO}) в приповерх-

ностном газовом слое в момент воспламенения. Это обусловлено интенсификацией процесса сгорания окиси углерода. Также при этом отмечается повышение концентрации CO_2 . Анализ зависимостей, приведенных на Рисунке 4.1.2.7 показывает, что в момент зажигания углерода кокса существенно возрастает концентрация водорода в приповерхностном (у частицы) газовом слое. Это обусловлено интенсификацией процесса мокрой газификации угля вследствие возрастания температуры поверхности частицы. Анализ рисунков 4.1.2.6 и 4.1.2.7 показывает, что воспламенение летучих и кокса происходит еще до полного испарения всей внутрипоровой влаги топлива (виде характерный излом кривой, обусловленный скачкообразным изменением теплофизических характеристик). Соответственно, как уже говорилось ранее, можно обосновано предположить, что процесс окисления в условиях, продолжающегося испарения будет существенно отличаться от горения сухого угля. Как установлено в [169] в результате совместного воздействия термических и фильтрационных напряжений возможно диспергирование угольного каркаса.

Приведенные выше результаты теоретических исследований процесса зажигания частицы био – водоугольного топлива, получены при условии отсутствия обдува частицы внешнем потоком высокотемпературной окислительной среды. В реальных теплогенерирующих установках частицы топлива движутся под действием сил инерции, обусловленных аэродинамическим сопротивлением [152]. Как показали эксперименты, в результате обтекания капли органико – водоугольного топлива [163] в ее малой окрестности формируется аэродинамический спектр сложной конфигурации. Последний может оказывать существенное влияние на характеристики и условия воспламенения капли био – водоугольного топлива. К тому же стоит добавить, что в период термической подготовки газообразные продукты пиролиз могут уноситься набегающим на частицу топлива потоком. В результате в аэродинамическом следе частицы могут возникать зоны с высоким содержанием горючего и низким содержанием окислителя. Последнее также будет оказывать влияние на процесс зажигания. По этой причине целесообразно проводить моделирование процесса воспламенения капли Бмо – ВУТ в условиях обтекания потоком высокотемпературного окислителя.

На Рисунках 4.1.2.8 (*a* и *b*) приведены распределения температуры в системе «водоугольная частица – газовая среда» в момент воспламенения летучих (*a*) и кокса (*b*). Можно отметить, что воспламенение летучих происходит в аэродинамическом следе частицы. Это обусловлено тем, что в процессе обтекания топливной частицы газообразные продукты пиролиза уносятся в «подветренную» зону. В результате в этой зоне формируются достаточные для воспламенения газообразных продуктов пиролиза условия.

На Рисунке 4.1.2.8 б) приведены рассчитанные температурные поля в момент воспламенения углерода кокса. Можно отметить, что зажигание топлива происходит на поверхности частицы в ее наветренной зоне. Это обусловлено в первую очередь тем, что в этой области пограничного слоя самые высокие концентрации и температура окислителя, вследствие обдува высокотемпературным потоком воздуха. С целью сопоставления полученных результатов математического моделирования на Рисунках 4.1.2.8 а, б) приведены характерные кадры (сделанные в экспериментах [160]) воспламенения процесса воспламенения водоугольного (как аналога био – водоугольного) топлива.

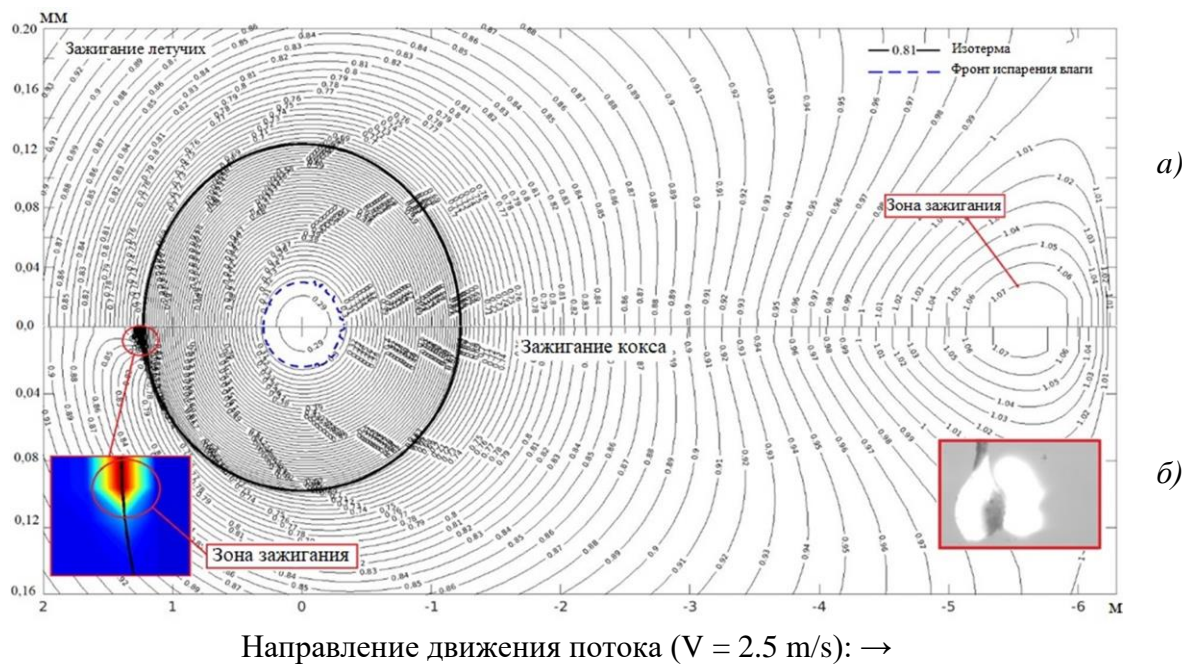


Рисунок 4.1.2.8 — Температурные поля в момент воспламенения летучих (а) и кокса (б) в условиях высокотемпературного нагрева ($T_g = 1273\text{K}$) частицы ($d = 2.5\text{ mm}$) био – водоугольного топлива [160]

На Рисунках 4.1.2.9 (а, б) приведены расчетные значения концентраций продуктов пиролиза, промежуточных продуктов реакций и окислителя в момент воспламенения летучих (а) и кокса (б). Можно отметить, что летучи и промежуточные продукты их реакций с O_2 сконцентрированы в области аэродинамического следа частицы. Как уже говорилось ранее это обусловлено тем, что вследствие обдува частицы набегающим потоком летучие уносятся в область аэродинамического следа частицы. Можно также отметить уменьшение концентрации кислорода в подветренной зоне частицы, обусловленное сгоранием водорода, окиси углерода и метана.

Анализ зависимостей, приведенных на Рисунке 4.1.2.9 б показывает уменьшение концентрации кислорода в области зажигания углерода кокса. Это обусловлено поглощением O_2 за счет реакции его термохимического реагирования с углеродом. При этом можно отметить, скачкообразное увеличение концентрации углекислого газа в этой же области. Соответственно, можно сделать обоснованный вывод, о том, что процессы зажигания и горения частицы био – водоугольного топлива будут оказывать существенное влияние на интегральные характеристики окисления каждой последующей, капли био – водоугольного, движущейся в ее аэродинамическом следе.

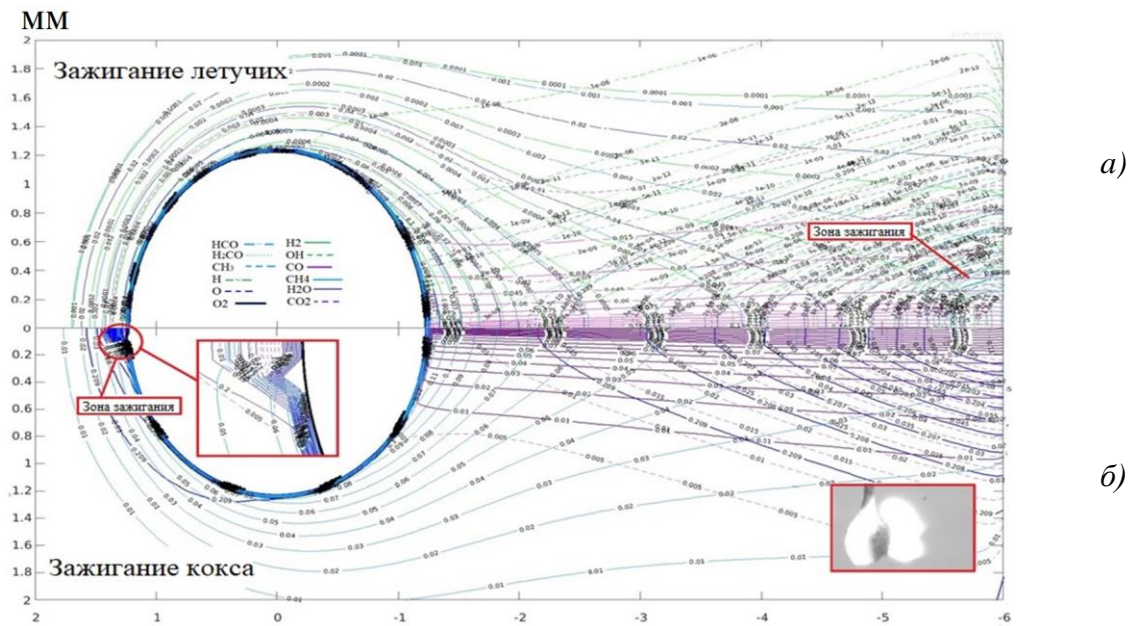


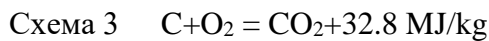
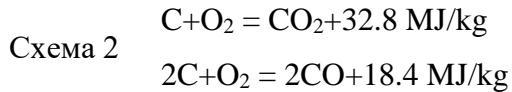
Рисунок 4.1.2.9 — Концентрации газообразных продуктов пиролиза, промежуточных продуктов их реакций с кислородом воздуха и O_2 в момент времени, соответствующий воспламенению летучих (а) и кокса (б) [160]

При разработке математических базы процессов воспламенении и горения частиц существенно неоднородных гетерогенных био – водоугольных топлив (в условиях высокотемпературного нагрева) важной составляющей является кинетическая схема процесса зажигания твердых продуктов пиролиза. По этой причине важным аспектом является обоснование выбора схемы химической кинетики процесса окисления угля.

На Рисунке 4.1.2.10 приведены значения безразмерных времен задержки воспламенения (ζ) от безразмерной температуры внешней среды (Θ).

$$\zeta = \frac{|t_{ign} - t_{ign}^0|}{t_{ign}^0} \quad \Theta = \frac{T_g}{1473}$$

где t_{ign}^0 – время задержки зажигания частицы био – водоугольного топлива рассчитанное, при использовании модели, приведенной на Рисунке 4.1.2.10, t_{ign} – время задержки зажигания, полученное по результатам численного моделирования с учетом упрощённой кинетической схемы термохимического реагирования угля с кислородом. Исследовалась зажигание частиц Био – ВУТ при использовании еще (помимо схемы на Рисунке 4.1.2.1) двух существенно отличающихся кинетических схем окисления углерода кокса:



Сравнительный анализ времен задержки воспламенения показывает, что выбор «упрощенной» кинетической схемы (с учетом только одной реакции $C+O_2 = CO_2$) не оказывает существенного влияния на конечный результат математического моделирования процесса гетерогенного зажигания частицы Био – ВУТ. Величина значений ζ не превышает 0,06 (другими словами, отличие значение времен задержки зажигания не отличается более чем на 6%). Это, скорее всего, обусловлено подавляющем доминированием реакции окисления углерода кислородом ($C+O_2 = CO_2$) над остальными. При этом стоит отметить, что учет двух реакций окисления углерода кокса кислородом воздуха (схема 2) существенно снижает значения ζ . Соответственно, можно сделать обоснованный вывод о том, что реакции мокрой газификации топлива (с образованием CO , CO_2 и H_2) и взаимодействия водорода и углерода кокса являются реакциями второго порядка и не оказывают существенного влияния на динамику воспламенения угля.

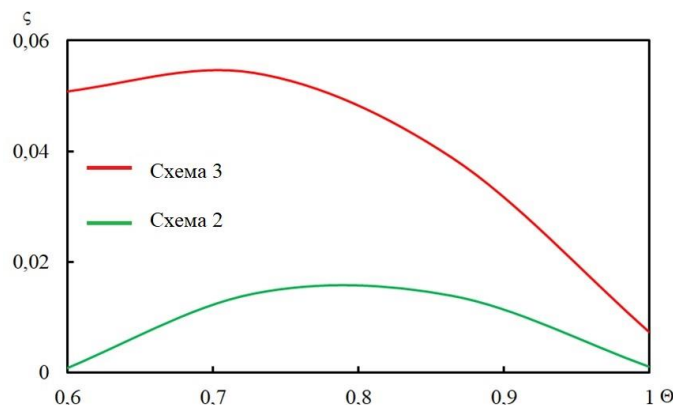


Рисунок 4.1.2.10 — Зависимость безразмерной задержки зажигания ζ от безразмерной температуры внешней среды Θ [160]

Анализ зависимостей Рисунка 4.1.2.10, показывает, что при разработке математической базы процесса воспламенения и горения частиц био – водоугольного (или водоугольного) топлива для высокого прогностического потенциала достаточным является описание

процесса зажигания углерода кокса в рамках одной доминирующей реакции взаимодействия углерода с кислородом воздуха с образованием CO_2 .

4.2 Зажигание органо – водоугольных (нефте – водоугольных) топлив

Результаты проведенных экспериментов по изучению процессов воспламенения типичных капель водоугольных топлив показали, что значения времен задержки воспламенения могут достигать десятков секунд (в условиях низкотемпературного ($T_g \leq 870\text{K}$) нагрева). Такая динамика зажигания частиц топлива накладывает существенные ограничения на конструктивные характеристики топочных камер котельных агрегатов. В этих условиях в топочном пространстве необходимо организовывать вихревые зоны рециркуляции факела с целью стабилизации процесса воспламенения и горения топлива. Это достаточно существенно затрудняет (или делает в принципе невозможным) проектирование котельных агрегатов, сжигающих водоугольное топливо. Выше было показано, что добавление в структуру ВУТ древесной биомассы приводит к существенному снижению значений времен задержки воспламенения. Однако стоит сказать, как известно, древесина является абсорбирующим воду материалом, по этой причине добавление древесины в ВУТ приводит к значительному увеличению вязкости последней (как показано в [425]). Это существенно затрудняет проектирование форсуночных устройств вследствие возрастания рисков эрозийного разрушения рабочих каналов топливных форсунок (по данным [426]).

Другим перспективным способом снижения периодов индукции водоугольных суспензионных топлив является введение в структуру последних высокорекреакционных жидких горючих компонентов на основе углеводородных энергоносителей (нефть, мазут, отработанные масла). Это уже новый класс топлив: многокомпонентные органо – водоугольные (или нефте – водоугольные; вода – уголь/нефть) топлива (ОВУТ).

Но стоит сказать, что до настоящего времени не разработано математического аппарата, обеспечивающего высокий уровень прогнозов временных характеристик процесса воспламенения и горения типичных частиц ОВУТ. Это связано в первую очередь с высокой сложностью моделирования теплофизических и термохимических процессов, протекающих в условиях интенсивных фазовых превращений (испарение воды и жидкого горючего). При этом стоит особо отметить, что массовые скорости воды и жидких углеводородов и, соответственно, скорости движения фронтов фазовых переходов существенно отличаются. В результате в структуре топлива формируется неоднородная структура, состоящая из исходной (вода – и нефтенасыщенной), подсушенной (нефтенасыщенной) и сухой (пористый

угольный каркас) зон. В результате процедура моделирования процессов удаления влаги и жидкой горючей компоненты сводится к решению так называемой многофазной и многофронтной задачи Стефана [427], являющейся одной из самых сложных в математической физике. При этом как уже неоднократно говорилось выше разработка математической базы процессов воспламенения и горения частиц ОВУТ, является необходимым элементом построения общей теории проектирования котельных агрегатов, сжигающих многокомпонентные топливные композиции. По этим причинам целью этой главы диссертации являлась разработка по результатам экспериментальных исследований процессов воспламенения типичных частиц ОВУТ математической модели комплекса физико – химических процессов, протекающих в период термической подготовки и зажигания.

4.2.1 Анализ основных закономерностей процесса воспламенения суспензионных органоводоугольных топлив

Как уже говорилось выше перспективность водоугольных технологий доказана давно. Многочисленные задокументированные (например, [116 – 118]) результаты теоретических и экспериментальных исследований в области водоугольных технологий (анализ структуры и характеристик топлива [86], методика приготовления [302], транспортировка и хранение [428], распыление в топочных устройствах [429], сжигание в энергетических установках [430]) характеризуют высокую перспективность этих топлив. Одним из возможных направлений развития технологий сжигания ВУТ можно считать создание и сжигание органо – водоугольных топливных (ОВУТ) композиций.

На настоящее время опубликованных результатов теоретических исследований по ОВУТ достаточно мало (например, [431]). Актуальность их создания и оптимизации процессов их сжигания очень высокая. Это обусловлено тем, что основными компонентами ОВУТ могут быть: низкосортный уголь; фильтрационный жмых углеобогатительных фабрик; технологические или сточные воды; отходы нефтепереработки; отработанные масла и различные горючие жидкости.

Наиболее важный вопрос – возможность применения в качестве базы для приготовления ОВУТ фильтр – кеков (жмых фильтрационного пресса углеобогатительных фабрик – объемы таких низкокачественных остатков переработки угля только в России исчисляются миллионами тонн [432]). Решение вопросов создания основных элементов теории горения ОВУТ позволит существенно расширить сырьевую базу для большой и малой энергетики, а также позволит разработать экологически эффективные технологические решения

утилизации отходов углеобогачительных фабрик. По этой причине основной целью этого параграфа диссертации является экспериментальное и теоретическое исследование основных закономерностей процесса зажигания перспективных суспензионных органомоноугольных топлив на основе типичных отходов переработки углей и нефти.

Использовался стенд, аналогичный по основным средствам регистрации, описанной в разделе 2.2 установке. Методика экспериментальных исследований и обработки результатов измерений времен задержки воспламенения капель ОБУТ, соответствует методике, приведенной в разделе 2.2. Экспериментальные исследования проведены для группы составов на основе бурого и каменного углей, фильтр – кеков, сточных и технологической воды, отработанных масел, замазочной смеси.

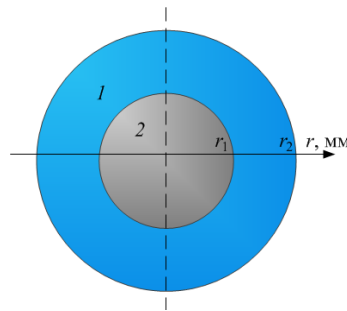


Рисунок 4.2.1.1 — Схема модели тепломассопереноса при зажигании частицы ОБУТ в среде окислителя [163]: 1 – исходная ОБУТ; 2 – обезвоженный ОБУТ

Видеограммы проведенных экспериментов, регистрация основных параметров исследуемых процессов позволили сформулировать наиболее общую модель тепломассопереноса в условиях фазовых превращений и химического реагирования для системы «капля КЖТ – поток окислителя». По аналогии с постановками задач [151, 153] сформулирована система уравнений, описывающая процессы теплопереноса и физико – химических превращений на поверхности частицы ОБУТ (Рисунок 4.2.1.1), может быть сформулирована в виде:

– уравнение энергии для исходной (водо – и нефтенасыщенной) части топлива:

$$C_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \right], \quad (4.2.1.1)$$

$$t > 0, 0 < r < r_v, T \leq T_v.$$

– уравнение энергии для «обезвоженной» (нефтенасыщенный уголь) части ОБУТ:

$$C_2 \rho_2 \frac{\partial T}{\partial t} + (UC\rho)_s \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda_2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sum_{i=1}^m Q_i W_i; \quad (4.2.1.2)$$

$$t > 0, \quad r_V < r < r_0, \quad T \geq T_V;$$

При постановке задачи принималось, что испарение воды происходит на границе раздела системы «исходное ОВУТ — нефтенасыщенный уголь». Соответственно при $r = r_{eva}$ выполняется граничное условие 4 – го рода с учетом теплового эффекта фазового перехода [163]:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{eva}-0} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{eva}+0} - Q_{eva} W_{eva}; \quad (4.2.1.3)$$

$$T \Big|_{r=r_{eva}-0} = T \Big|_{r=r_{eva}+0} = T_{eva};$$

Массовая скорость испарения и скорость движения фронта испарения воды приняты по аналогии с моделью [151, 163], приведенной в разделе 2.1. Скорость испарения мазута вычислялась из выражения:

$$W_{oe} = 10^{-6} \sqrt{M_o} \cdot P_o^S;$$

Распределение давлений по радиусу частицы рассчитывалось с использованием уравнения фильтрации [163]:

$$\frac{\partial mp}{\partial t} = \frac{\chi}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right); \quad (4.2.1.4)$$

$$t > 0, \quad r_V < r < r_0.$$

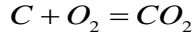
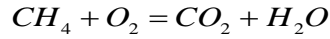
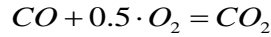
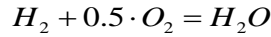
Скорость фильтрации пара вычислялась с использованием математического выражения закона Дарси по аналогии с §2.1. При постановке задачи принималось, что водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с углем (остающимся после завершения процесса влагуудаления). Скорость реакции $C + H_2O = CO + H_2$ вычислялась из математического выражения закона Аррениуса [163].

Начало процесса разложения органической части топлива с выделением летучих в частице рассматривалось при достижении на поверхности последней условия $T_{sur} \geq T_{stign}$ (T_{sur} — температура поверхности, T_{stign} — температура начала термического разложения). Процесс описывался уравнением химической кинетики [163]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = (1 - \eta) k_i \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (4.2.1.5)$$

Продукты термической деструкции, а также химического взаимодействия углеродистого твердого остатка и водяных паров совместно с парами жидкого горючего вдуваются в пристенную область. При этом формируется газовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температуры и концентрации. Период времени от начала

теплового воздействия на частицу до начала интенсивного (с появлением пламени) химического взаимодействия парогазовой смеси с окислителем, считался временем задержки воспламенения. Вблизи поверхности частицы учитывались следующие реакции [163]:



Система уравнений решалась при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях:

$$0 < r < r_0, \quad T(r,0) = T_0, \quad p(r,0) = p_0, \quad \eta(r,0) = \eta_0,$$

$$-\lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \alpha [T_g - T|_{r=r_0}] + \varepsilon \sigma [T_g^4 - T^4|_{r=r_0}] - Q_{eo} W_{eo} + \sum_i Q_i W_i; \quad (4.2.1.6)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (4.2.1.7)$$

$$\left. \frac{\partial p_s}{\partial r} \right|_{r=r_{eva}} = -\frac{\nu}{K_p} u_s|_{r=r_{eva}}; \quad (4.2.1.8)$$

$$p|_{r=r_0} = p_0; \quad (4.2.1.9)$$

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г. Результаты экспериментов показывают, что для всех топливных композиций можно выделить несколько типичных этапов инициирования горения. В зависимости от свойств компонентов продолжительность каждой стадии может существенно различаться, но последовательность сохраняется во всех экспериментах. Рисунок 4.2.1.2 иллюстрирует основные этапы процесса воспламенения частицы ОВУТ.

Установлено, что на первом этапе происходит инертный нагрев водо – и нефтена-сыщенного агломерата. Нагрев инициирует процесс испарение жидкостей горючих (нефть, нефтепродукты и др.) и негорючих (вода). Дальнейшее повышение температуры приводит к термическому разложению органической части угля. Продукты испарения и термического разложения смешиваются с окислителем, и происходит воспламенение парогазовой смеси. Это приводит к увеличению теплового потока к поверхности частиц ОВУТ. Нагрев поверхностного слоя углерода становится более интенсивным, в результате происходит гетероген-

ное зажигание и горение углерода. Фронт испарения движется со стороны набегающего потока окислителя, где коэффициент теплоотдачи на границе «капля топлива – окислитель» (Рисунок 4.2.1.2) максимален [163].

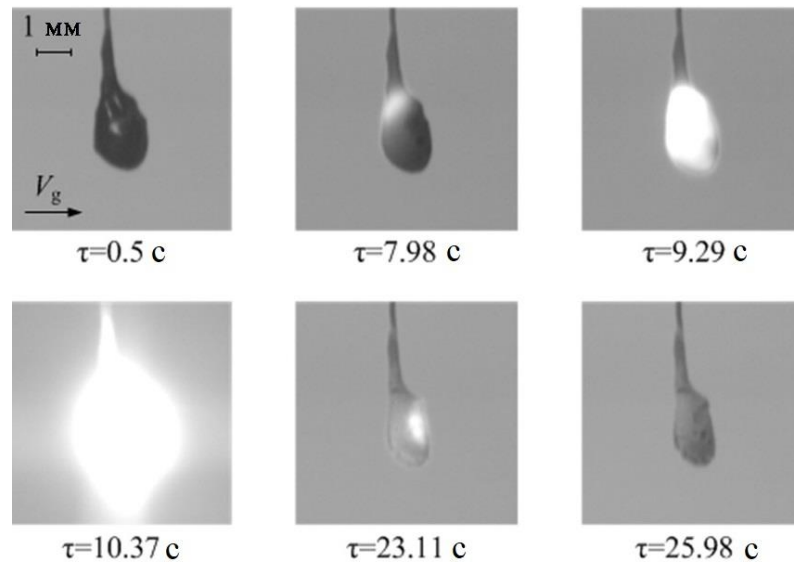


Рисунок 4.2.1.2 — Кадры видеозаписи воспламенения капли ОБУТ (90% фильтрационной корки (влажной) каменного угля + 10% отходов моторного масла) при $Rd \approx 1$ мм, $T_g \approx 900$ К, $V_g \approx 3$ м/с [163]

На Рисунке 4.2.1.3 показаны типичные тренды зависимости T_{cen} от времени. Измерение T_{cen} показывает, что максимальное тепловыделение происходит при гетерогенном горении углерода. Эндотермический фазовый переход (испарение жидких компонентов) не приводит к значительному замедлению роста T_{cen} (на Рисунке 4.2.1.3 показан, монотонный рост T_{cen} до соответствующего экстремума). Это связано с практически одновременным протеканием двух взаимосвязанных процессов: с одной стороны – испарения горючей жидкости и термического разложения угля, с другой – интенсивного разогрева парогазовой смеси и ее газовой фазы. горение. Оценки показали, что времена инертного нагрева угольных частиц в несколько раз меньше, чем этот же параметр капли воды сравнимых размеров. Теплота парообразования воды более чем в десять раз превышает теплоту термического разложения угля. Как следствие, скорости нагрева и термического разложения частиц угля в поверхностном слое капли ОБУТ в несколько раз превышают скорость испарения воды.

Во всех экспериментах наблюдался интенсивный рост температуры T_{cen} после испарения влаги из приповерхностного слоя капли топлива. Конец этого процесса характеризовался изменением яркости поверхности частицы ОБУТ (с глянцевого на матовый). Это соответствует трансформации структуры поверхности частицы (появляются поры). После

завершения горения температура капли температура в центре не изменяется (Рисунок 4.2.1.3). Окончание сгорания органических компонентов угля характеризуется отсутствием каких – либо физико – химических процессов.

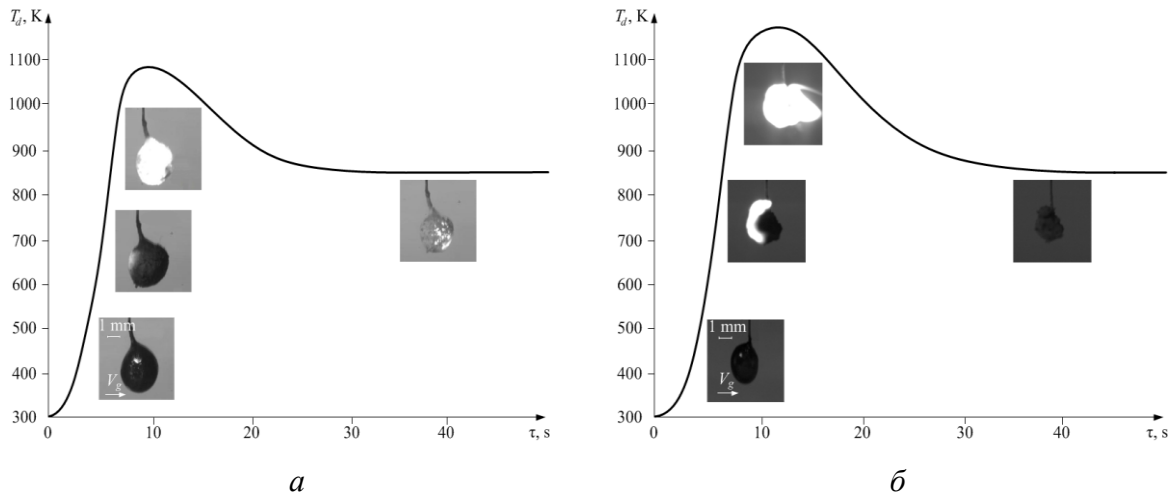


Рисунок 4.2.1.3 — Температуры в центре капли ОБУТ ($R_d \approx 1$ мм) при ее взаимодействии с потоком горячего воздуха ($T_g \approx 900$ К и $V_g \approx 3$ м/с) для различных составов:

a – 95% фильтрационной корки (влажной) каменного угля + 5% отходов моторного масла;

б – 80% фильтровальной корки (влажной) необожженного угля + 20% отходов моторного масла [163]

На Рисунках 4.2.1.4, 4.2.1.5 приведены зависимости температуры в капле ОБУТ (в центре и на поверхности) от времени в процессе ее нагрева до достижения условий устойчивого зажигания. Видно хорошее соотношение экспериментальных данных (Рисунок 4.2.1.4) с теоретическими следствиями по эволюции T_{cen} . В частности, можно отметить достаточно близкие температуры в центре капли ($R = 0$) (Рисунок 4.2.1.4). Различия между экспериментальными и теоретическими значениями T_{cen} можно в основном объяснить тем, что при моделировании решалась осесимметричная задача. Видеограммы экспериментов показали, что образование зоны гетерогенного воспламенения коксового остатка происходит со стороны набегающего потока (на этом участке поверхности капли тепловой поток от газовой среды максимален, а концентрации окислителя максимальны). Как следствие, в эксперименте температура в центре капли ОБУТ (T_{cen}) увеличивалась медленнее, чем при моделировании. Это также объясняет различия между теоретическими и экспериментальными значениями времен задержки зажигания. Определяющую роль в основном играет нелинейная зависимость скоростей фазовых превращений (испарение) и химической реакций (зажигание летучих и углерода кокса) от температуры. Это хорошо видно на Рисунке 4.2.1.5

при анализе зависимости температуры поверхности от времени. Чем больше топливная частица, тем более выраженной становится нелинейность $T_{sur}(t)$.

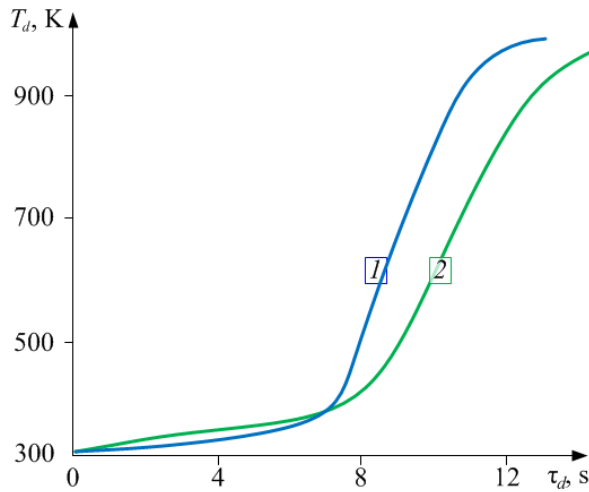


Рисунок 4.2.1.4 – Температура в центре ($R = 0$) капли ОВУТ (95% фильтр – КЕК и 5% отходов моторного масла) (радиус частицы $R_d \approx 1,5$ мм, $T_g \approx 700$ K, $V_g \approx 3$ м/с) [163]:

- 1 – результаты моделирования,
- 2 – экспериментальные данные

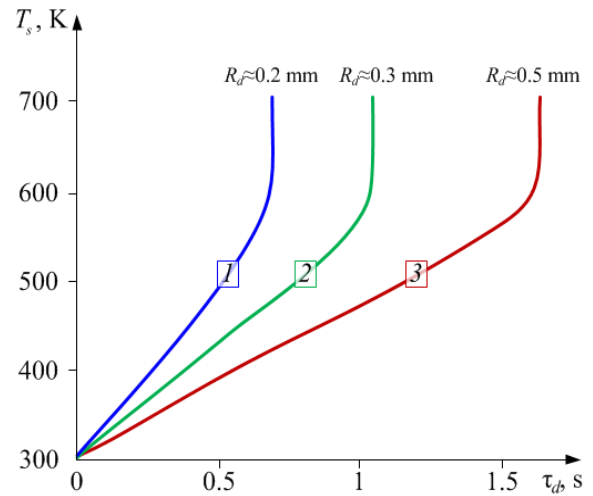


Рисунок 4.2.1.5 — Температура (результаты моделирования) на поверхности капли ОВУТ (95% фильтр – КЕК 5% отходы моторного масла) ($T_g \approx 700$ K и $V_g \approx 3$ м/с):

- 1 – $R_d \approx 0,2$ мм
- 2 – $R_d \approx 0,3$ мм
- 3 – $R_d \approx 0,5$ мм

Установлено хорошее соответствие времен задержки воспламенения топливных композиций, полученных в результате численного моделирования (Рисунок 4.2.1.6) и экспериментов. В то же время различия между экспериментальными и теоретическими значениями времен задержек зажигания, можно объяснить влиянием неоднородного (по поверхности частицы) аэродинамического спектра, натекающего на каплю топлива потока высокотемпературного окислителя. Это часто приводило к диспергированию приповерхностного слоя топлива и уносу мелких угольных частиц совместно с потоком. Вследствие фрагментации приповерхностного слоя топлива существенно возрастает площадь тепло – и массообмена, что приводит к росту скорости нагрева частицы. Также стоит сказать, что формирующиеся в результате диспергации поверхности выступы, грани и углы являются в период нагрева концентраторами тепловых потоков, на которых инициируется термохимические реакции зажигания. При моделировании сложно учесть такие особенности, решение асимметричных задач требует значительного увеличения вычислительных ресурсов. Поэтому на Рисунке 4.2.1.6 экспериментальные и теоретические значения времени t_{ign} различаются,

особенно в области относительно низкотемпературного нагрева. При температуре окислителя (T_g) увеличивается, отклонения t_{ign} снижаются, что связано с более равномерным нагревом поверхности топливной частицы [163].

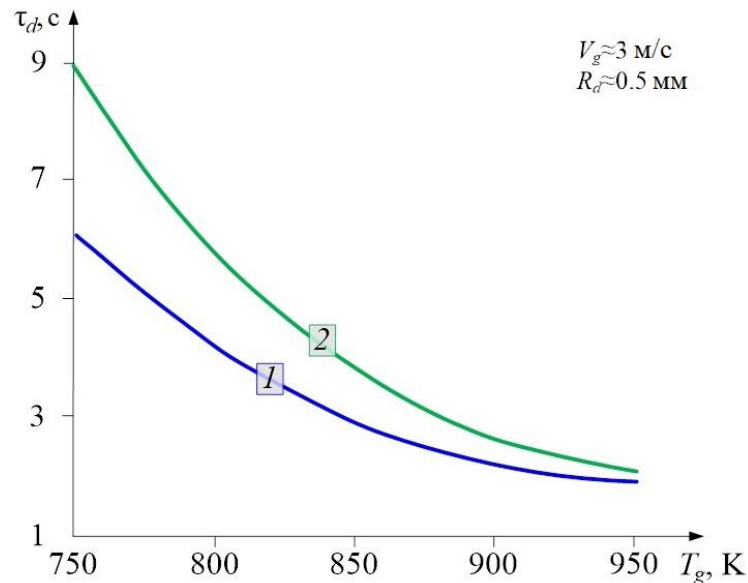


Рисунок 4.2.1.6 — Время задержки воспламенения капли ОВУТ (95% фильтрационной корки (влажной) каменного угля +5% отходов моторного масла) при изменении температуры окислителя [163]:

1 – экспериментальные результаты, 2 – результаты численного моделирования

В целом различия между теоретическими и экспериментальными значениями t_{ign} невелики и характеризуют адекватность, разработанной математической модели. Соответственно, можно обосновано использовать математический аппарат, с целью проведения прогностических оценок временных характеристик процесса воспламенения.

4.2.2 Математическая модель газозаженного зажигания капли органо – водоугольного топлива

Как было показано выше глобальные проблемы эффективной утилизации отходов угле – и нефтепереработки могут быть решены за счет использования последних в качестве основных горючих компонентов органоугольных топлив (ОВУТ). Очевидны экономические и экологические преимущества последних по сравнению с однородным углем. Также при этом установлена (по результатам [433]) более высокая пожаровзрывобезопасности ОВУТ. Но разработанные (приведенные в разделе 4.2.1) прогностические модели зажигания капли суспензий ОВУТ на основе компонентов с существенно отличающимися

свойствами (зольностью, влажностью, содержанием летучих, теплотой сгорания и др.) дают достоверный (с малыми (не более $3 - x \sigma$) отклонениями от экспериментальных значений) прогностический результат времен задержки воспламенения в небольших диапазонах температур окислителя и характерных размеров частиц топлива. Также стоит сказать, что приведенная выше (раздел 4.2.1) математическая модель процесса воспламенения хорошо описывает процессы зажигания частицы топлива в условиях интенсивного (с скоростями не менее 3 м/с) обтекания последней потоком высокотемпературного окислителя. В условиях же относительно низких скоростей витания на процесс зажигания более значимое влияние оказывает диффузия газообразных продуктов пиролиза во внешнюю газовую среду.

Также стоит сказать, что в математической модели, приведенной в разделе 4.2.1 процесс испарения горючей жидкости рассматривался в рамках допущений о фиксировании фронта испарения на поверхности топливной частицы. В реальной практике жидкое горючее испаряется одновременно с внутриводной влажностью. При этом массовые скорости испарения воды и жидкой горючей компоненты существенно отличаются. В результате асимптотики фазовых переходов жидких компонентов топлива (вода и нефть) также различны. Математическая модель § 4.2.1 этого не учитывает.

По вышеприведенным причинам целью этого параграфа диссертации является создание прогностической математической модели зажигания капли органо – водоугольного топлива, описывающая основные процессы тепло – массообмена, фазовых превращений и химического реагирования в рассматриваемой системе «частица топлива – высокотемпературный газ».

В качестве твердых горючих компонентов ОБУТ использовались угли разной степени метаморфизма и КЕК (отход углеобогащения). Основные теплофизические, термохимические и петрографические свойства твердых компонентов топлива приведены в [155] (приложение А). В качестве жидких горючих компонентов использовались типичные промышленные отходы, мазут и другие горючие жидкости, наименования и свойства которых приведены в [155]. Эксперименты проводились с тремя видами воды: водопроводная, технологическая и дистиллированная. В работе [155] обосновано, что свойства воды незначительно влияют на характеристики зажигания ОБУТ (особенно при высоких температурах).

В топливные суспензии добавлялся пластификатор «Неолас» для предотвращения выпадения угля в осадок ОБУТ на твердый и жидкий компоненты (в течение недели). Во всех топливных суспензиях относительные массовые концентрации: уголь (или отход углеобогащения в сухом состоянии) 40–60%; вода 40–60%; горючая жидкость 0–20%; пластификатор 0.5 %.

Экспериментальные исследования процессов зажигания и горения одиночных капель Био – ВУТ проводились на стенде, который по своему устройству и методам регистрации характеристик процессов зажигания аналогичен установке, описанной выше в разделе 2.1. На основании анализа и обобщения результатов экспериментального исследования разработана модель взаимодействия капли ОВУТ с потоком разогретого воздуха, которая описывает взаимосвязанные процессы тепломассопереноса, фазовых превращений (испарение жидкого горючего компонента и воды) и химического реагирования (термическое разложение, выход летучих, взаимодействие водяных паров и углерода, газофазное воспламенение продуктов пиролиза и паров горючего) топлива с окислителем.

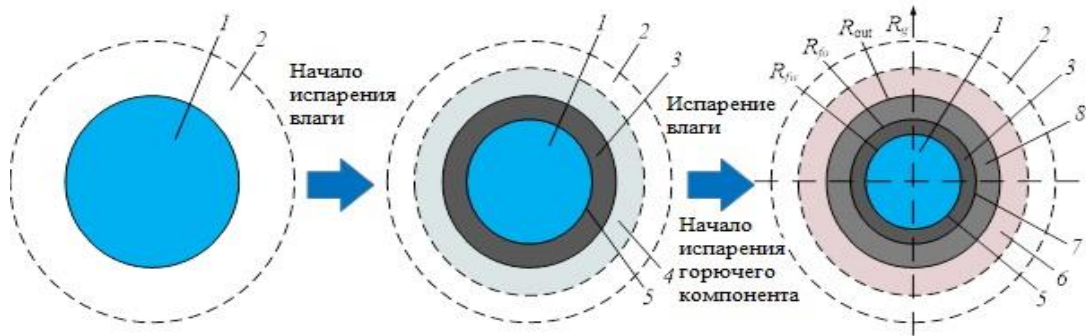


Рисунок 4.2.2.1 — Схема области решения задачи [155]:

1 – исходное топливо, 2 – разогретый воздух, 3 – смесь угля и жидкого горючего компонента, 4 – область диффузии водяных паров, 5 – фронт испарения воды, 6 – область газофазного зажигания, 7 – фронт испарения горючей жидкости, 8 – сухой уголь

Предполагалась следующая схема процесса (Рисунок 4.2.2.1). В начальный момент времени капля ОВУТ вводится в поток разогретого воздуха и нагревается за счет конвекции и излучения. В результате интенсивного нагрева инициируется процесс испарения жидкого горючего компонента и воды. Скорости протекания этих процессов разные ($u_{fw} > u_{fo}$), поэтому два фронта испарения одновременно перемещаются от поверхности капли топлива в глубинные слои. В результате испарения жидкости в приповерхностном слое капли формируется пористый угольный каркас с высоким термическим сопротивлением. Водяные пары фильтруются от соответствующего фронта испарения в направлении поверхности капли через слой пористого углерода и вступают в термохимическое взаимодействие с ним. Прогрев твердого остатка после испарения жидкости инициирует термическое разложение органической части угля и выход летучих. Пары горючей жидкости и газообразные продукты термического разложения угля формируют горючую газовую смесь в окрестности капли топлива, которая зажигается при достижении критических значений температур и концентраций горючего. Стоит отметить, что состав горючей газовой смеси зависит от множества

факторов, например, от типа и характеристик угля и жидкого горючего компонента, а также их концентрации в составе ОБУТ [155].

Математическая модель исследуемого процесса описана системой дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями. В процессе нагрева капли в ее структуре можно условно выделить три области (поз. 1, 3, 8 на Рисунке 4.2.2.1): область исходного топлива (смесь угля, горючей жидкости и воды), смесь угля и жидкого горючего компонента, сухой уголь. Уравнение энергии описывает изменение температуры в такой неоднородной системе в процессе нагрева. Также учитывается испарение воды и жидкого горючего компонента, термическое разложение угля, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода, а также движение водяного пара и продуктов термического разложения через пористый углеродный каркас:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} + C_{gm} \rho_{gm} U_{gm} \frac{\partial T}{\partial R} \theta(R - R_{ew}) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial R} \right] - \sum_{j=1}^2 \frac{Q_j W_j}{h_d} \delta(R_j) - \sum_{i=1}^2 Q_i W_i; \quad (4.2.2.1)$$

$$\text{где } \sum_{i=1}^2 Q_i W_i = Q_{c \rightarrow \text{vol}} W_{c \rightarrow \text{vol}} + Q_{C+H_2O} W_{C+H_2O};$$

$$\sum_{j=1}^2 \frac{Q_j W_j}{h_d} \delta(R_j) = \frac{Q_{ew} W_{ew}}{h_d} \delta(R_{ew}) + \frac{Q_{eo} W_{eo}}{h_d} \delta(R_{eo});$$

Скорость испарения воды вычислялась по формуле [128]:

$$W_{ew} = W_f \exp \left(\frac{Q_{ew} \mu (T_{ew} - T_f)}{R_t T_f T_{ew}} \right); \quad (4.2.2.2)$$

Массовая скорость испарения жидкого горючего компонента [316]:

$$W_{eo} = W_{eo}^0 \exp \left(- \frac{Q_{eo}}{R_t T} \right); \quad (4.2.2.3)$$

Уравнение энергии описывает изменение температуры в газовой среде в окрестности капли ОБУТ [155]:

$$C_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial \tau} = \frac{\lambda_g}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial T_g}{\partial R} \right] + \sum_{i=1}^4 Q_i W_i, \quad (4.2.2.4)$$

$$\sum_{i=1}^4 Q_i W_i = Q_{CH_4+O_2} W_{CH_4+O_2} + Q_{CO+O_2} W_{CO+O_2} + Q_{H_2+O_2} W_{H_2+O_2} + Q_{C_8H_{18}+O_2} W_{C_8H_{18}+O_2}.$$

На границе «капля ОБУТ – газ» заданы условия идеального теплового контакта при учете экзотермического эффекта реакции взаимодействия углерода с кислородом воздуха:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial R} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial R} + Q_{C+O_2} W_{C+O_2} + \sigma \varepsilon (T_g^4 - T_1^4); T_1(R_{out}, \tau) = T_g(R_{out}, \tau) \quad (4.2.2.5)$$

Скорость реакции $C + O_2 = CO_2 + 18.67 \text{ MJ/kg}$ вычислялась по закону Аррениуса. Распределение давления по радиусу частицы определялось из уравнения пьезопроводности:

$$\tau > 0, 0 < R < R_{out}, p \geq p_{atm};$$

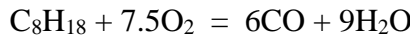
$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = \frac{\chi}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial p}{\partial R} \right) - \frac{1}{mZ\rho_{gm}} \sum_{i=1}^2 \frac{f_i}{s}; \quad (4.2.2.6)$$

$$\sum_{i=1}^2 f_i = W_{c \rightarrow vol} + W_{C+H_2O \rightarrow CO+H_2} + W_{eo} \delta(R_{eo}).$$

Скорость фильтрации парогазовой смеси определялась из дифференциального выражения закона Дарси. Водяной пар вступает в эндотермическое взаимодействие с углеродом. Скорость реакции $C + H_2O = CO + H_2 - 118.49 \text{ MJ/kg}$ из закона Аррениуса. Процесс термического разложения угля описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = (1 - \eta) k_{c \rightarrow vol} \exp \left(-\frac{E_{c \rightarrow vol}}{R_g T} \right). \quad (4.2.2.7)$$

Принято, что в газовой среде в окрестности капли ОВУТ описывалось протекание следующих химических реакций [151, 155]. При зажигании паров жидкого горючего компонента предполагалась, что среди большого числа химических реакций [434], доминирующей является следующая реакция с наибольшим тепловыделением [155]:



Концентрации горючих компонентов (H_2 , CO , C_6H_{18} и CH_4) в окрестности капли ОВУТ вычислялись при решении уравнения диффузии для соответствующего компонента:

$$\rho_g \frac{\partial c_i}{\partial \tau} = \frac{D_i \rho_g}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial c_i}{\partial R} \right] - W_i. \quad (4.2.2.8)$$

Концентрации водяных паров и выделяющегося при термическом разложении угля диоксида углерода вычислялись при решении уравнения диффузии:

$$\rho_g \frac{\partial c_i}{\partial \tau} = \frac{D_i \rho_g}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial c_i}{\partial R} \right]. \quad (4.2.2.9)$$

Для системы уравнений заданы следующие начальные и граничные условия:

$$0 < R < R_{out}, T(R, 0) = T_0 = 298 \text{ К}, p(R, 0) = p_{atm}, \eta(R, 0) = \eta_0; \quad (4.2.2.10)$$

$$R_{out} < R < R_g, T(R, 0) = T_g, c_i(R, 0) = 0 \quad (4.2.2.11)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial R} \right|_{R=0} = 0; \quad (4.2.2.12)$$

$$p|_{R=R_{out}} = p_{atm}; \quad (4.2.2.14)$$

$$\left. \frac{\partial c_i}{\partial R} \right|_{R=R_{out}} = \frac{W_i R_{out}}{\rho_g D_i}; \quad (4.2.2.16)$$

$$\left. \frac{\partial^2 c_4}{\partial R^2} \right|_{R=R_g} = 0; \quad (4.2.2.18)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial R} \right|_{R=R_{ew}} = -\frac{v}{K_p} U_{gm}(R_{ew}, \tau); \quad (4.2.2.14)$$

$$\left. \frac{\partial^2 T_g}{\partial R^2} \right|_{R=R_g} = 0; \quad (4.2.2.13)$$

$$\left. \frac{\partial c_4}{\partial R} \right|_{R=R_{out}} = \frac{W_{ew} R_0}{\rho_g D_{ew}}; \quad (4.2.2.15)$$

$$\left. \frac{\partial^2 c_i}{\partial R^2} \right|_{R=R_g} = 0; \quad (4.2.2.17)$$

Теплопроводность, теплоемкость и плотность исходного топлива (смесь угля, горючей жидкости и воды), смеси угля и жидкого горючего компонента, сухого угля рассчитывались с учетом объемных долей компонентов:

$$\lambda_1 = \varphi_4 \lambda_4 + \varphi_5 \lambda_5 + \varphi_6 \lambda_6; C_1 = \varphi_4 C_4 + \varphi_5 C_5 + \varphi_6 C_6; \rho_1 = \varphi_4 \rho_4 + \varphi_5 \rho_5 + \varphi_6 \rho_6; \quad (4.2.2.20)$$

$$\lambda_2 = \varphi_5 \lambda_5 + \varphi_6 \lambda_6 + (1 - \varphi_4) \lambda_7; C_2 = \varphi_5 C_5 + \varphi_6 C_6 + (1 - \varphi_4) C_7; \rho_2 = \varphi_5 \rho_5 + \varphi_6 \rho_6 + (1 - \varphi_4) \rho_7; \quad (4.2.2.21)$$

$$\lambda_3 = \varphi_5 \lambda_5 + (1 - \varphi_4 - \varphi_6) \lambda_7; C_3 = \varphi_5 C_5 + (1 - \varphi_4 - \varphi_6) C_7; \rho_3 = \varphi_5 \rho_5 + (1 - \varphi_4 - \varphi_6) \rho_7. \quad (4.2.2.23)$$

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г. На Рисунке 4.2.2.2 приведены кадры видеозаписей с иллюстрацией типичных закономерностей процессов термической подготовки и зажигания ОВУТ. Выделены три режима зажигания топлива: стадийный режим с медленным прогревом – «тление»; режим интенсивного газовыделения при кипении жидких компонентов топлива – «кипение»; режим газофазного зажигания и горения – «факельный».

В большинстве случаев горение ОВУТ происходило в режиме тления или в факельном режиме. Режим кипения был установлен только для двух топливных композиций, приготовленных на основе кеков «К» или «Г» и отработанного турбинного масла. Для данных составов последовательно протекали всех три перечисленные режимы. Режим кипения сопровождается интенсивным газовыделением, в результате чего на поверхности капли отчетливо наблюдаются динамично меняющиеся выступы и впадины. Этот процесс характерен для достаточно узкого диапазона варьирования температуры источника нагрева и протекает в течение достаточно короткого интервала времени.

Реализация режима кипения объясняется свойствами горючей жидкости, входящей в состав топливной композиции. Горючие жидкости, использованные в качестве компонен-

тов ОБУТ, содержат разные функциональные группы, определяющие их химические и физические свойства. Для процессов горения большое значение имеют теплофизические и термодимические характеристики топлив. В соответствии с существующими представлениями о горении капель ВУТ и ОБУТ можно отметить одну из стадий, характеризующуюся испарением жидких горючих компонентов топлива.

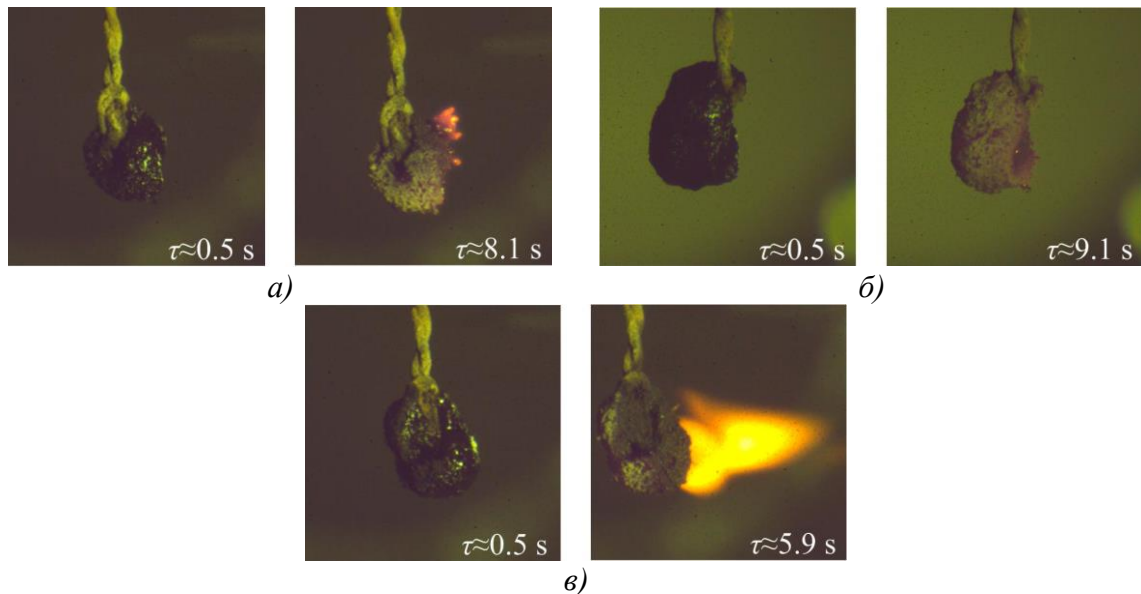


Рисунок 4.2.2.2 — Кадры видеозаписи процесса горения капли, иллюстрирующие типичные режимы горения ОБУТ (КЕК «Г» 80–90%, турбинное масло 10–20%) [155]:

a – прогрев и медленно протекающее гетерогенное горение (при минимальных температурах нагрева);

б – прогрев, вскипание жидкости, гетерогенное горение (при умеренных температурах окислителя и невысокой концентрации жидкого горючего компонента);

в – газофазное горение (концентрация жидкого горючего компонента более 10%)

Это сопровождается интенсивным газовыделением не только с поверхности капли топлива, но и во всем ее объеме. Из – за этого происходит динамическая деформация поверхности капли при относительно стабильной ее форме в момент ввода в поток разогретого воздуха. Таким образом, реализация режима кипения существенно зависит от температуры кипения фракций, входящих в состав жидкого горючего компонента ОБУТ. В свою очередь для составов ОБУТ на основе кеков, полученных при переработке углей более высокой степени метаморфизма (в частности, «СС», «Т») с малым содержанием летучих, характерен, как правило, режим тления при относительно невысоких температурах воздуха и факельный режим при возрастании роли процессов газификации, то есть взаимодействия углерода с водой и выделением паров горючих жидкостей, вспыхивающих в окрестности капли на некотором удалении от ее поверхности.

При обобщении результатов экспериментов установлено, что режим тления реализовывался для составов ОВУТ при температурах потока воздуха 500–630 К, режим кипения – при температурах потока воздуха 600–700 К, факельный режим – при температурах потока воздуха выше 700 К. При этом чем больше концентрация жидкого горючего компонента, тем более выражено реализовывался факельный режим горения.

Можно отметить, что зажигание капель ОВУТ всегда происходило на участке внешней поверхности, существенно меньшей по сравнению с площадью горения топлива. Пламенное горение осуществлялось в относительно малой окрестности капли. Последнее, скорее всего, обусловлено ориентацией капли относительно направления движения потока воздуха. Зажигание и последующее горение одиночных капель ОВУТ всегда происходило на участке ее поверхности, обращенном к натекающему потоку воздуха. На Рисунке 4.2.2.3 приведены обобщенные установленные экспериментально зависимости времени задержки зажигания от температуры потока воздуха в условиях варьирования состава топлива. Рассмотрено семь разных топливных композиций, отличающихся угольным компонентом.

Хорошо видно, что значения t_{ign} существенно зависят от вида КЕКа, входящего в состав ОВУТ. Отличия по временам задержки зажигания достигают 300%. Полученный результат позволяет сделать вывод, что установленные для одного компонентного состава ОВУТ условия и характеристики зажигания не могут формально использоваться для прогностической оценки t_{ign} органо – водоугольных топлив на основе другого КЕКа.

Также можно отметить, что наименьшие значения t_{ign} соответствуют (Рисунок 4.2.2.3а) процессу зажигания ОВУТ на основе смеси бурого угля и воды, а не КЕКа, в котором вода преимущественно находится в связанном с углеродом состоянии. В таких ОВУТ при идентичной начальной концентрации воды более интенсивно процесс испарения влаги протекает в составах на основе измельченного угля и свободной (несвязанной) воды. Кроме того, малые времена задержки зажигания топлива на основе бурого угля также обусловлены более высокой его реакционной способностью по сравнению с длиннопламенным углем, который широко распространен в теплоэнергетике в качестве твердого топлива.

По аналогии с исследованием влияния угольного компонента на характеристики зажигания ОВУТ выполнен аналогичный анализ влияния жидких горючих компонентов (Рисунок 4.2.2.3 б) и воды (Рисунок 4.2.2.3 в) на характеристики процесса. Индивидуальные теплофизические и термохимические свойства, температуры кипения и зажигания, скорости испарения жидкой горючей компоненты даже при относительной массовой доли (до 10%) достаточно существенно влияют на времена задержки зажигания (до 45% по времени

t_{ign}). Зависимости $t_{ign} = f(T_g)$ на Рисунке 4.2.2.3 б иллюстрируют необходимость учета индивидуальных свойств жидкого горючего компонента ОВУТ при разработке математических моделей процесса зажигания.

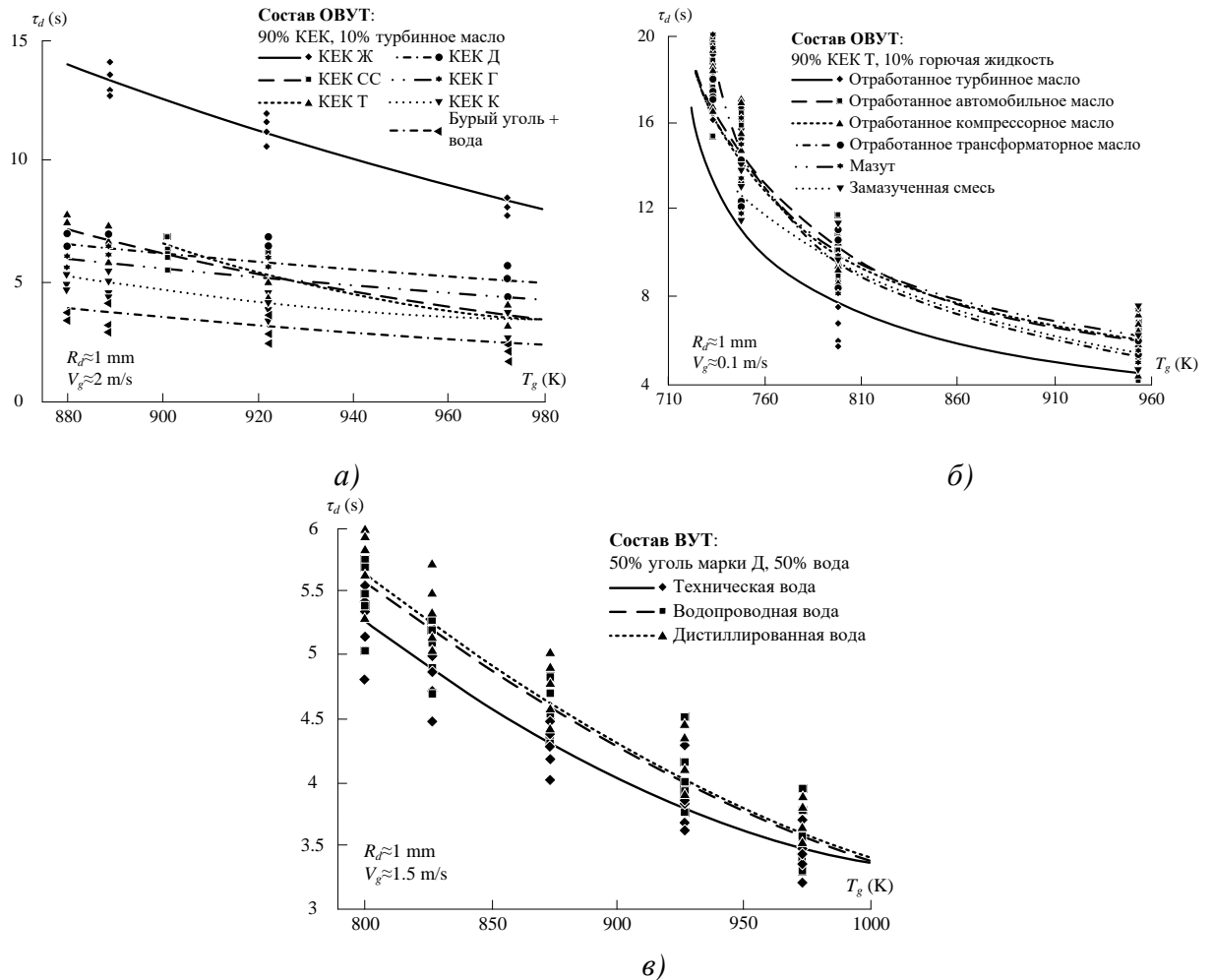


Рисунок 4.2.2.3 — Времена задержки зажигания ОВУТ (гетерогенного зажигания углеродного остатка) при разных угольных (а), жидких горючих (б) и жидких негорючих (в) компонентах [155]

Также полученные результаты (Рисунок 4.2.3.3 б) показывают, что процесс зажигания ОВУТ определяется, в основном, парами жидкого горючего компонента топлива (при идентичных условиях нагрева ее время задержки зажигания меньше по сравнению с временем задержки зажигания угольного компонента). Подтверждением выдвинутой гипотезы является факт изменения значений t_{ign} при варьировании вида жидкого горючего компонента ОВУТ при прочих идентичных условиях. Если бы время задержки зажигания ОВУТ определялось характеристиками воспламенения продуктов термического разложения угля или КЕКа, то при добавлении разных видов масла в состав ОВУТ значение t_{ign} не изменялось или изменялось бы несущественно. Отличие t_{ign} на 30–45% подтверждает, что даже при

массовой доле масла всего 5% именно жидкий горючий компонент определяет характеристики процесса зажигания ОВУТ.

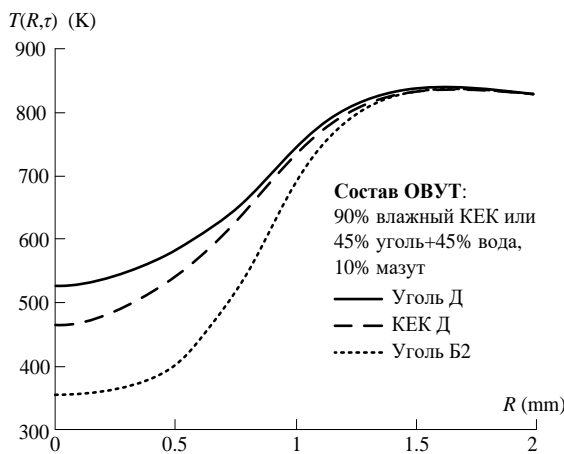
Анализ зависимостей $t_{ign} = f(T_g)$, представленных на Рисунке 4.2.2.3в, позволяет сделать вывод о том, что свойства и элементный состав воды, используемой для приготовления ОВУТ, влияют менее 10% на изменение t_{ign} . Как правило, техническая вода может содержать примеси жидких или мелкодисперсных твердых горючих веществ, которые повышают реакционную способность топлива. Поэтому какая – либо дополнительная очистка или дистилляция воды ведут к увеличению времени задержки зажигания ОВУТ до 10%.

Теоретическое исследование процесса зажигания ОВУТ в рамках разработанной математической модели связано с использованием в качестве исходных данных теплофизических характеристик каждого компонента топлива и кинетических констант процессов химического реагирования. Согласно результатам выполненных экспериментов необходимо учитывать, что процесс горения ОВУТ при нагревании капли потоком разогретого воздуха начинается с зажигания паров жидкого горючего компонента. На следующей стадии зажигаются газообразные продукты термического разложения угольного компонента топлива (КЕК или уголь). Затем происходит воспламенение углеродистого остатка от термического разложения угля или КЕКа в результате интенсивного прогрева за счет энергии, выделившейся в результате выгорания газовой смеси в окрестности капли. Поэтому процесс зажигания ОВУТ условно является трехстадийным. Для каждой стадии характерны свои физические и химические процессы. Скорости процессов химического реагирования описываются аррениусовскими зависимостями. Поэтому интенсивность фазовых и химических превращений характеризуется, как правило, эмпирическими постоянными (энергия активации и предэкспоненциальный множитель). Эти постоянные для подавляющего большинства отходов нефтепереработки или отработанных масел различного назначения к настоящему времени не определены, т.к. эти горючие жидкости широко не использовались в промышленной энергетике для производства энергии. Поэтому математическое моделирование процесса зажигания ОВУТ выполнено на примере топлива, в состав которого в качестве жидкого горючего компонента входит мазут. Его свойства хорошо изучены [435].

На Рисунках 4.2.2.6, 4.2.2.7 приведены основные результаты математического моделирования процесса зажигания типичных составов ОВУТ на основе мазута и трех видов твердого топлива: КЕК угля «Д», угли марки «Д» и «Б2». Расчеты выполнены при следующих исходных данных: $T_0 = 293$ К, $p_{atm} = 101325$ Па, $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8}$ W/(m²·K⁴), $\varepsilon = 0,9$, $R_t = 8.314$ Дж/(моль·К), $\mu = 0,018$ kg/mole, $m = 0,4$, $Z = 0,9$ 1/Па, $K_p = 10^{-11}$ м², $\nu = 1,22 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

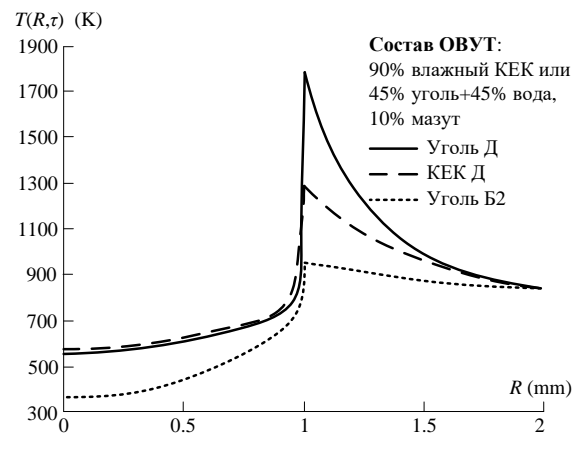
Теплофизические характеристики компонентов системы, состав летучих и кинетические параметры процессов приведены в приложении А [155].

На Рисунке 4.2.2.6 приведены распределения температуры в капле ОВУТ размером $R_d = 1$ мм и ее окрестности в момент зажигания горючей газовой смеси, состоящей из паров жидкого горючего компонента и продуктов пиролиза угля. Установлено, что при отличающихся температурах прогрева каплю ОВУТ разного состава (из – за угольного компонента) температуры газовой смеси в зоне зажигания идентичны. Полученный результат объясняется идентичностью жидких горючих компонентов (мазута) для разных составов ОВУТ, которые в основном определяют характеристики газофазного зажигания топлива. Однако дальнейшее развитие процесса для этих трех составов ОВУТ отличается, когда после выгорания летучих инициируется горение углеродистого остатка (Рисунки 4.2.2.6, 4.2.2.7).



а

Рисунок 4.2.2.6 — Распределение температуры в системе «капля ОВУТ – разогретый воздух» в момент воспламенения летучих (газофазное зажигание)



б

Рисунок 4.2.2.7 — Распределение температуры в системе «частица ОВУТ – газовая среда» в момент воспламенения углеродного остатка (т.е. гетерогенного зажигания)

Температуры в зоне зажигания углеродистого остатка вблизи поверхности капли ОВУТ отличаются на 400–900 К (Рисунок 4.2.2.6, 4.2.2.7) для разных составов. Это обусловлено разными реакционными способностями и тепловыми эффектами реакций окисления угольных компонентов ОВУТ. Бурый уголь наиболее реакционноспособен и загорается при относительно невысоких температурах нагрева. Длиннопламенный уголь начинает реагировать с окислителем при температурах более 1000 К. Анализ рисунков 4.2.2.6, 4.2.2.7 показывает, что на стадии газофазного зажигания, и на стадии зажигания углеродистого

остатка после разложения органической части угля капля ОБУТ на основе бурого угля прогревается на меньшую глубину в течение индукционного периода по сравнению с двумя другими составами топлива.

Установленные изменения во времени температуры на поверхности капель трех рассматривавшихся составов ОБУТ показывают, что газофазное зажигание каждого из них происходит при идентичных температурах на поверхности капли. Это объясняется тем, что основной источник горючих газов на стадии газофазного зажигания у всех трех топлив – это жидкий горючий компонент (мазут). Соответственно, при идентичных условиях нагрева ОБУТ испарение мазута происходит с одинаковыми или достаточно близкими скоростями.

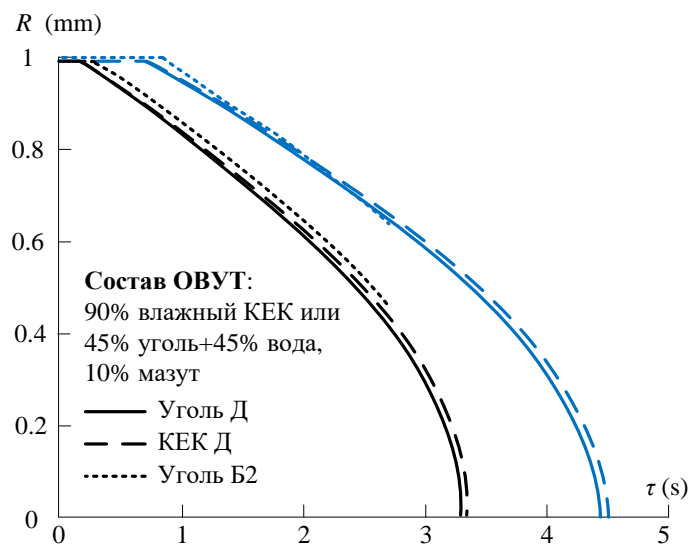


Рисунок 4.2.2.8 — Иллюстрация движения фронтов испарения мазута (кривые черного цвета) и воды (кривые синего цвета) во времени при прогреве и зажигании ОБУТ [155]

Для иллюстрации масштабов влияния процессов испарения жидкого горючего компонента топлива и воды на условия его зажигания на Рисунке 4.2.2.8 приведены координаты локализации фронтов испарения в течение исследуемого процесса для трех рассматриваемых составов ОБУТ. Видно (Рисунок 4.2.2.8), что для разных составов ОБУТ положения фронтов испарения как жидкого горючего компонента, так и воды идентичны. Также следует отметить, что полученные зависимости (Рисунок 4.2.2.8) существенно нелинейно изменяются во времени. Фронт испарения воды движется быстрее по сравнению с фронтом испарения мазута. С течением времени скорость испарения возрастает, как результат возрастают скорости движения фронтов испарения обоих жидких компонентов топлива. Это обусловлено тем, что в процессе термической подготовки и зажигания глубинные слои топ-

лива прогреваются до температур парообразования воды, а потом и мазута. Соответственно, конечный период обезвоживания топлива протекает значительно быстрее, чем на начальном этапе.

Полученные результаты (Рисунок 4.2.2.8) также иллюстрируют, что для капель ОВУТ на основе бурого угля характерны режимы зажигания углеродистого остатка в условиях содержания достаточно большой концентрации мазута и воды в глубинных слоях капли. Можно сделать вывод, что процессы зажигания таких топлив в условиях продолжающегося испарения жидких компонентов будут существенно отличаться от зажигания углеродистого остатка после полного испарения жидких компонентов ОВУТ. В таких условиях фильтрующиеся к поверхности нагрева пары мазута и воды совместно с продуктами пиролиза будут формировать, скорее всего, область в окрестности капли с интенсивным газообменом. Горение топлива в таких условиях (одновременно с газофазным горением) будет протекать более интенсивно по сравнению с горением сухого углеродистого остатка. При горении влажных капель ОВУТ в их структуре формируются большие градиенты температуры. Это может приводить к формированию температурных напряжений, достаточных для диспергирования капли.

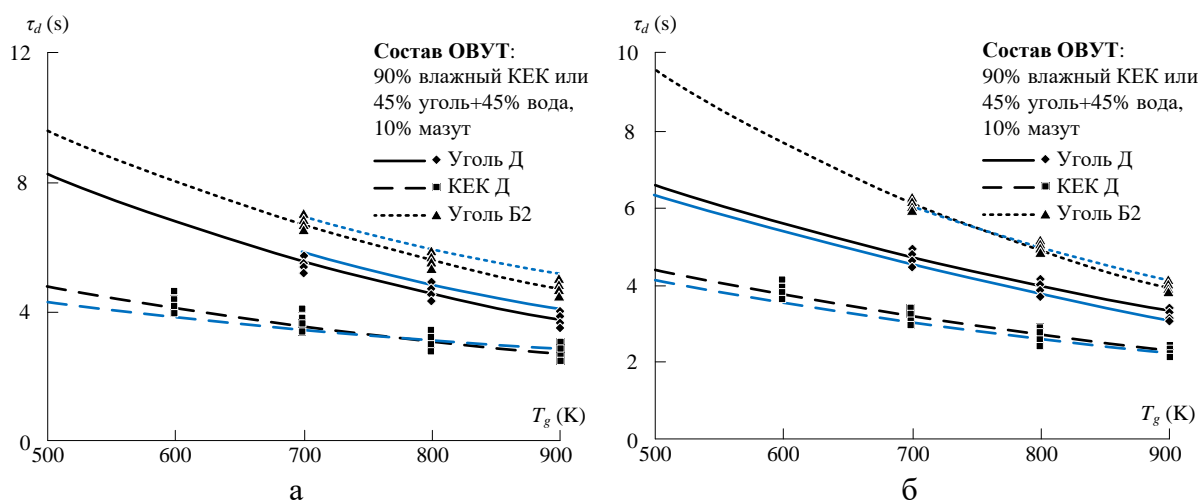


Рисунок 4.2.2.9 — Экспериментальные (кривые черного цвета) и теоретические (кривые синего цвета) зависимости времен задержки зажигания летучих (а) и углеродного остатка (б) при нагреве капель ОВУТ в потоке окислителя от температуры последнего (при $R_d \approx 0.5$ мм, $V_g \approx 5$ м/с) [155]

На Рисунке 4.2.2.9 приведены экспериментальные и полученные в результате численного моделирования зависимости времен задержки газофазного и гетерогенного зажигания трех ОВУТ на основе разных угольных компонентов. Видно (Рисунок 4.2.2.10), что при значениях t_{ign} от 9.5 до 2.5 с в диапазоне изменения T_g от 500 до 900 К отличие времен

задержки зажигания коксового остатка и летучих, образующихся при термическом разложении угля, не превышает 0.3 с как по результатам численного моделирования, так и по экспериментальным данным. Полученный результат можно объяснить следующим. Из – за достаточно длительного этапа прогрева капли ОВУТ в условиях протекания процессов испарения жидких компонентов и термического разложения угля повышается температура капли и газовой смеси, растёт концентрация горючих компонентов. При достижении минимальных значений их концентрации и температуры происходит газофазное зажигание. Возрастает температура газовой смеси в окрестности углеродистого остатка, увеличивается интенсивность его прогрева, происходит зажигание.

4.2.3 Двумерная математическая модель для прогнозирования режимов физико – химических превращений при нагревании капель органоводоугольных топлив

Приведенные выше математические модели зажигания и горения суспензионных топлив не позволяют достоверно прогнозировать характеристики процессов при разных режимах физико – химических превращений, реализация которых зависит от интенсивности подвода энергии к топливу. Это обусловлено тем, что разработанные модели описывают процессы тепло – и массопереноса, протекающие при физико – химических в рамках одномерной постановки задачи зажигания. В результате при проведении прогнозирования времен задержки зажигания не описывается неоднородность полей температур и концентраций в малой окрестности частицы. Поэтому целью данной параграфа диссертации является разработка на основании результатов экспериментальных исследований прогностической математической модели для установления режимов физико – химических превращений при разной интенсивности нагрева капель перспективных ОВУТ из разных компонентов.

Исследования закономерностей и характеристик процессов зажигания и горения выполнены для нескольких составов ОВУТ (Приложение А). Для приготовления топливных композиций использовалось 5 разных фильтрационных КЕКов: КЕК коксующегося каменного угля (КЕК – К); КЕК длиннопламенного каменного угля (КЕК – Д); КЕК газового каменного угля (КЕК – Г); КЕК слабоспекающегося каменного угля (КЕК – СС); КЕК тощего каменного угля (КЕК – Т). Для достоверного контроля массового содержания твердых и жидких компонентов ОВУТ все образцы КЕКа высушивали при температуре около 376 К до полного испарения влаги. Основные характеристики 5 образцов КЕКов (на сухую массу) в состоянии приведены в таблицах приложения А [168].

Экспериментальные исследования процессов зажигания и горения одиночных капель ОБУТ выполнены с использованием стенда, который по своим методам регистрации и обработки экспериментально установленных характеристик зажигания аналогичен установке, описанной в разделе 2.2. Основной частью стенда является муфельная трубчатая печь. В керамической трубке печи скорость движения воздуха вследствие естественной конвекции составляет не более 0.2 м/с. Условия тепло – и массопереноса, воспроизводимые с помощью стенда (Рисунок 4.2.3.1), соответствуют реальным топкам, где капли топлива малых (менее 1 мм) размеров переносятся со скоростями, незначительно отличающимися от скоростей несущей каплю среды (горячего воздуха или топочных газов). Соответственно, на практике относительные скорости движения газов, обтекающих каплю, очень малы (менее 0.5 м/с). Внутренний диаметр керамической трубки муфельной печи 0.04 м, длина 0.45 м; диапазон варьирования температуры 300–1500 К; температура регулируется автоматически по сигналу встроенной термопары типа S. При проведении экспериментов в сечении, соответствующем расположению капли топлива, контролировалась температура газовой среды T_g термопарой Тип – К (диапазон измеряемых температур 273–1373 К, достоверность измерений при температурах более 700 К составляет $\pm 0.004(T-273)$, инерционность не более 3 с).

Введение капель топлива в рабочую зону осуществлялось при помощи координатного устройства (Рисунок 4.2.3.1), скорость перемещения которого не превышала 0.5 м/с для предотвращения деформации и соскальзывания капли с держателя при движении. Процессы, протекающие при нагревании, капли топлива, регистрировались высокоскоростной видеокамерой Phantom Miro M310 (скорость съемки более 3200 кадров в секунду при максимальном разрешении 1280×800 пикселей). Температура варьировалась в диапазоне $T_g = 600–1300$ К, начальный радиус капли в разных экспериментах был идентичен $R_d = 0.5$ мм. Также в ходе эксперимента регистрировались следующие параметры: температура капли (T_{cen}), время задержки зажигания (t_{ign}). Значения t_{ign} определялись в результате совместного анализа графика эволюции T_{cen} при протекании процессов зажигания и горения, а также графика эволюции светимости капли в рамках алгоритма программного обеспечения Tema Automotive. Систематические погрешности определения времен t_{ign} не превышали 3%. Случайные погрешности для серий из 5–7 экспериментов, проведенных при идентичных условиях, составляли менее 10%.

На основе результатов выполненной высокоскоростной видеорегистрации для исследованных составов ОБУТ установлены *три режима* физико – химических превращений

при нагревании капли: *первый* – интенсивное термическое разложение угольного компонента после испарения жидких компонентов; *второй* – интенсивная газификация угольного компонента в условиях кипения жидких компонентов с последующим гетерогенным горением твердого остатка; *третий* – зажигание газовой смеси в окрестности капли топлива и инициирование гетерогенного горения твердого остатка. Соответствующие кадры приведены на Рисунке 4.2.3.2.

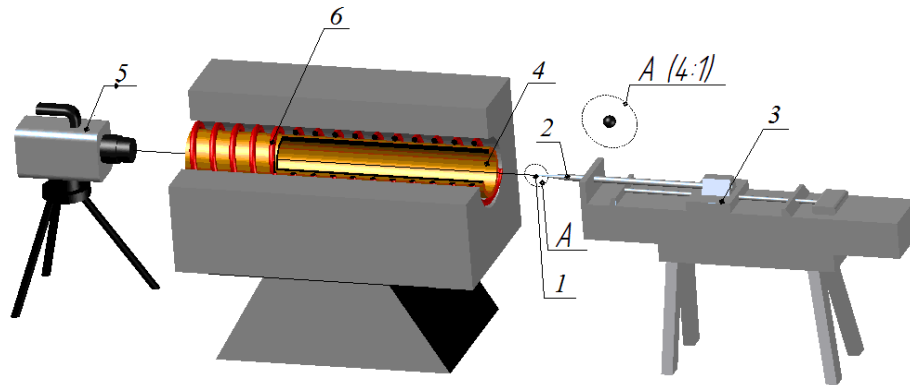


Рисунок 4.2.3.1 — Схема экспериментального стенда [172]:

1 – топливная частица; 2 – металлический держатель; 3 – координатное устройство; 4 – порая керамическая трубка; 5 – скоростная видеокамера; 6 – электронагреватель

В ходе реализации первого режима при относительно невысоких температурах окружающей среды происходит испарение жидких компонентов ОВУТ (вода и масло). Твердый остаток представляет собой пористый каркас из мелкодисперсных частиц угля. При прогреве угля происходит его термическое разложение. Процесс развивается достаточно медленно. Поэтому концентрация горючей газовой смеси в окрестности капли и температура окружающей среды недостаточно высоки для реализации газофазного зажигания продуктов испарения или гетерогенного зажигания углеродистого остатка.

Второй режим протекает в области более высоких температур окружающей среды. Он характеризуется интенсивным прогревом приповерхностного слоя капли топлива, сопровождающимся кипением жидких компонентов. Это ведет к изменению структуры поверхности капли. Она становится неоднородной вследствие всхлопывания пузырьков при кипении. Углеродистый остаток после завершения эндотермических процессов испарения и термического разложения компонентов ОВУТ прогревается. Температура окружающей среды достаточна для реализации гетерогенного зажигания. Последующий процесс горения протекает до полного выгорания твердого компонента ОВУТ.

Третий режим протекает в области относительно высоких температур окружающей среды. При интенсивном нагреве капли быстро прогревается тонкий приповерхностный слой. Продукты испарения горючей жидкости и термического разложения угля поступают в высокотемпературную среду окислителя. Происходит газофазное зажигание. Это ведет к выделению дополнительной энергии и прогреву углеродистого каркаса. Реализуется гетерогенное зажигание. На Рисунке 4.2.3.3 представлены результаты обработки данных экспериментальных исследований, характеризующие температурные диапазоны окружающей среды, соответствующие выделенным в экспериментах режимам физико – химических превращений типичных ОВУТ.

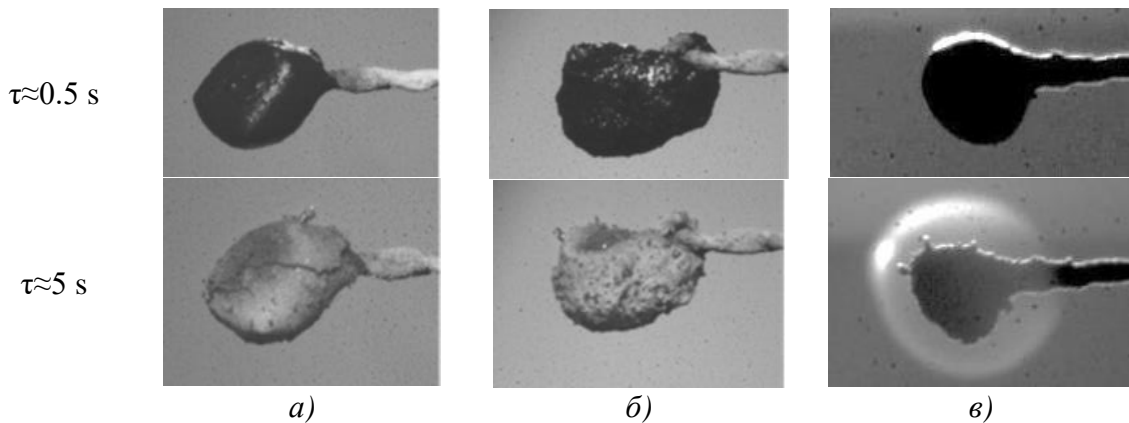


Рисунок 4.2.3.2 — Кадры видеogramм процесса нагревания капли ОВУТ No. 3 (соотношение в системе «КЕК – К/вода/турбинное масло» составляло 45/45/10) при реализации разных режимов физико – химических превращений [172]:

a – первый, *б* – второй, *в* – третий

Анализ результатов (Рисунки 4.2.3.2 и 4.2.3.3) позволяет сделать вывод, что при нагревании капель ОВУТ явно выражены режим интенсивного термического разложения угольного компонента после испарения жидких компонентов топлива и режим зажигания газовой смеси в окрестности капли топлива, сопровождающийся инициированием гетерогенного горения твердого остатка. Режим интенсивной газификации угольного компонента в условиях кипения жидких компонентов был установлен в узком диапазоне температур окружающей среды. Этот режим сопровождается интенсивным газовыделением, в результате чего на поверхности капли наблюдаются динамично меняющиеся по форме выступы и впадины. Данный процесс протекает в течение достаточно короткого интервала времени.

Реализация промежуточного режима в значительной степени объясняется свойствами нефтепродукта, входящего в состав ОВУТ. Мазут и отработанное турбинное масло содержат различные функциональные группы, определяющие их химические и физические

свойства. Для процессов горения большое значение имеют теплотехнические характеристики топлив. В соответствии с существующими представлениями о горении капель ВУТ и ОВУТ можно отметить одну из стадий, характеризующуюся испарением жидких горючих компонентов топлива.

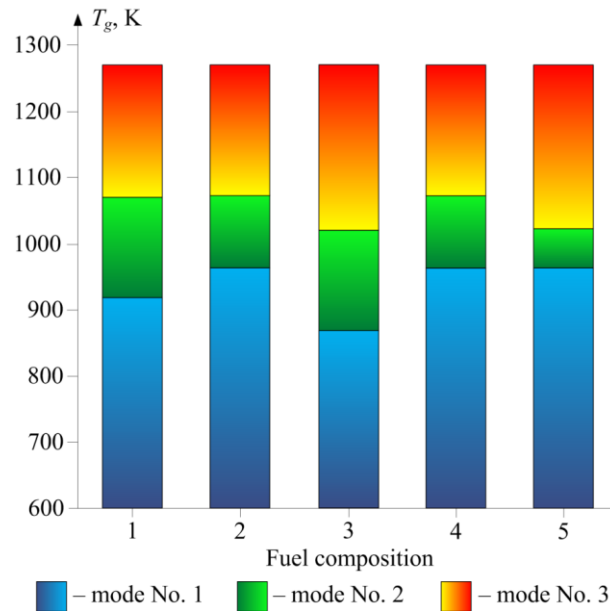


Рисунок 4.2.3.3 — Диапазоны температур для разных режимов физико – химических превращений при нагревании капель ОВУТ (соотношение в системе «КЕК/вода/турбинное масло» 45/45/10) [172]:

1 – ОВУТ №1 (КЕК – Т); 2 – ОВУТ №2 (КЕК – СС); 3 – ОВУТ №3 (КЕК – К); 4 – ОВУТ №4 (КЕК – Г); 5 – ОВУТ №5 (КЕК – Д)

Предельные (минимальные) температуры реализации второго режима физико – химических превращений составляют от 870 до 950 К (Рисунок 4.2.3.3). В процессе прогрева суспензий, приготовленных на основе КЕКов Г и К, протекает процесс выхода летучих. Этот процесс сопровождается интенсивным газовыделением как в приповерхностном слое, так и в глубине капли. При этом происходит деформация поверхности капли при сохранении сравнительно стабильной формы относительно момента ввода в разогретую газовую среду. Таким образом, на реализацию второго режима существенно влияют содержание летучих веществ твердой горючей компоненты ОВУТ, а также значения температур кипения жидких горючих компонентов топлива. В КЕКах, полученных при переработке углей более высокой степени метаморфизма (в частности, СС, Т), содержится существенно меньше летучих и для них характерна более высокая зольность. Это обуславливает протекание пер-

вого и третьего режимов при их нагревании. В последнем случае интенсифицируются процессы газификации, то есть взаимодействие углерода с водой и выделением паров горючих жидкостей, воспламеняющихся вблизи капли с отчетливо наблюдаемой отрывной зоной.

При сравнении КЕКов К и Д можно отметить их достаточно близкие свойства и содержание основных элементов. Однако для КЕКа Д не характерно протекание второго режима. Это, по – видимому, объясняется различным содержанием массовой доли минеральных компонентов в исходных веществах (более чем в 1,5 раза на сухую массу). Можно отметить общее снижение предельных температур зажигания капель топливных композиций, содержащих нефтепродукты, по сравнению с топливами без добавления горючих жидкостей. Наличие компонентов с более низкими температурами кипения и зажигания способствует реализации низкотемпературного газофазного и гетерогенного горения (относительно традиционных процессов горения водоугольного топлива). При сопоставлении экспериментальных данных снижение предельных температур зажигания составляет 70–90 К. Причем чем выше степень метаморфизма угля, из которого получен соответствующий КЕК, тем более заметно снижение пороговой температуры зажигания при добавлении нефтепродуктов.

На интегральные характеристики зажигания влияет также концентрация нефтепродуктов в ОВУТ. Например, для составов с кеком Д при увеличении массовой доли мазута до 15% происходит заметное снижение предельной температуры зажигания с одновременным изменением временных и температурных диапазонов соответствующих режимов горения. При добавлении 5% мазута в топливную композицию нижняя граница температурного диапазона режима тления резко смещается в сторону увеличения (на 100–110 К). При этом диапазон температур третьего режима изменяется незначительно (на 20–30 К). С увеличением концентрации мазута в смеси происходит сужение температурного диапазона второго режима физико – химических превращений и расширение температурного диапазона третьего режима.

Результаты выполненного экспериментального исследования стали основой для разработки математической модели физико – химических превращений при нагревании капли ОВУТ. Эта модель по структуре дифференциальных уравнений и граничным условиям аналогична постановке задачи, приведенной в разделе 4.2.2. Отличия заключаются в описании теплофизических и термохимических процессов в рамках двумерной постановки задачи, а также учитывается вдув смеси газообразных продуктов термического разложения угля и жидкого горючего совместно с парами воды и горючей жидкости в пограничный слой ча-

стицы. Предполагалась реализация схемы процесса (Рисунок 4.2.3.4), аналогичной условиям проведения эксперимента. Критерием зажигания является одновременное выполнение следующих условий:

1. Теплота, выделившаяся в результате экзотермического процесса, превышает теплоту, подведенную к капле топлива.
2. Температура в зоне ведущей реакции окисления превышает температуру окружающей среды.

При описании процессов, протекающих в течение индукционного периода в структуре капли ОБУТ, условно можно выделить *три зоны*:

первая (позиция 1 на Рисунке 4.2.3.4) – топливо в исходном состоянии;

вторая (позиция 3) – смесь кека и масла;

третья (позиция 8) – сухой уголь.



Рисунок 4.2.3.4 — Схема области решения задачи зажигания [172]: 1 – исходное топливо, 2 – разогретый воздух, 3 – смесь КЕКа и масла, 4 – область диффузии горючих газов и водяных паров, 5 – фронт испарения воды, 6 – область газофазного зажигания, 7 – фронт испарения масла, 8 – сухой уголь

Теплопередачу в такой гетерогенной системе описывает уравнение энергии, учитывающее испарение жидких компонентов топлива, термическое разложение угля, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода, а также движение паров воды и масла совместно с движением летучих в слое пористого углерода:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} + C_{gm} \rho_{gm} \left[U_{gm} \frac{\partial T}{\partial R} + V_{gm} \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right] \Phi(\xi_{ew}) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial R} \right] + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\sin \theta}{R} \lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right] - \sum_{j=1}^2 \frac{Q_j W_j}{h_d} \delta(\xi_e) - \sum_{i=1}^3 Q_i W_i \Phi(\xi_{ew}) ; \quad (4.2.3.1)$$

$$\sum_{i=1}^3 Q_i W_i \Phi(\xi_{ew}) = (Q_{c \rightarrow vol} W_{c \rightarrow vol} + Q_{C+H_2O} W_{C+H_2O} + Q_{o \rightarrow vol} W_{o \rightarrow vol}) \Phi(\xi_{ew}) ;$$

$$\sum_{j=1}^2 \frac{Q_j W_j}{h_d} \delta(\xi_e) = \frac{Q_{ew} W_{ew}}{h_d} \delta(\xi_{ew}) + \frac{Q_{eo} W_{eo}}{h_d} \delta(\xi_{eo}).$$

Скорость испарения воды [128]:

$$W_{ew} = W_f \exp\left(\frac{Q_{ew} \mu(T(R_{ew}, \theta_{ew}, \tau) - T_f)}{R_f T_f T(R_{ew}, \theta_{ew}, \tau)}\right). \quad (4.2.3.2)$$

Скорость испарения жидкого горючего компонента топлива [316]:

$$W_{eo} = W_{eo}^0 \exp\left(-\frac{Q_{eo}}{R_f T}\right). \quad (4.2.3.3)$$

Распределение давления по радиусу капли вычислялось при решении уравнения пьезопроводности:

$$\begin{aligned} \Pi \frac{\partial p}{\partial \tau} &= \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{K_p}{\nu \beta} \frac{\partial p}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \theta}{R} \frac{K_p}{\nu \beta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\rho_{gm} \beta} \sum_{i=1}^5 f_i; \\ \sum_{i=1}^5 f_i &= \frac{1}{s} \left[W_{ew} \delta(\xi_{ew}) + W_{eo} \delta(\xi_{eo}) + W_{c \rightarrow \text{vol}} + W_{o \rightarrow \text{vap}} + W_{\text{C}+\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}+\text{H}_2} \right]. \end{aligned} \quad (4.2.3.4)$$

Скорость фильтрации парогазовой смеси определялась из дифференциального выражения закона Дарси:

$$U_{gm} = -\frac{K_p}{\nu} \frac{\partial p}{\partial R} \quad \text{— в радиальном направлении;} \quad (4.2.3.5)$$

$$V_{gm} = -\frac{K_p}{\nu} \frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial \theta} \quad \text{— в азимутальном направлении.} \quad (4.2.3.6)$$

Уравнение энергии описывает изменение температуры в газовой среде в окрестности капли ОБУТ:

$$\begin{aligned} C_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial \tau} + C_g \rho_g \omega(R) \frac{\partial T_g}{\partial R} &= \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial R} \right] + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\sin \theta}{R} \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial \theta} \right] + \sum_{i=1}^6 Q_i W_i; \\ \sum_{i=1}^6 Q_i W_i &= \left\{ \begin{aligned} &Q_{\text{CH}_4+\text{O}_2} W_{\text{CH}_4+\text{O}_2} + Q_{\text{CO}+\text{O}_2} W_{\text{CO}+\text{O}_2} + Q_{\text{H}_2+\text{O}_2} W_{\text{H}_2+\text{O}_2} + \\ &+ Q_{\text{C}_2\text{H}_4+3\text{O}_2} W_{\text{C}_2\text{H}_4+3\text{O}_2} + Q_{\text{C}_3\text{H}_6+9\text{O}_2} W_{\text{C}_3\text{H}_6+9\text{O}_2} + Q_{\text{C}_8\text{H}_{18}+\text{O}_2} W_{\text{C}_8\text{H}_{18}+\text{O}_2} \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (4.2.3.7)$$

Скорость движения парогазовой смеси вычислялась по формуле [342]:

$$\omega(R) = U_{gm}(R_{out}, \theta) \frac{0.96}{\frac{0.07R}{s} + 0.29}. \quad (4.2.3.8)$$

На границе капля ОБУТ/газ принято условие идеального теплового контакта:

$$\lambda_{CWSP} \frac{\partial T_1}{\partial R} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial R} + Q_{C+O_2} W_{C+O_2} + \sigma \varepsilon (T_g^4 - T_1^4), \quad T_1(R_{out}, \tau) = T_g(R_{out}, \tau). \quad (4.2.3.9)$$

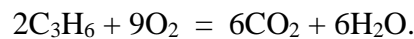
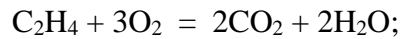
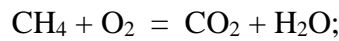
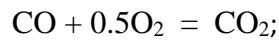
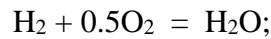
В выражении (2.2.3.9) учитывалось изменение степени черноты поверхности капли с увеличением ее температуры $\varepsilon = f[T_1(R_{out})]$. Скорость реакции $C+O_2 = CO_2 + 18.67 \text{ MJ/kg}$ вычислялась с использованием зависимости Аррениуса. Принято, что водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с углеродом $C+H_2O = CO+H_2 - 118.49 \text{ MJ/kg}$. Скорость этой реакции вычислялась с использованием зависимости Аррениуса. Процесс термического разложения угля описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta_{c \rightarrow vol}}{\partial \tau} = (1 - \eta_{c \rightarrow vol}) k_{c \rightarrow vol} \exp\left(-\frac{E_{c \rightarrow vol}}{R_i T}\right). \quad (4.2.3.10)$$

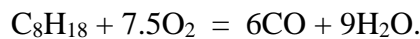
Аналогично принято, что при достижении на поверхности капли топлива критических (по испарению масла) условий, инициируется процесс термического разложения жидкого горючего, который описывается уравнением:

$$\frac{\partial \eta_{oil \rightarrow vol}}{\partial \tau} = (1 - \eta_{oil \rightarrow vol}) k_{oil \rightarrow vol} \exp\left(-\frac{E_{oil \rightarrow vol}}{R_i T}\right). \quad (4.2.3.11)$$

В окрестности поверхности капли описывалось протекание пяти основных (по тепловому эффекту) химических реакций [151, 436, 172].



При зажигании паров жидкого горючего компонента топлива предполагалась, что среди большого числа химических реакций [436], доминирующей является следующая реакция с наибольшим тепловыделением [168]:



Концентрации компонентов парогазовой смеси (H_2 , CO , CH_4 , C_2H_4 , C_3H_6 , C_8H_{18} , CO_2 и H_2O) в окрестности капли ОБУТ вычислялись при решении уравнения диффузии для соответствующего компонента:

$$\rho_g \frac{\partial c_i}{\partial \tau} + \rho_g \omega(R) \frac{\partial c_i}{\partial R} = \rho_g \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 D_i \frac{\partial c_i}{\partial R} \right] + \frac{\rho_g}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\sin \theta}{R} D_i \frac{\partial c_i}{\partial \theta} \right] - \sum_{i=1}^8 W_i. \quad (4.2.3.12)$$

Термическое разложение угля ведет к увеличению размеров пор. Разработанная математическая модель учитывает изменение плотности и пористости угольного компонента топлива:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = (\rho - \rho_{\text{etd}}) k_{c \rightarrow \text{vol}} \exp\left(-\frac{E_{c \rightarrow \text{vol}}}{R_f T}\right); \quad (4.2.3.13)$$

$$\Pi_p = \Pi_0 \frac{\rho - \rho_0}{\rho_{\text{etd}} - \rho_0}. \quad (4.2.3.14)$$

Для системы уравнений заданы следующие начальные и граничные условия:

$$0 < R < R_{\text{out}}, 0 < \theta < \pi, T(R, \theta, 0) = T_0 = 298 \text{ К}, p(R, \theta, 0) = p_{\text{atm}};$$

$$\eta(R, \theta, 0) = \eta_0, \rho(R, \theta, 0) = \rho_0; \quad (4.2.3.15)$$

$$R_{\text{out}} < R < R_g, 0 < \theta < \pi, T(R, \theta, 0) = T_g, c_i(R, \theta, 0) = 0. \quad (4.2.3.16)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial R} \right|_{R=0} = 0 \quad (4.2.3.17)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\substack{0 < R < R_g \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0 \quad (4.2.3.18)$$

$$\left. \frac{\partial^2 T_g}{\partial R^2} \right|_{R=R_g} = 0 \quad (4.2.3.19)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial R} \right|_{R=0} = 0 \quad (4.2.3.20)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial \theta} \right|_{\substack{0 < R < R_{\text{out}} \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0 \quad (4.2.3.20)$$

$$p|_{R=R_{\text{out}}} = p_{\text{atm}} \quad (4.2.3.21)$$

$$\left. \frac{\partial c_i}{\partial R} \right|_{R=R_{\text{out}}} = \frac{W_i}{\rho_g D_i} \quad (4.2.3.23)$$

$$\left. \frac{\partial^2 c}{\partial R^2} \right|_{R=R_g} = 0 \quad (4.2.3.24)$$

$$\left. \frac{\partial c}{\partial \theta} \right|_{\substack{0 < R < R_g \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0 \quad (4.2.3.25)$$

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г. Теплопроводность, теплоемкость и плотность исходного топлива (смесь кека, масла и воды), смеси КЕКа и масла, сухого КЕКа рассчитывались с учетом объемных долей компонентов: $\lambda_{\text{ОВУТ}} = \lambda_i$, $C_{\text{ОВУТ}} = C_i$, $\rho_{\text{ОВУТ}} = \rho_i$, $i = 1$ при $R \leq R_{ew}$, $i = 2$ при $R_{ew} < R \leq R_{eo}$, $i = 3$ при $R_{eo} < R \leq R_{out}$;

$$\lambda_1 = \varphi_4 \lambda_4 + \varphi_5 \lambda_5 + \varphi_6 \lambda_6 \quad C_1 = \varphi_4 C_4 + \varphi_5 C_5 + \varphi_6 C_6 \quad \rho_1 = \varphi_4 \rho_4 + \varphi_5 \rho_5 + \varphi_6 \rho_6 \quad (2.2.3.27)$$

$$\lambda_2 = \varphi_5 \lambda_5 + \varphi_6 \lambda_6 + (1 - \varphi_4) \lambda_7 \quad C_2 = \varphi_5 C_5 + \varphi_6 C_6 + (1 - \varphi_4) C_7 \quad \rho_2 = \varphi_5 \rho_5 + \varphi_6 \rho_6 + (1 - \varphi_4) \rho_7 \quad (2.2.3.28)$$

$$\lambda_3 = \varphi_5 \lambda_5 + (1 - \varphi_4 - \varphi_6) \lambda_8 \quad C_3 = \varphi_5 C_5 + (1 - \varphi_4 - \varphi_6) C_8 \quad \rho_3 = \varphi_5 \rho_5 + (1 - \varphi_4 - \varphi_6) \rho_8 \quad (2.2.3.29)$$

Для оценки адекватности разработанной математической модели и проверки достоверности результатов численного моделирования выполнено сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными данными (Рисунки 4.2.3.5 и 4.2.3.6). Установлено удовлетворительное соответствие времен задержки газофазного зажигания и времен задержки гетерогенного зажигания для капли типичной топливной суспензии при варьировании температуры окружающей среды в достаточно широком диапазоне $T_g = 975\text{--}1175\text{ К}$. Полученные результаты численного моделирования качественно хорошо соответствуют установленным ранее экспериментальным зависимостям времен задержки зажигания от температуры окружающей среды [424]. Левая граница кривых на Рисунках 4.2.3.5 соответствует предельной температуре, необходимой для зажигания топлива. С увеличением температуры окружающей среды нелинейно возрастает интенсивность физико – химических процессов. Времена задержки зажигания уменьшаются и достигают минимального значения в области относительно высоких температур (правая граница кривых на Рисунке 4.2.3.5). Дальнейшее увеличение T_g не приводит к существенному изменению t_{ign} в условиях интенсивного нагрева капли. Также в рамках разработанной математической модели теоретически установлены диапазоны температур для разных режимов физико – химических превращений при нагревании капель ОБУТ (Рисунок 4.2.3.6), которые были выявлены при проведении экспериментального исследования.

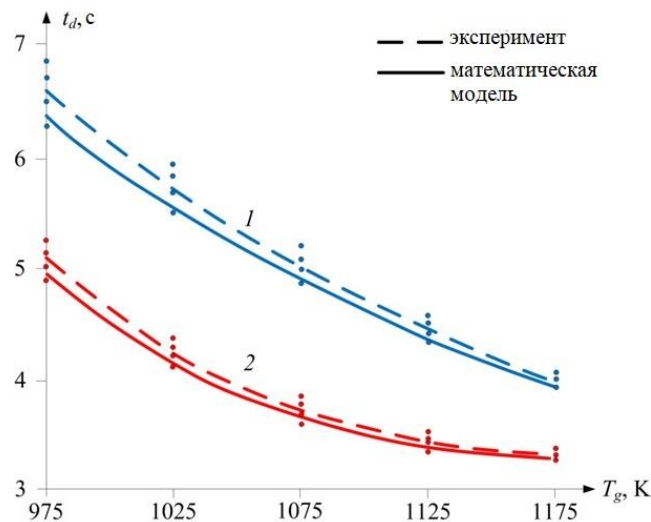


Рисунок 4.2.3.5 – Зависимости времен задержки зажигания газовой смеси в окрестности капли (2) и твердого углеродистого остатка (1) для ОБУТ от температуры окружающей среды при $R_d \approx 0.5\text{ мм}$ [172]

Полученные результаты (Рисунки 4.2.3.5 и 4.2.3.6) позволяют сделать вывод о возможном применении на практике разработанной математической модели для достаточно

достоверного прогноза закономерностей и характеристик физико – химических процессов при нагревании капель ОБУТ.

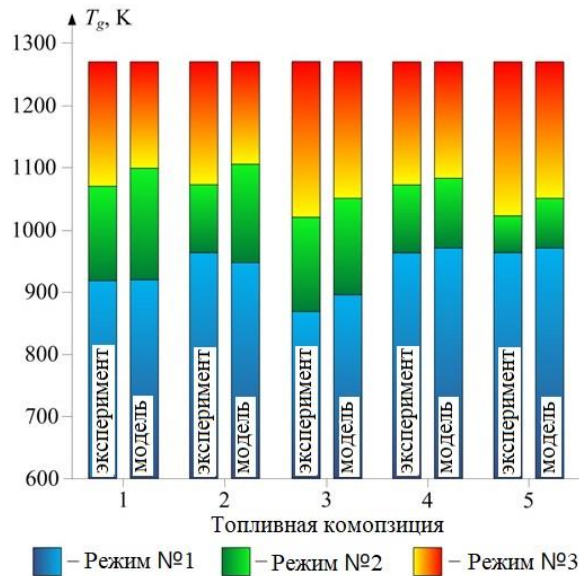


Рисунок 4.2.3.6 — Диапазоны температур для разных режимов физико – химических превращений при нагревании капель ОБУТ (45% кек + 45% вода + 10% турбинное масло) [172]:

1 – ОБУТ №1; 2 – ОБУТ №2; 3 – ОБУТ №3; 4 – ОБУТ №4; 5 – ОБУТ № 5

На Рисунке 4.2.3.7 приведены типичные распределения относительных температур в системе «капля ОБУТ/газовая среда» для трех выявленных режимов физико – химических превращений, иллюстрирующие прогрев капли топлива. Рисунок 4.2.3.7 иллюстрирует закономерности физико – химических процессов, протекающих при разной интенсивности нагрева, капли ОБУТ. В условиях реализации зажигания при относительно высоких температурах окружающей среды период индукции можно условно разделить на несколько последовательных стадий: инертный прогрев, испарение воды с формированием соответствующего фронта F_{ew} , испарение масла и термическое разложение угля в тонком приповерхностном слое капли, формирование парогазовой смеси в окрестности капли, газофазное зажигание (кривая 3 на Рисунке 4.2.3.7). Вследствие достаточно высокого градиента температур на границе «капля ОБУТ/газовая среда» в начальный момент времени приповерхностный слой капли интенсивно прогревается в течение малого промежутка времени. Относительно холодные продукты испарения жидких компонентов ОБУТ вдуваются в газовую среду. Ее температура в окрестности капли снижается относительно начального значения. В результате диффузии паров и летучих в среде окислителя формируется горючая газовая смесь. Условия, необходимые для ее зажигания (температура и концентрация), достигаются на некотором удалении от поверхности капли. Область, где $T/T_g > 1$ (кривая 3 на Рисунке

4.2.3.7), соответствует зоне газофазного зажигания.

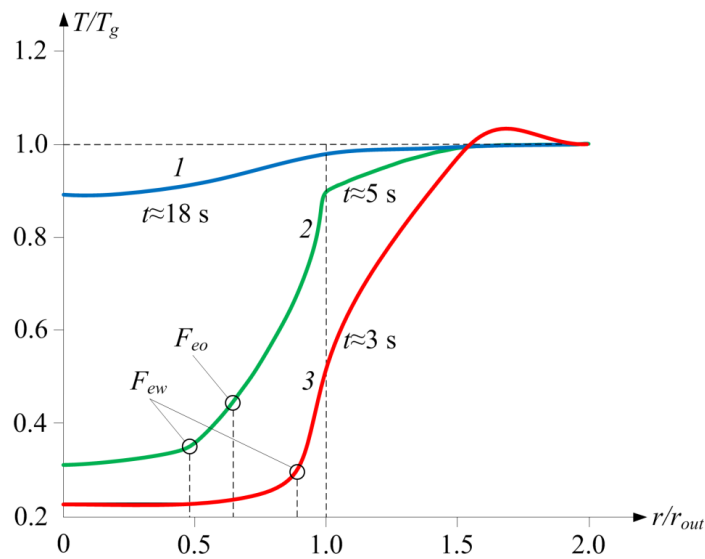


Рисунок 4.2.3.7 — Распределение температур в системе «капля ОБУТ/газовая среда» при разных режимах физико – химических превращений [172]:

1 – режим №1 при $T_g = 800$ K;

2 – режим №2 при $T_g = 1000$ K; 3 – режим №3 при $T_g = 1200$ K

В условиях менее интенсивного нагрева капли ОБУТ (второй режим) на начальной стадии происходит инертный радиационно – конвективный нагрев, который характеризуется достаточно быстрым ростом температуры. Это ведет к развитию процесса испарения влаги. В тонком приповерхностном слое капли достигаются условия кипения жидких компонентов. В капле формируются два фронта испарения (кривая 2 на Рисунке 4.2.3.7): воды F_{ew} и горючей жидкости F_{eo} . В результате испарения влаги формируется твердый остаток, который представляет собой высокопористый углеродистый каркас с низкими значениями теплопроводности и теплоемкости по сравнению с аналогичными характеристиками ОБУТ. Рост температуры капли замедляется. Это обусловлено также снижением температурного градиента на границе капли с внешней средой. При реализации второго режима испаряется около 70% влаги. Газофазное зажигание не происходит. Температура окислителя недостаточно высока для прогрева горючих газов и инициирования интенсивного химического реагирования. Продукты испарения горючей жидкости и термического разложения угля диффундируют в окружающую среду, их концентрация в окрестности капли недостаточна для развития устойчивого газофазного зажигания. Вследствие достаточно длительного последующего прогрева углеродистого остатка происходит его гетерогенное зажигание.

При реализации первого режима (кривая 1 на Рисунке 4.2.3.7) не происходит ни газофазного, ни гетерогенного зажигания ОВУТ. При относительно низких значениях температуры окружающей среды происходит умеренный прогрев капли. Испаряются жидкие компоненты, летучие выходят из угля. Температура окислителя слишком низкая для зажигания. Поэтому с течением времени твердый остаток в виде углеродистого каркаса равномерно прогревается до температуры окружающей среды. Такой режим нагрева капель ОВУТ в топке котла недопустим на практике. Вследствие испарения жидких горючих компонентов концентрация паров в какой – либо части топки может достичь предельных значений, достаточных для зажигания при относительно невысоких температурах окислителя. Такой неконтролируемый процесс может стать причиной возникновения аварии и выхода из строя технологического оборудования.

На Рисунке 4.2.3.8 приведены времена задержки зажигания капель ОВУТ для трех составов, отличающихся концентрацией жидкого горючего компонента. Анализ зависимостей показывает, что увеличение доли горючей жидкости ведет к существенному уменьшению t_{ign} . При температуре окружающей среды 973 К увеличение концентрации масла с 10 до 20% ведет к интенсификации зажигания на 50% (t_{ign} уменьшается с 3.3 до 2 с.). Это обусловлено тем, что увеличение доли жидкого горючего приводит к снижению концентрации воды в ОВУТ. Существенно сокращается период испарения влаги и общие энергозатраты на реализацию этого эндотермического процесса. Также увеличение концентрации масла ведет к формированию богатой горючими компонентами парогазовой смеси в малой окрестности капли.

Можно сделать вывод, что увеличение концентрации жидкого горючего компонента в составе топлива ведет к существенному изменению температурных границ диапазонов, характерных для реализации выявленных трех режимов физико – химических превращений ОВУТ при нагревании. Увеличение доли масла с 10 до 20% мас. значительно сдвигает границу газофазного зажигания топлива в область низких температур (с 973 до 773 К). Анализ зависимостей (Рисунок 4.2.3.8) позволяет сделать важный для практического приложения вывод о том, что для стабильного воспламенения топлива в условиях низкотемпературного нагрева (при $T_g < 773$ К), например, при растопке котла, целесообразно увеличивать долю жидкого горючего компонента в составе ОВУТ. После прогрева топки (при $T_g > 973$ К) и выхода на стационарный режим работы котла концентрация масла в топливе может быть уменьшена до 10%.

Достоинством разработанной математической модели зажигания капли ОВУТ является ее автономность. Для вычисления времен задержки зажигания не нужно проводить какие – либо специальные экспериментальные исследования с целью определения значений констант, без знания которых использование модели (1)–(38) невозможно. Постановка задачи (1)–(38) выполнена с высокой степенью детализации физико – химических процессов в структурно – неоднородной среде – капле ОВУТ. Для математического моделирования рассматриваемых процессов термической подготовки и непосредственного зажигания ОВУТ достаточно эмпирических характеристик, которые могут быть получены в лабораторных условиях на предприятиях энергетического комплекса (состав продуктов пиролиза и испарения, теплофизические и термохимические характеристики).

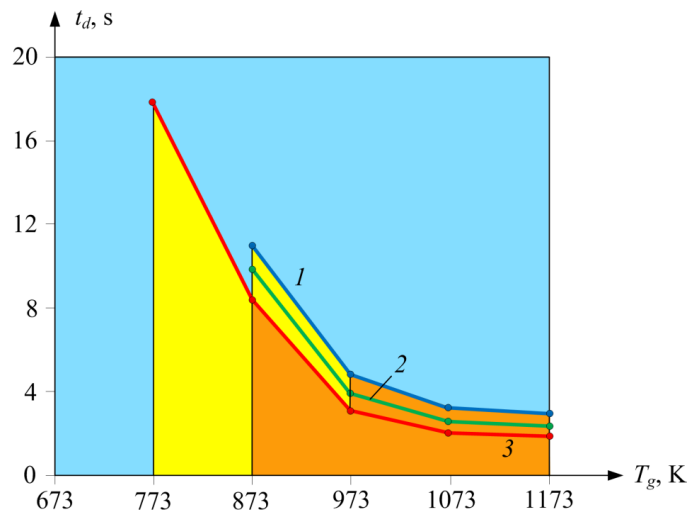


Рисунок 4.2.3.8 — Времена задержки зажигания капель ОВУТ (45% кек Т + вода + турбинное масло) в течение индукционного периода [172]:

1 – ОВУТ No. 1 (10% турбинное масло);

2 – ОВУТ No. 7 (15% турбинное масло);

3 – ОВУТ No. 8 (20% турбинное масло);

синяя область – ОВУТ не горит; желтая область – гетерогенное зажигание ОВУТ; оранжевая область – газофазное зажигание ОВУТ

4.2.4 Обоснование возможности переработки автомобильных шин в составе водоугольных композитов

При исследовании процессов воспламенения частиц органо – водоугольных топлив изучалась динамика зажигания в основном топливных композиций на основе отходов углеобогатительных фабрик и отработавших свой рабочий ресурс продуктов нефтехимии. Стоит сказать, что фильтр – кек не может являться базовым топливом ТЭС, вследствие малых (по сравнению, даже с самым низкосортным углем) значений теплоты сгорания. По этой причине приемлемо для современной энергетики сжигать органо – водоугольные топлива не на основе отходов углеобогатительной промышленности, а на базе типичных энергетических углей. При этом как уже было указано выше индукционный период типичных капель водоугольных суспензии может достигать десятков секунд, что существенно затрудняет организацию процесса горения такого топлива в топочных устройствах котельных агрегатов. Соответственно, введение в состав ускоряющих процесс воспламенения добавок является перспективным технологическим решением. В качестве таких катализаторов процесса горения могут выступать жидкие продукты пиролиза отработавших свой рабочий ресурс автомобильных шин. В результате появляется возможность существенно расширить сырьевую базу тепловых электрических станций, а также позволит существенно уменьшить количество отходов автомобильных шин.

В этом параграфе диссертации представлены результаты экспериментальных и численных исследований процессов зажигания и горения водоугольных топлив с добавками жидкой горючей фракции продуктов термической переработки отходов автомобильных шин. Горючая компонента получена в результате термической переработке 2 кг измельченной автомобильной шины в среде перегретого до 550 °С пара с избыточным давлением в реакторе 10⁵ Па в течении 45 мин.

На основе анализа вышеприведенного можно сказать, что на настоящее время нет теории зажигания и горения частиц многосоставных топлив на основе углей, воды и жидких продуктов термолиза автомобильных шин. Поэтому с целью обоснования возможности эффективного использования жидких продуктов первичной переработки отработавших свой ресурс автомобильных шин (синтез – нефти) сформулированы следующие цели:

1. Установление по результатам экспериментов временных характеристик процесса воспламенения частиц нового класса топлив – вода/уголь/синтез – нефть.
2. Анализ влияния добавления синтетической нефти (жидких продуктов пиролиза автомобильных шин) в водоугольную суспензию на характеристики и условия ее зажигания.

3. Разработка по результатам экспериментов математической модели, описывающей процессы воспламенения капель такого композиционного топлива.

В качестве базовых компонент топлива использовались каменный уголь марки Д (длиннопламенный) и отработанные шины грузового автомобиля. Технические характеристики угля и резины приведены в Таблице 4.2.4.1. Подготовка композиционного топлива проводилась по аналогичной [151] схеме. На первом этапе проводилось дробление сухого крупнокускового угля в шаровой барабанной мельнице. После первичного измельчения проводилось просеивание угля через сито с размером ячеек 200 мкм. Далее угольная пыль измельчалась методом гидродинамического помола в керамической барабанной мельнице, заполненной дистиллированной водой (температура 20 °С).

По достижению необходимого состояния (вязкость $\nu = 1,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; плотность $\rho = 1167 \text{ кг/м}^3$), суспензия помещалась в бак «накопитель – смеситель». После этого в состав суспензии добавлялись ускоряющие процесс зажигания добавки – жидкие продукты пиролиза резины (синтетическая нефть).

Приготовление синтез – нефти проводилась по следующей схеме: на первом этапе автомобильные шины измельчались в промышленном шредере. Характерный размер частиц диспергированной резины составлял 5 – 10 мм. Получившуюся резиновую крошку просеивали через сито с размером ячейки 0,1 см. Общий вид диспергированной резины приведен на Рисунке 4.2.4.1.

Таблица 4.2.4.1. Технические характеристики материалов.

| Параметр | Резина | Уголь [437] |
|-----------|----------------------------|-------------|
| | Концентрация компоненты, % | |
| Влага | 0.5 | 15 |
| Летучие | 65.9 | 30.2 |
| Зольность | 7.2 | 11.5 |
| Углерод | 26.4 | 82 |

Затем измельчённая резина помещалась в сетчатый стакан, который устанавливался в трубчатый реактор – газификатор. Он представлял собой газоплотный и теплоизолированный вертикальный металлический цилиндр, выполненный из коррозионностойкой стали. Далее реактор плотно герметизировался верхней крышкой с помощью фланцевого соединения.



Рисунок 4.2.4.1 – Измельчённая резина [164]

Во внутреннюю полость реактора подавался перегретый ($T_{st} = 773\text{K}$) водяной пар. Он генерировался в парогенераторной системе, состоящей из парового электро – котла и двух пароперегревателей (Рисунок 4.2.4.2).

Расход пара регулировался игольчатой задвижкой. Образующаяся в процессе термолиза парогазовая смесь конденсировалась в трубчатом конденсаторе. Конденсат (смесь воды и жидких продуктов пиролиза резины) направлялся в отстойную емкость. Температура внутри реактора контролировалась комплексом хромель – алюмелевых (температурный диапазон измерений $\Delta T = 233 - 1473\text{K}$, систематическая погрешность измерений $\delta T = 1,5\text{K}$) термопар, установленных равномерно по всему объему цилиндра. Пиролиз резины шин проводился при температуре пара 773 K . Расход пара 5 кг/ч . Время выдержки сырья в реакторе – 1 час . Масса навески резиновой крошки составляла $0,5\text{ кг}$.

Таблица 4.2.4.2 – Продукты термического разложения [164].

| Параметр | Значение, мас. % |
|---------------------|------------------|
| Синтез – газ | 12,3 |
| Синтетическая нефть | 54,1 |
| Углерод кокса | 33,6 |

По результатам пиролиза резины проведен анализ компонентного состава жидких продуктов термического разложения. Состав последних приведен в Таблице 4.2.4.2. Жидкие продукты пиролиза представляли собой воду – углеводородную эмульсию. Далее эта эмульсия подвергалась разделению в делительной воронке с применением промышленного нефтяного деэмульгатора. В результате формировалась углеводородная смесь по своему составу и консистенции схожая с мазутом. Соотношение в системе вода/углеводороды в жидком горючем составляло $20/80$.

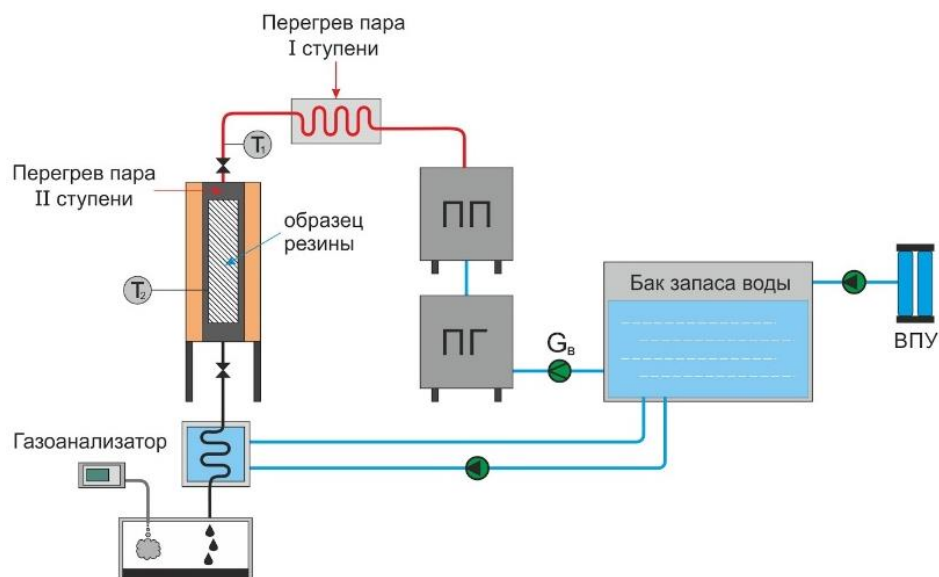


Рисунок 4.2.4.2 – Принципиальная схема экспериментальной установки пиролиза автомобильных шин [164]:

1 – парогенератор; 2 – пароперегреватель; 3 – реактор – пиролизатор; 4 – конденсатор; 5 – бак питательной воды; 6 – бак отстойник продуктов пиролиза; 7 – водоподготовительное устройство

Жидкие продукты пиролиза добавляли в водоугольную суспензию и доводили смесь до гомогенного состояния. Компонентный состав и характеристики композиционного топлива приведены в Таблице 4.2.4.3. С целью оценки энергетического потенциала определены теплоты сгорания (Q_c^d) композиционного топлива в каллометрической камере в соответствии с методикой [438]. Исследования процессов воспламенения проводились на экспериментальном стенде, который по методам регистрации и обработке экспериментальных результатов аналогичен стенду, приведенному в разделе 4.2.3.

Таблица 4.2.4.3 – Компонентный состав и теплота сгорания суспензий [164].

| Компонентный состав системы | Концентрация компонент | | | | Q_c^d , МДж/кг |
|-----------------------------|------------------------|------|------------------|-------|---------------------|
| | Coal | NaOH | H ₂ O | Нефть | |
| Уголь/вода/синтез – нефть | | | | | |
| 50/47/3 | 50 | 1 | 46 | 3 | 17,5 |
| 50/45/5 | 50 | 1 | 44 | 5 | 18,4 |
| 50/42/8 | 50 | 1 | 41 | 8 | 19,6 |
| 50/0/50 | 50 | 1 | 0 | 49 | 37,0 |

На Рисунке 4.2.4.3 приведены кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения частиц ОВУТ (компонентный состав уголь/вода/синтез – нефть: 50/45/5) характерного

размера (характерного) при температуре внешней среды $T_g = 1273\text{K}$. В начальный период времени капля топлива попадает в высокотемпературную среду и нагревается за счет конвекции и излучения (Рисунок 4.2.4.3 *a*). В результате интенсифицируются процессы испарения влаги топлива и жидкой горючей компоненты. Фронты испарений двигаются от поверхностных слоев вглубь частицы топлива. В результате формируется существенно неоднородная (по пространству) система, состоящая из насыщенного влагой и синтетической нефтью внутреннего ядра, насыщенного синтетической нефтью угольного каркаса внешнего ядра и сухого внешнего углеродистого каркаса – кора.

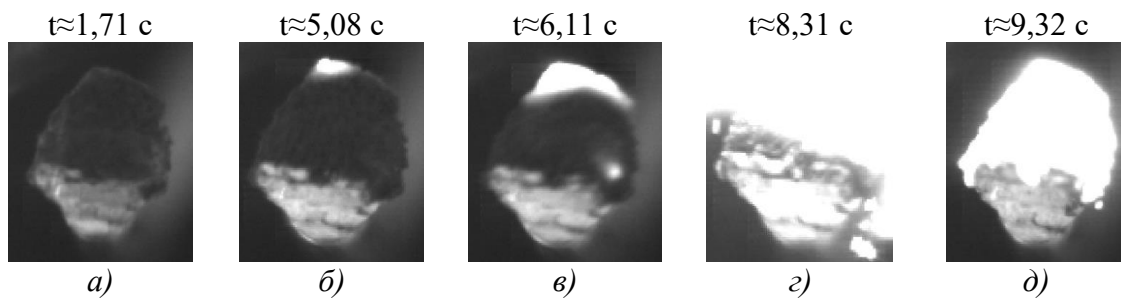


Рисунок 4.2.4.3 – Типичные кадры со стадиями зажигания частиц (с характерным размером $d = 3.0$ мм) компонентного состава уголь/вода/синтез – нефть (50/45/5) [164]

Дальнейший нагрев приводит к термическому разложению угля, сопровождающегося выходом летучих (Рисунок 4.2.4.3 *б*). При достижении критических (по условиям зажигания) концентраций горючего и температуры происходит воспламенение смеси воздуха и летучих. Фронт пламени распространяется по всей поверхности частицы (Рисунок 4.2.4.3 *в – д*).

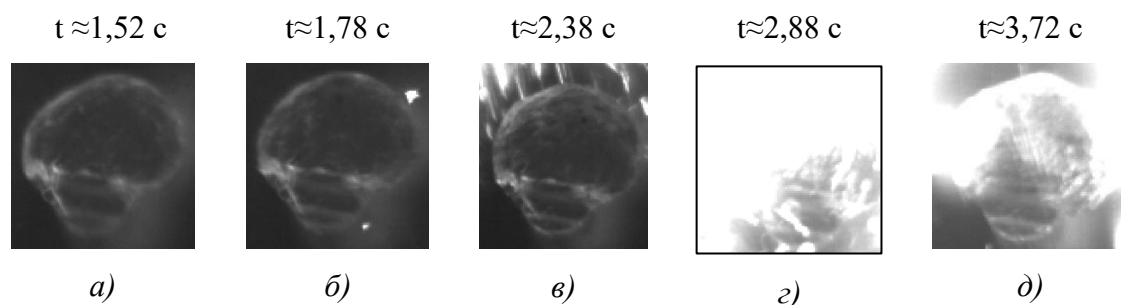


Рисунок 4.2.4.4 – Типичные кадры со стадиями зажигания частицы (с характерным размером $d = 3.0$ мм) топливной системы уголь/вода/синтез – нефть [164]: 50/0/50

На Рисунках 4.2.4.4 приведены типичные кадры видеогаммы процесса воспламенения частицы ОБУТ (состав уголь/синтез – нефть: 50/50). Анализ кадров типичной видеогаммы позволяет сделать аналогичный рисунку 4.2.4.3 вывод о стадийности процесса зажигания многокомпонентного топлива.

Существенно отличающиеся времена задержки зажигания этих двух составов обусловлены тем, что в составе топлива уголь/нефть (50/50) не содержится воды. Соответственно, и эндотермический тепловой эффект испарения минимален (происходит только испарение жидкой горючей компоненты). Экспериментальные зависимости времен задержки зажигания от температуры внешней среды приведены на Рисунках 4.2.4.5 а – д. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что увеличение концентрации синтез – нефти в топливе приводит к существенному снижению времени задержки воспламенения. Статистический анализ по непараметрическому критерию Вилкоксона показал, что во всем диапазоне температур внешней среды увеличение концентрации нефти в ОВУТ приводит к статистически значимым изменениям значений t_{ign} с критерием значимости $\alpha = 0.01$. Такая динамика $t_{ign}(T_g)$ характерна для всего диапазона размеров топливных частиц.

Анализ зависимостей $t_{ign}(T_g)$, приведенных на Рисунке 4.2.4.5, показывает, что температура внешней среды оказывает существенное влияние на характеристики и условия зажигания топливных частиц. При этом можно отметить существенно нелинейный характер зависимости $t_{ign}(T_g)$, обусловленный влиянием комплекса теплофизических (радиационно – конвективный нагрев, испарение воды и жидкого горючего, фильтрация парогазовой смеси сквозь пористый углеродистый каркас) и термохимических (термическое разложение органической частиц угля, термохимическое взаимодействие газообразных и твердых продуктов пиролиза угля и паров жидкого горючего с кислородом воздуха) процессов, протекающих в малой окрестности частицы и в ее пористой структуре.

На Рисунке 4.2.4.5 б приведены значения времен задержки зажигания частиц композиционного топлива (соотношение компонент в системе уголь/вода/нефть: 50/0/50). Можно отметить, что при всех температурах внешней среды T_g значения t_{ign} частиц уголь/синтез – нефть существенно меньше времен задержки воспламенения идентичных по размерам частиц вода – уголь/синтез – нефть. Это, очевидно, обусловлено тем, что в составе ОВУТ не содержится воды. Соответственно, в период термической подготовки такого топлива отсутствует процесс испарения воды. Последний является существенно затягивающим (как установлено экспериментально [151]) зажигание процессом.

Можно было бы сделать вывод, что сжигание смесей уголь/синтез – нефть более целесообразно по сравнению с водонасыщенным ОВУТ. Но по результатам экспериментальных исследований [440] установлено, что при сжигании влагонасыщенных топливных смесей водяные пары связывают оксиды азота (NO_x) и серы (SO_x). По этой причине введение в топливо воды является целесообразным, а выбор оптимального соотношения в системе

вода/уголь/нефть является сложной многопараметрической оптимизационной задачей [441].

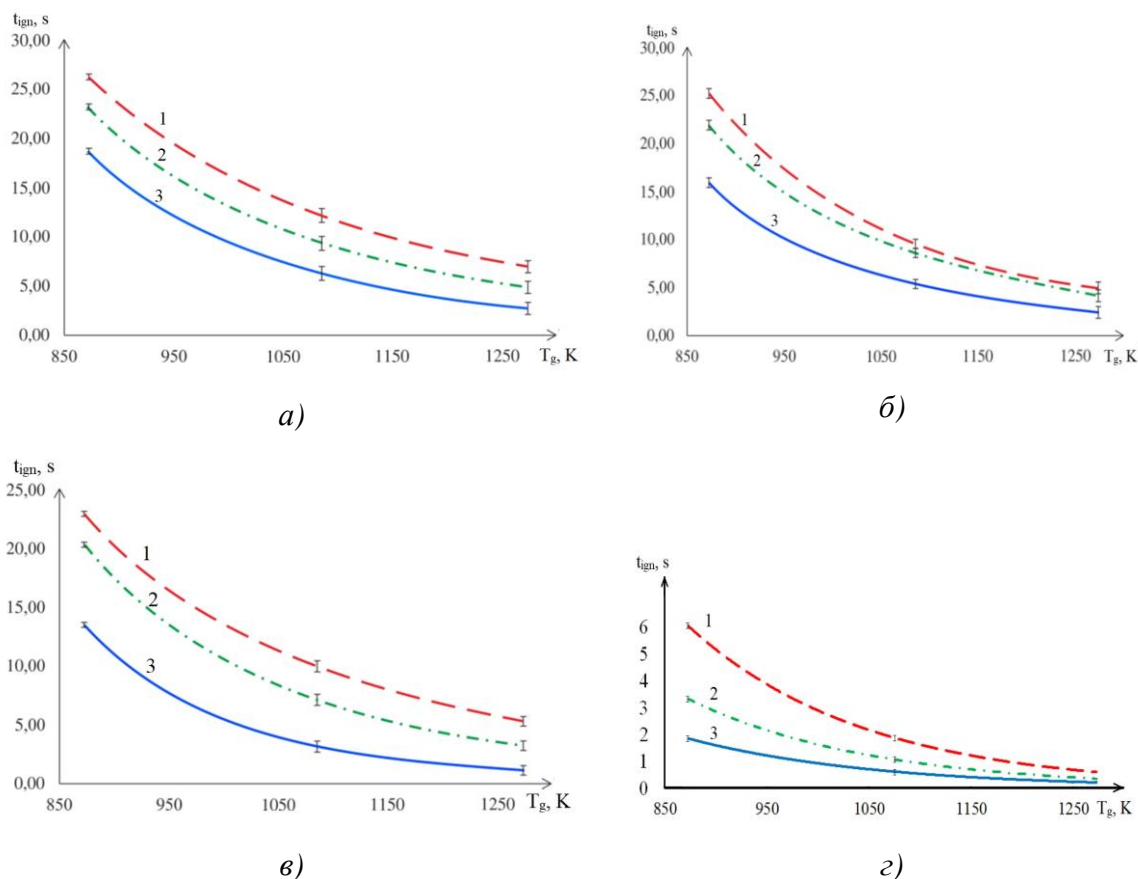


Рисунок 4.2.4.5 – Времена задержки зажигания частиц исследовавшего суспензионного топлива в зависимости от характерного размера и температуры окислителя. Состав топливной системы уголь/вода/синтез – нефть [164]:

а – 50/47/3; б – 50/45/5; в – 50/42/8; г – 50/0/50.

Характерный размер частицы: 1 – $2,5 \leq d \leq 3,0$ mm; 2 – $1,5 \leq d \leq 2,5$ mm; 3 – $d \leq 1,5$ mm

На Рисунке 4.2.4.6 приведены зависимости времен задержки воспламенения частиц ОВУТ (размером $d \approx 3.0$ mm) от концентрации жидкого горючего в суспензии при различных температурах внешней среды. Анализ зависимостей показывает, что при увеличении концентрации синтез – нефти в топливе времена задержки существенно уменьшаются. При этом можно отметить существенно нелинейный характер зависимостей $t_{ign}(\varphi)$. Это обусловлено комплексным влиянием процессов тепломассопереноса, протекающих при испарении внутрипоровой влаги и жидкого горючего. Уменьшение времени задержки зажигания с увеличением φ_{oil} обусловлено повышением концентрации горючего компоненты топлива. Также стоит сказать, что эндотермический тепловой эффект процесса испарения нефти существенно меньше Q_{eva} воды. По этой причине период термической подготовки также существенно сокращается.

Стоит сказать, что проведение систематических экспериментов по изучению процессов воспламенения и горения многокомпонентных композиционных топлив с учетом совокупности всех возможных вариаций массового соотношения и видов компонент топлива, размеров частиц и условий теплообмена настолько трудоемко, что это экономически неоправданно. В этих условиях актуальным становится разработка математического аппарата, обеспечивающего достаточно высокий уровень прогнозов (со стандартным отклонением от практики менее σ) процессов воспламенения и горения таких топлив.

Самые большие достижения (на сегодняшний день) в разработке теории воспламенения и горения частиц таких многосоставных топлив сделаны в [170]. Но в модели [170] принята относительно простая кинетическая схема реагирования основных компонентов летучих угля и паров жидкой горючей компоненты с окислителем (кислород воздуха). Современные представления о горении конденсированных и газообразных веществ дают основания для вывода, что такой подход может привести к существенным погрешностям (отклонение от экспериментальных значений этой характеристики) в прогнозировании времен задержки зажигания частиц топлива.

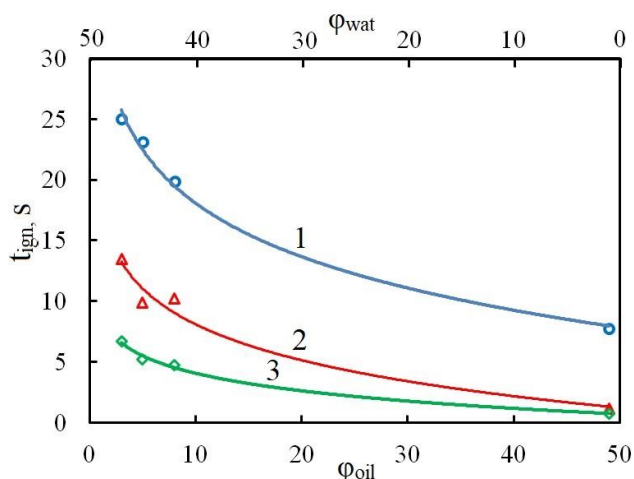


Рисунок 4.2.4.6 – Зависимость времени задержки воспламенения частиц топлива (диаметром $d \approx 3.0$ мм) от концентрации жидкого горючего в суспензии при различных температурах внешней среды [164]:

1 – $T_g = 873K$; 2 – $T_g = 1073K$; 3 – $T_g = 1273K$

По результатам анализа установленных в проведенных экспериментах закономерностей разработана математическая модель процесса зажигания частиц ОБУТ в условиях, соответствующих камерам сгорания типичных парогенераторов тепловых электрических

станций. Физическая постановка задачи зажигания соответствует установленными при проведении экспериментальных исследований закономерностям основных процессов тепло и массопереноса, протекающих при интенсивных физико – химических превращениях.

Математическая постановка задачи воспламенения частиц топлива ОБУТ, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, записанных в безразмерных переменных по своей структуре соответствует математической модели, приведенной в 4.2.3. Отличие заключается в том, что скорости парогазовой смеси в пограничном слое топливной частицы рассчитывалась из решения системы уравнений движения, записанных в переменных «ток – вихревая функция» [442]:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U_g \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{V_g}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial \Phi} + U_g \frac{\partial V_g}{\partial R} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\nabla^2 \Omega - \frac{\Omega}{R^2 \sin^2 \Phi} - \frac{2}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial R} \right) + \text{Ri} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \Phi} + R \sin \Phi \frac{\partial \theta}{\partial R} \right); \quad (4.2.4.1)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \Phi^2} - \cot \Phi \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} + R^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} = \Omega R^2 \sin \Phi; \quad (4.2.4.2)$$

$$U_g = \frac{1}{R^2 \sin \Phi} \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi}; \quad V_g = \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial \Psi}{\partial R}.$$

При постановке задачи учитывалось, что в пограничном слое частицы топлива протекают наиболее значимые реакции воспламенения трех основных компонентов продуктов пиролиза: водорода; окиси углерода и метана. При описании процессов зажигания паров жидкой горючей компоненты топлива принято, что основными ее компонентами являются пары бензола и толуола.

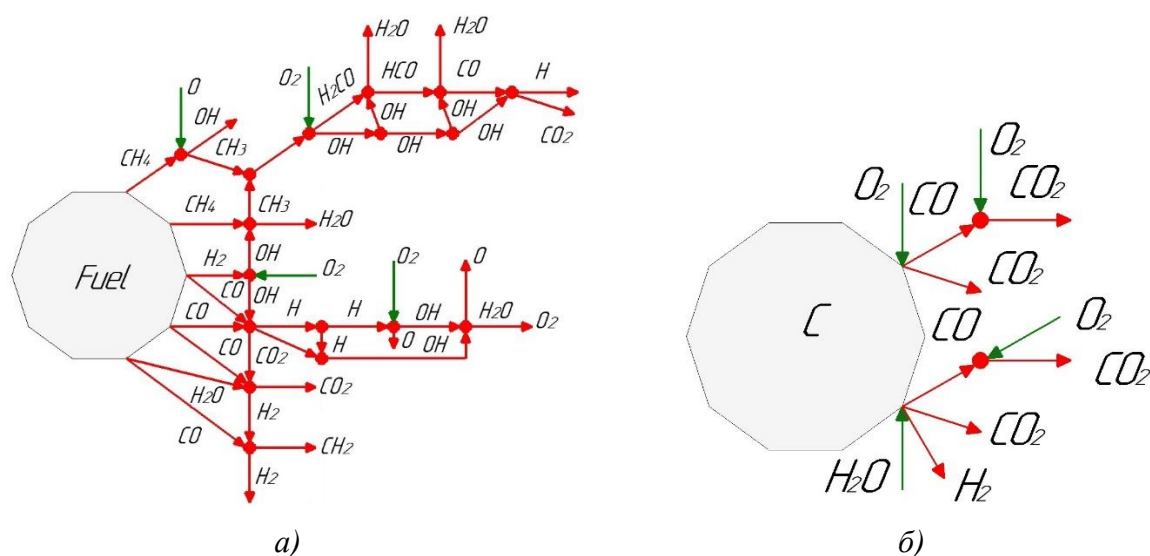


Рисунок 4.2.4.7 – Кинетическая схема воспламенения газообразных (а) продуктов (летучие) и твердых (углерод кокса (б)) продуктов пиролиза с кислородом воздуха [164]

Также стоит сказать, что при моделировании процесса зажигания частиц топлива ВУТ – нефть учитывалась возможность протекания газофазных и гетерогенных реакций окисления газообразных продуктов пиролиза угля и паров жидкого горючего кислородом воздуха в поровой структуре топлива. При этом рассматривался цепной характер протекания этих реакций. Схемы этих реакций приведены на Рисунке 4.2.4.7 (а – газофазные; б – гетерогенные реакции; в – схеме газофазного воспламенения паров жидкого горючего). Схема реагирования бензола и толуола приведена на Рисунке 4.2.4.8.

По результатам численного моделирования установлены времена задержки зажигания частиц композиционного топлива в типичных (в соответствии с режимами работы камер сгорания котельных агрегатов) условиях нагрева. С целью верификации разработанной авторами математической модели процесса зажигания проведен сравнительный анализ значений времен задержки зажигания, полученных теоретически и экспериментально.

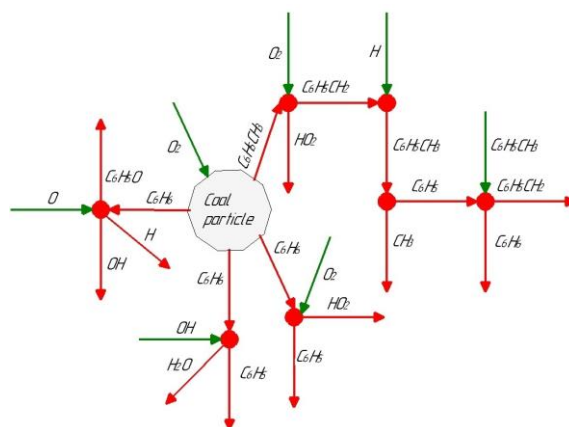


Рисунок 4.2.4.8 – Кинетическая схема реагирования паров бензола (C_6H_6) и толуола ($C_6H_5 - CH_3$) с кислородом воздуха [164]

На Рисунке 4.2.4.9 (а, б) приведены зависимости теоретических и экспериментальных значений t_{ign} от температуры окислителя (воздух). Можно отметить хорошее соответствие теории и эксперимента. Последнее говорит о высоком прогностическом потенциале разработанной математической модели процесса зажигания частиц ОВУТ.

На Рисунках 4.2.4.10 (а – состав уголь/вод/синтез – нефть: 50/45/5; б – состав уголь/нефть: 50/50) приведены зависимости безразмерных температур поверхности (θ_{sur}), центральной части (θ_{cen}) и среднеобъемной температуры ($\theta_{\bar{v}}$), (где $\theta_i = T_i/T_g$; T_g – температура внешней среды) частиц от безразмерных времен $\xi = t/t_{ign}$ в условиях зажигания композиционного (с характерным размером $d = 3$ мм) топлива.

$$\theta_{\bar{V}} = \frac{1}{V} \iiint_0^V \theta(R, \Phi, \Upsilon, Fo) dV$$

R – радиус; Φ, Υ – угловая координата. Анализируя зависимости $\theta_{\bar{V}}(\xi)$, можно выделить два режима зажигания: высокотемпературный и низкотемпературный с условной границей раздела (по температуре внешней среды $T_g = 1073\text{K}$). Анализ зависимостей Рисунка 4.2.4.10 показывает, что уменьшение T_g приводит к тому, что необходимые для стабильного воспламенения условия достигаются только при достаточно глубоком прогреве топлива. Отчетливо заметен перегиб кривой $\theta_{\text{сеп}}$. Также анализ Рисунка 4.2.4.10 показывает, что в условиях высокотемпературного ($T_g \geq 1073\text{K}$) нагрева топливная частица может воспламениться еще до полного испарения всей влаги.

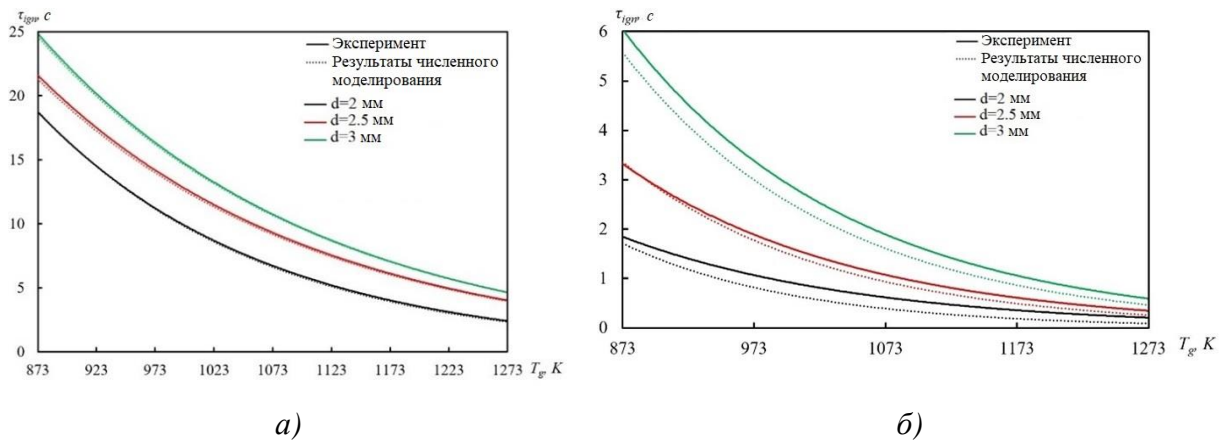


Рисунок 4.2.4.9 – Зависимость времени задержки воспламенения частиц композиционного топлива от температуры внешней среды [164]; состав топливной системы уголь/вода/синтез – нефть:

а – 50/45/5; б – 50/0/50.

На Рисунке 4.2.4.11 приведены поля безразмерных температур в момент воспламенения частиц ОБУТ. С целью верификации результатов численного моделирования на Рисунке 4.2.4.10 приведены типичный кадр видеogramм момента воспламенения частицы топлива. Анализ температурных полей показывает, что воспламенение топлива происходит, как правило, в верхней полусфере частицы. Это обусловлено тем, что газообразные продукты пиролиза вследствие конвективных движений воздуха перемещаются к верхней полусфере частицы и там воспламеняются при выполнении необходимых для этого условий (достижения критических значений температур и концентраций горючего). Соответственно, можно сказать, что применение более упрощенных математических моделей про-

процесса зажигания твердых и жидких топлив к проведению прогностического анализа процессов воспламенения таких сложных по структуре и существенно неоднородных суспензионных (другими словами содержащих в себе твердые и жидкие компоненты) приведет к существенному расхождению прогностических характеристик процесса с их экспериментальными значениями.

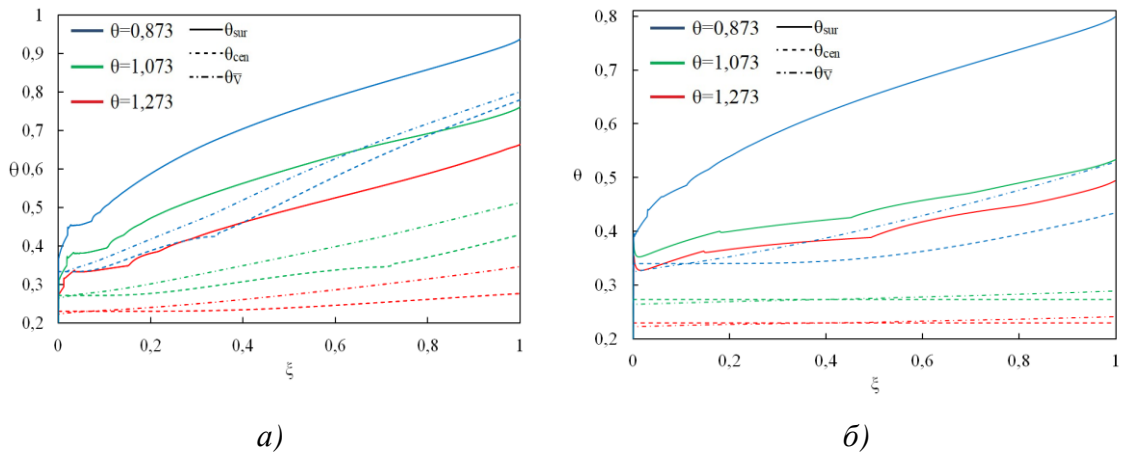


Рисунок 4.2.4.10 – Зависимость безразмерных температур поверхности (θ_{sur}), центра (θ_{cen}) и среднееобъемной температуры ($\theta_{\bar{v}}$) частицы композиционного топлива (размером $d = 3$ мм) и от безразмерного времени ξ .

а – состав топливной системы уголь/вода/синтез – нефть: 50/45/5;

б – состав топлива уголь/нефть: 50/50

На Рисунке 4.2.4.11 с приведены распределения температуры по радиусу системы «частица топлива – внешняя среда» в момент воспламенения в различных сечениях ($\Phi = 0$; $\Phi = \pi/2$; $\Phi = \pi$). Можно отметить, что вокруг частица формируется существенно неоднородное температурное поле, обусловленное конвекции внешней газовой среды. В непосредственной близости от частицы (относительно внешней среды холодной) формируются нисходящие течения, на некотором отдалении от поверхности – восходящие течения.

Результаты выполненных экспериментов и теоретических исследований дают основания для вывода о том, что трех – компонентная топливная суспензия (уголь/вода/синтетическая – нефть) может эффективно сжигаться в камерах сгорания энергетического оборудования. Такое сжигание может обеспечить рациональную утилизацию отработавших свой рабочий ресурс автомобильных шин (в больших объемах). При этом скорее всего экологическая (возможность утилизации отработанных автомобильных шин) и энергетическая (теплота сгорания) эффективность таких трех – компонентных суспензий будет выше аналогичных показателей водоугольных суспензий.

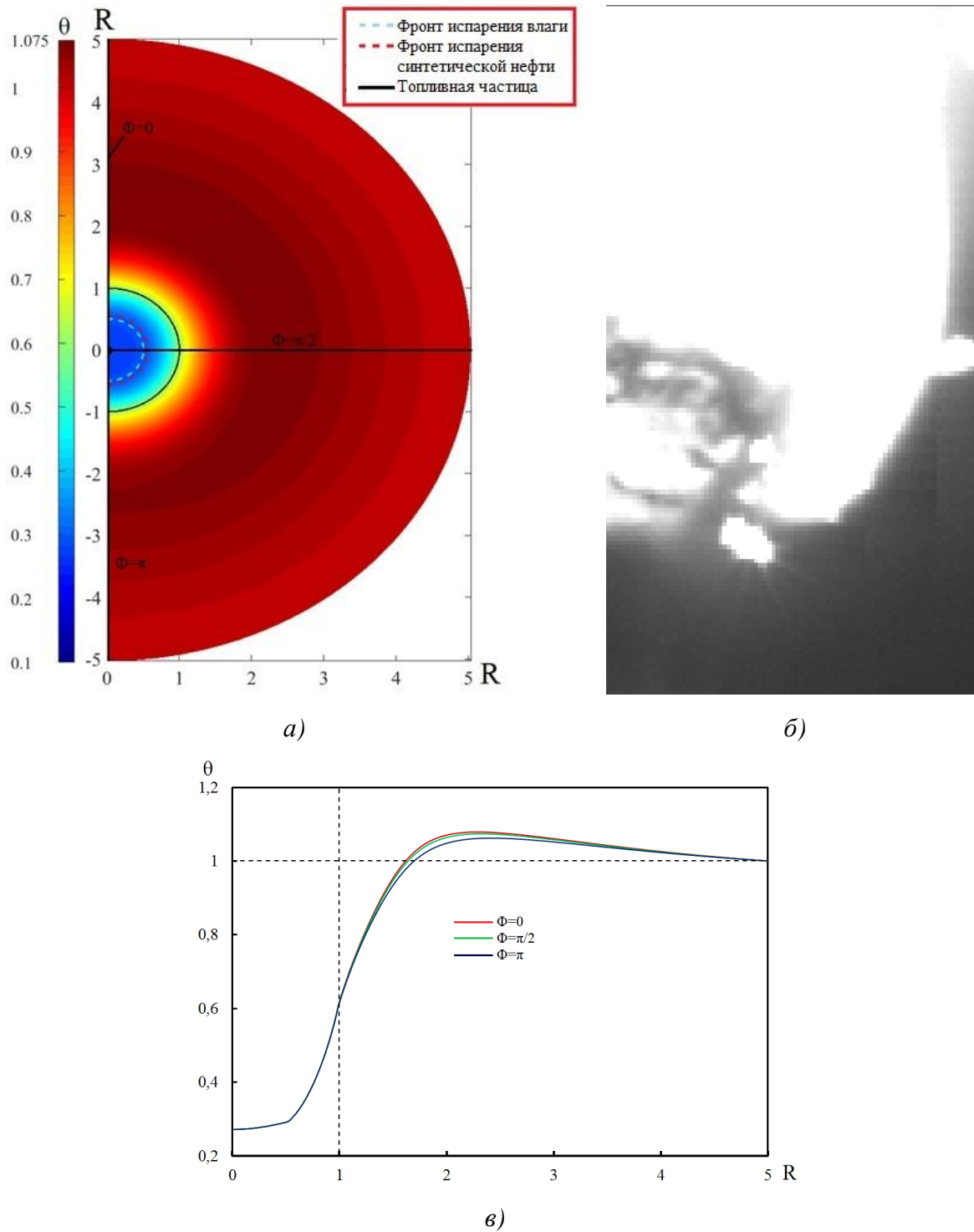


Рисунок 4.2.4.11 – Поле безразмерных температур в системе «частица топлива – высокотемпературная среда» (а) и кадр видеозаписи (б) в момент воспламенения. Распределение температуры (в) по радиусу системы «частица топлива – внешняя среда» в различных сечениях [164]

Но главным преимуществом таких топливных композиций будет снижение нагрузки на окружающую среду процессов хранения и сжигания непригодных для дальнейшей эксплуатации автомобильных шин. Важной составляющей построения единой объединяющей теории и математической базы процессов воспламенения существенно неоднородных многокомпонентных топливных композиция на основе угля, воды и жидких углеводородов является определение структуры аэродинамического спектра в малой окрестности частиц топлива.

Ранее [163] по результатам экспериментов установлено, что при обдуве воздухом частицы (разных форм и размеров) ОБУТ в ее аэродинамическом следе формируется сложной формы стохастически – распределённые вихревые структуры. При этом показано [161], что при обдуве капли органо – водоугольного топлива в ее следе не формируется ожидаемой дорожки Кармана. Стоит сказать, что результаты [161] не применимы в реальной практике. Скорости витания, приведенные в [161] достаточно большие (примерно 8 м/с) и не встречаются при работе котельных агрегатов и горелочных устройств, сжигающих нефте – водоугольные топлива. Как известно [217] при распылении ВУТ в топочном пространстве скорости движения частиц по своим значениям сопоставимы со аналогичной характеристикой несущего потока высокотемпературной окислительной среды. Вследствие малых скоростей витания ($U = |V_{fp} - V_g|$, где V_{fp} – скорость частицы, V_g – скорость газа, м/с) в пристенной области частиц начинают сильнее проявляться термогравитационная конвекция и эффекты вдува в пограничный слой парогазовой смеси (состоящей из паров воды и жидкого горючего, а также газообразных продуктов пиролиза угля). Эти эффекты могут приводить к смещению зоны активного горения летучих на некоторое расстояние от поверхности топлива (другими словами схема режима горения трансформируется из горящего в не горящий пограничный слой). Экспериментальных исследований аэродинамического спектра окружающей частицу парогазовой смеси в условиях ее нагрева при малых (практически нулевых) скоростях витания до настоящего времени не проводилось.

На Рисунке 4.2.4.12 приведены распределения функций тока в малой окрестности частицы ОБУТ (в ее миделевом сечении) и линии постоянной скорости фильтрации парогазовой смеси в пористой структуре топлива в момент воспламенения. Можно сказать, что вокруг топливной частицы формируются вихревые структуры со сложной топологией. Последнее обусловлено комплексным влиянием процессов вдува в пограничный слой частицы и конвективными движениями воздуха. В результате в нижней полусфере частицы образу-

ется тороидальный вихрь с отрицательным ротором. Последний подсасывает высокотемпературный окислитель из внешней среды. В тоже время в верхней полусфере частицы формируется комплекс вихрей, который по форме конгруэнтен аттрактору Лоренца.

В этих условиях рассматривать процесс воспламенения частиц нефте – водоугольного топлива в рамках устоявшихся представлений о незначительности влияния внешне гидродинамики частиц топлива не всегда обосновано. Соответственно, применять на практике методы расчета процессов зажигания, по аналогии с [151], нужно с известной осторожностью.

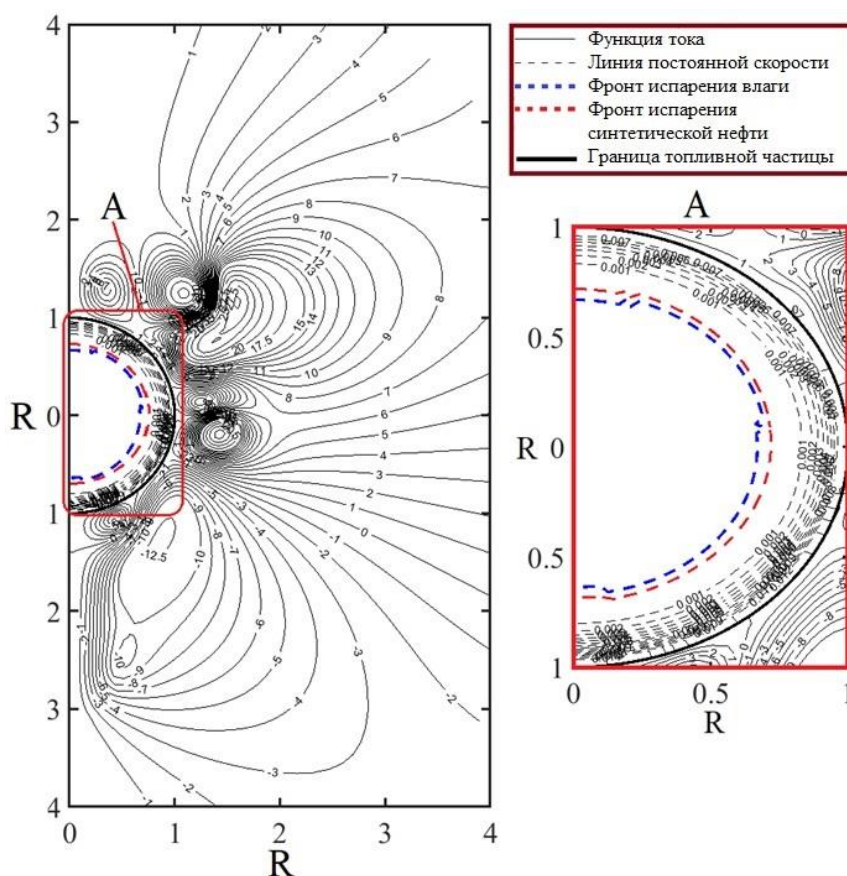


Рисунок 4.2.4.12 – Картина течений высокотемпературной смеси газообразных продуктов пиролиза, паров воды и жидкого горючего, а также окислителя в малой окрестности частицы в период ее воспламенения [164]

Выводы по четвертой главе

1. Впервые разработана общая физическая теория и обеспечивающая ее математическая база процессов термической подготовки к сжиганию биома – водоугольного топлива, пригото-

ленного на основе типичных отходов лесопиления или лесного горючего материала, преимуществом которых по сравнению с широко распространенными в теплоэнергетике твердыми натуральными топливами являются достаточно высокие экологические, энергетические и экономические показатели производства электрической и тепловой энергии. По результатам экспериментальных и теоретических исследований процессов воспламенения частиц био – водоугольного топлива установлено, что добавление древесины в водоугольные суспензии приводит к значительному сокращению времени задержки воспламенения последней (до 3 раз).

2. По результатам математического моделирования установлено, что кинетическая модель гетерогенного окисления угля не оказывает существенного влияния на результат математического моделирования процесса зажигания частицы Био – ВУТ. Показано, что времена задержки зажигания, полученные по результатам численного моделирования процесса гетерогенного воспламенения частицы био – водоугольного топлива в рамках кинетических схем, учитывающих паровую газификацию угля, неполное окисление углерода или только реакцию $C+O_2 = CO_2$ отличаются не более чем на 6%.
3. Установлено, что вид ЛГМ несущественно влияет на продолжительность индукционного периода. По этой причине листовой опад деревьев не нуждается в сортировке, что позволит существенно сократить затраты на производство топлива.
4. По результатам проведенных экспериментальных исследований разработана математическая модель процессов тепло – и массопереноса, протекающих в условиях интенсивных фазовых (испарение воды и синтез – нефти) и термохимических (термическое разложение органической части угля и компонентов нефти, термохимическое взаимодействия газообразных продуктов пиролиза и паров жидкого горючего с кислородом воздуха) превращений в период индукции частиц существенно неоднородных многокомпонентных органо – водоугольных топлив (смесь вода – уголь/нефть).
5. На основе выполненных экспериментальных и теоретических исследований установлены три режима физико – химических превращений при нагревании суспензионных угольных топлив: интенсивное термическое разложение угольного компонента после испарения жидких компонентов топлива; интенсивная газификация угольного компонента в условиях кипения жидких компонентов с последующим гетерогенным горением твердого остатка; зажигание газовой смеси в окрестности капли топлива и гетерогенное горение твердого остатка. Определены температурные диапазоны, соответствующие данным режимам. Показано, что при высоких (более 1100 К) температурах доминирует режим горения. При от-

носительно низких (менее 900 К) температурах реализуется режим термического разложения угольного компонента топлива после испарения жидкостей. В области средних температур (от 900 до 1100 К) зарегистрирован режим с вскипания приповерхностного слоя капли с микровзрывами.

6. По результатам проведенных экспериментов показана перспективность утилизации непригодных к использованию автомобильных шин путём их постадийной переработки (измельчение – пиролиз – выделение «полезных» фракций) и сжигания продуктов её термолиза в составе водоугольных композитов. Показана перспективность использования в качестве ускоряющей процесс зажигания водоугольной суспензии значимой по объёму добавки – жидких продуктов пиролиза, выработавших свой рабочий ресурс автомобильных шин.

Основные результаты главы 4 опубликованы в [153 – 156, 160, 163, 164, 172, 175, 176].

ГЛАВА 5 ЗАЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ СУХИХ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ УГОЛЬ/БИОМАССЫ

На настоящее время становится достаточно очевидной тенденция все более активного внедрения в технологический процесс производства тепловой и электрической энергии новых топливных композиций на основе угля и биомассы [443]. Это обусловлено существенными экономическими и экологическими преимуществами таких топлив по сравнению со сжиганием традиционных твердых (уголь) и жидких (нефть) энергоносителей [444].

Можно отметить, что рост экономики Китая (в последние 10 лет) обусловлен значительным увеличением потребления угля тепловыми электрическими станциями. Но такое увеличение потребления угля привело к значительному росту негативного антропогенного воздействия ТЭС на окружающую среду. В этих условиях особую актуальность приобретают новые топливные композиции на основе мелко диспергированного угля и биомассы. Как правило, в качестве последней используются древесина или отходы сельского хозяйства (рисовая шелуха, кукурузная солома, пшеничный стебель). Такие топливные смеси на основе угля и биомассы обладают безусловными экономическими преимуществами перед традиционным углем.

Стоит отметить, что на настоящее время подавляющее большинство котельных агрегатов, работающих на смесях угля и биомассы используют в основном древесину [445] или отходы сельскохозяйственной деятельности (солома, тростник, кукуруза). В последнее время становится очевидным, что перспективным (но в тоже время не изученных) видом биомассы является лесной горючий материал (опад листьев или хвои) [446].

Проведенные к настоящему времени исследования процессов сжигания угольного топлива [421] с добавлением сухих листьев показали достаточно существенное снижение концентрации оксидов азота и серы в продуктах сгорания. Результаты [421] создают предпосылки для разработки новых экологически эффективных топливных композиций, сжигание которых приводит к снижению штрафов тепловых электрических станций за загрязнение окружающей среды.

Также стоит отметить, что применение лесной биомассы в качестве компонентов топлива может существенно расширить сырьевую базу тепловых электростанций. Применение биомассы в топливных смесях может также повысить степень маневренности котельных агрегатов в пиковых режимах работы.

5.1 Воспламенение био – угольных смесей на основе угля и лесного горючего материала

Стоит сказать, что на настоящее время нет примеров ни теоретических ни экспериментальных исследований процессов зажигания и горения частиц смесевых топлив на основе угля и лесного горючего материала. По этой причине целями настоящего параграфа диссертации являются:

1. Экспериментальное исследование процессов зажигания частиц топливной смеси на основе угля и лесного горючего материала в условиях, соответствующих камерам сгорания типичных парогенераторов ТЭС.
2. Разработка математической модели процесса совместного зажигания частиц угля и ЛГМ в условиях высокотемпературного нагрева.

Экспериментальные исследования закономерностей и характеристик процессов зажигания и горения топливных смесей выполнены для различных концентраций компонент (угля и ЛГМ). Последние приведены в приложении А.

Подготовка смесей угля и ЛГМ для экспериментов проводилась по следующей схеме: на первом этапе крупнокусковой уголь дробился в мелкую крошку (с характерным размером фракции $\delta \approx 30$ мм), после этого уголь молотся в шаровой мельнице тонкого помола до размеров частиц $\delta \leq 90$ мкм.

При проведение экспериментальных исследований использовался листовой и хвойный опад типичных (для регионов Сибири и Дальнего востока) деревьев. На первом этапе листья при помощи режущего инструмента срезались преимущественно с нижних веток дерева. После этого проводилась сушка такого ЛГМ. Листья (или хвоя) выдерживались в сушильном шкафу при температуре 373К до полного испарения свободной влаги. После этого лесной горючий материал разрезался режущим инструментом и истирался в ступе до пылевидного состояния. При этом в результате диспергирования получались частицы ЛГМ различных форм (как правило пластина или диск) и размеров (от ≈ 90 мкм до 4 мм). Последнее существенно зависит от вида лесного горючего материала. Получившиеся угольную и ЛГМ фракции смешивали в соответствии с заданным массовым соотношении.

Экспериментальные исследования процессов зажигания и горения частиц био – угольного топлива проводились на стенде, схема которого приведена на Рисунке 5.1.1. Последний представлял собой вертикально расположенный полый керамический цилиндр, на внешнюю поверхность которого крепился электрический нагреватель. Во избежание теп-

ловых потерь торцы цилиндра закрывались теплоизолирующими заслонками из тугоплавкого материала. При этом стоит отметить, что нижний конец полого керамического цилиндра был закрыт постоянно на период проведения всего эксперимента. Последнее проводилось с целью исключения донного притока холодного воздуха.

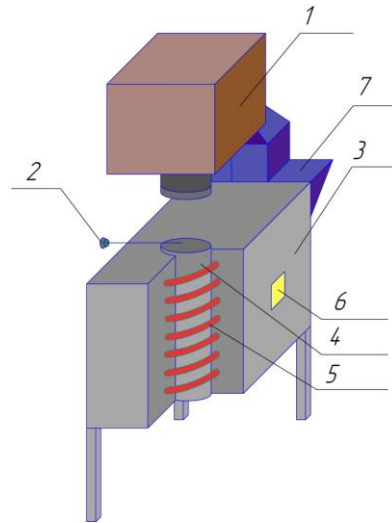


Рисунок 5.1.1 – Экспериментальный стенд

1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – распылитель; 3 – высокотемпературная печь; 4 – керамический полый цилиндр; 5 – электрический нагреватель; 6 – терморегулятор, 7 – крепление высокоскоростной видеокамеры

В результате топливные частицы попадали в неподвижную газовую окислительную среду. Такая конфигурация позволяет изучить процессы зажигания топливных частиц в условиях их свободного падения в высокотемпературном окислителе и обеспечивает минимальные погрешности (за счет отсутствия держателей частиц топлива по аналогии с [151]) моделирования реальных топочных условий котельного агрегата. Другими словами, установка (Рисунок 5.1.1) моделирует достаточно достоверно условия, соответствующие камерам сгорания котельных агрегатов ТЭС.

Частицы био – угольного топлива распылялись в канал нагретого до высоких температур керамического цилиндра. При проведении экспериментов исследовались процессы воспламенения при температурах внешней среды $673 \leq T_g \leq 1473\text{K}$. Такой диапазон является типичным для внутритопочной среды современных котельных агрегатов, работающих на ультракритические параметры пара.

Регистрация процессов тепломассопереноса и воспламенения топливных частицы проводилось высокоскоростной видеокамерой Photron FASTCAM CA4 5 (скорость видеосъемки до 20 000 кад/с). Период времени от начала теплового воздействия (момент ввода частиц в канал цилиндра) до зажигания (появление пламени) считался временем задержки

воспламенения (t_{ign}). Температура окислителя в канале цилиндра контролировалась хромель – алюмелевыми термопарами (диапазон измерений $90 < T_g < 1573\text{K}$, погрешность измерения $\pm 1,5\text{K}$). Систематическая погрешность определения основных измеряемых параметров (T_g, t_{ign}) составляла не более 3%.

Проводились серии экспериментов не менее чем из 15 опытов при идентичных условиях. Доверительный интервал значений t_{ign} при доверительной вероятности 0.95 не превышал 13 %.

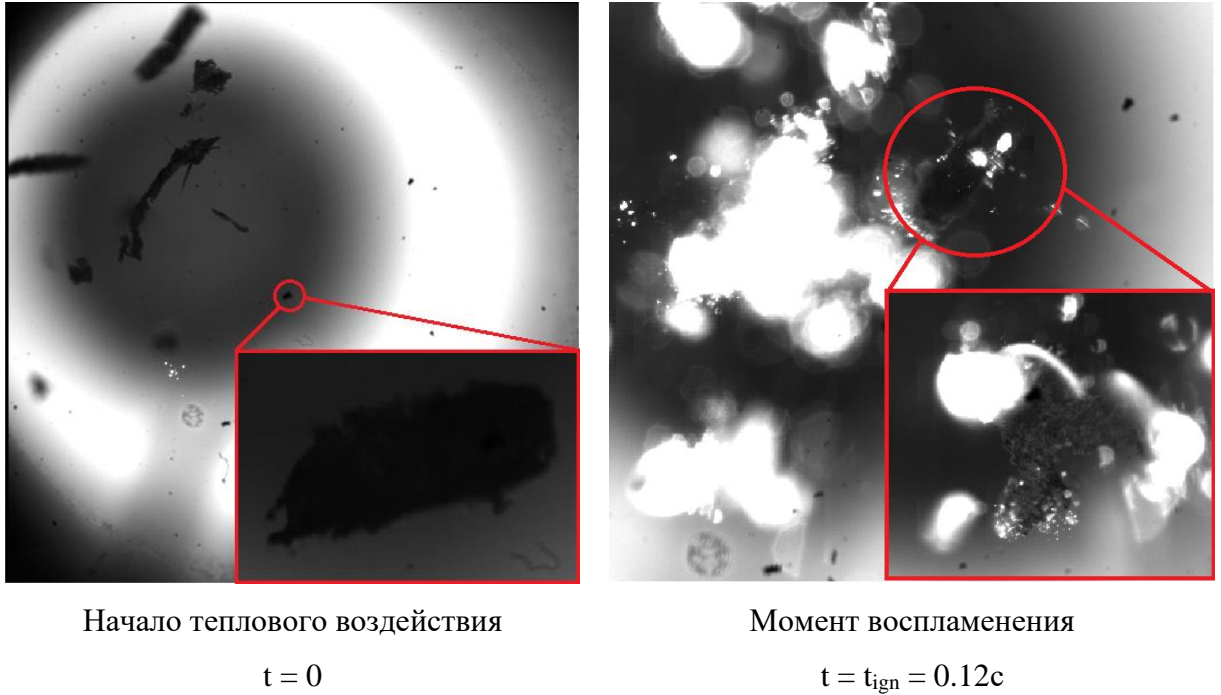


Рисунок 5.1.2. – Кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения био – угольной смеси

На Рисунке 5.1.2 приведены кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения био – угольных (на основе угля и листового опада тополя) смесей в условиях высокотемпературного нагрева в газовой среде. Можно отметить, что в начальный момент времени (момент попадания частиц в пространство высокотемпературную камеру) топливная смесь представляет собой дисперсный поток относительно крупных частиц ЛГМ (до 5 мм) и угольной пыли. При этом можно отметить, что процесс зажигания топлива можно разделить на два взаимосвязанных этапа: сначала (как правило) инициируется воспламенение частиц биомассы. Последние являются своеобразными «ускорителем» термохимической реакции окисления топливной смеси. После зажигания ЛГМ происходит инициирование горения угля. Можно отметить, что период времени между процессами зажигания ЛГМ и угля незначителен (менее 0,001 сек). Соответственно можно сделать вывод, что сжигание

био – угольных смесей можно проводить в одной камере сгорания с использованием общих горелок.

На Рисунке 5.1.3 (*a – z*) приведены экспериментальные зависимости времен задержки воспламенения био – угольных смесей от температуры внешней среды при разных компонентных составах смеси. Можно отметить, что температура внешней среды оказывает достаточно существенное влияние на характеристики и условия воспламенения био – угольных смесей. Так для смесевоего топлива №1 при соотношении уголь/ЛГМ 70/30 увеличение температуры внешней среды от $T_g = 873\text{K}$ до 1273K приводит к уменьшению всего периода индукции с $t_{\text{ign}} = 0,35\text{ с}$ до $t_{\text{ign}} = 0,15\text{ с}$ (более чем в 2 раза). Это, скорее всего, обусловлено существенным и нелинейным влиянием комплекса теплофизических (инертный нагрев за счет конвекции и излучения), аэромеханических (конвективный перенос в пограничном слое частиц) и (наиболее значимых) термохимических (термическое разложение угля и ЛГМ, выход и газофазное воспламенение летучих, зажигание углерода) процессов термической подготовки и зажигания био – угольной смеси в условиях высокотемпературного нагрева.

Анализ зависимостей на Рисунках 5.1.3 (*a – z*) показывает, что концентрация лесного горючего материала может оказывать влияние (существенное для смеси уголь/хвоя и незначительное для композитов типа уголь/листья) на динамику воспламенения топливных смесей. Так для смеси №3 при температуре внешней среды $T_g = 873\text{K}$ увеличение концентрации ЛГМ в смеси с 10% до 40% приводит к сокращению всего периода индукции почти в 2 раза (с 0,45 с до 0,23 с). Последнее, скорее всего, обусловлено тем, что лесной горючий материал, как правило [447], богат по сравнению с углем летучими и процесс термического разложения в ЛГМ протекает интенсивнее чем в угле.

На Рисунке 5.1.4 приведены зависимости времен задержки воспламенения био – угольных смесей от температуры окислителя для разных компонентных составов топлива при идентичных концентрациях. Можно отметить, что компонентный состав оказывает существенно влияние на характеристики и условия зажигания топливной смеси. Но степень такого влияния зависит от температуры внешней среды. В условиях относительно низких значениях $T_g \leq 873\text{K}$ влияние компонентного состава на характеристики и условия воспламенения значительно. При высоких же температурах окислителя такого влияния нет. На основании обобщения результатов выполненных экспериментов, можно сделать вывод, что определяющим фактором в процессе зажигания био – угольных смесей является инициирование горения биомассы.

В целом можно заключить, что применение активирующих (ускоряющих процесс зажигания горения) добавок на основе ЛГМ позволяет существенно повысить потенциал использования энергетических (а в перспективе и низкосортных) углей на тепловых электрических станциях. Также стоит отметить, что применения системы гибкого варьирования составов топливной смеси (изменение концентрации ЛГМ) позволит существенно сократить периоды запуска (при использовании смеси с высоким содержанием ЛГМ) и выхода на базовый режим (минимальное содержание ЛГМ) работы котельного агрегата.

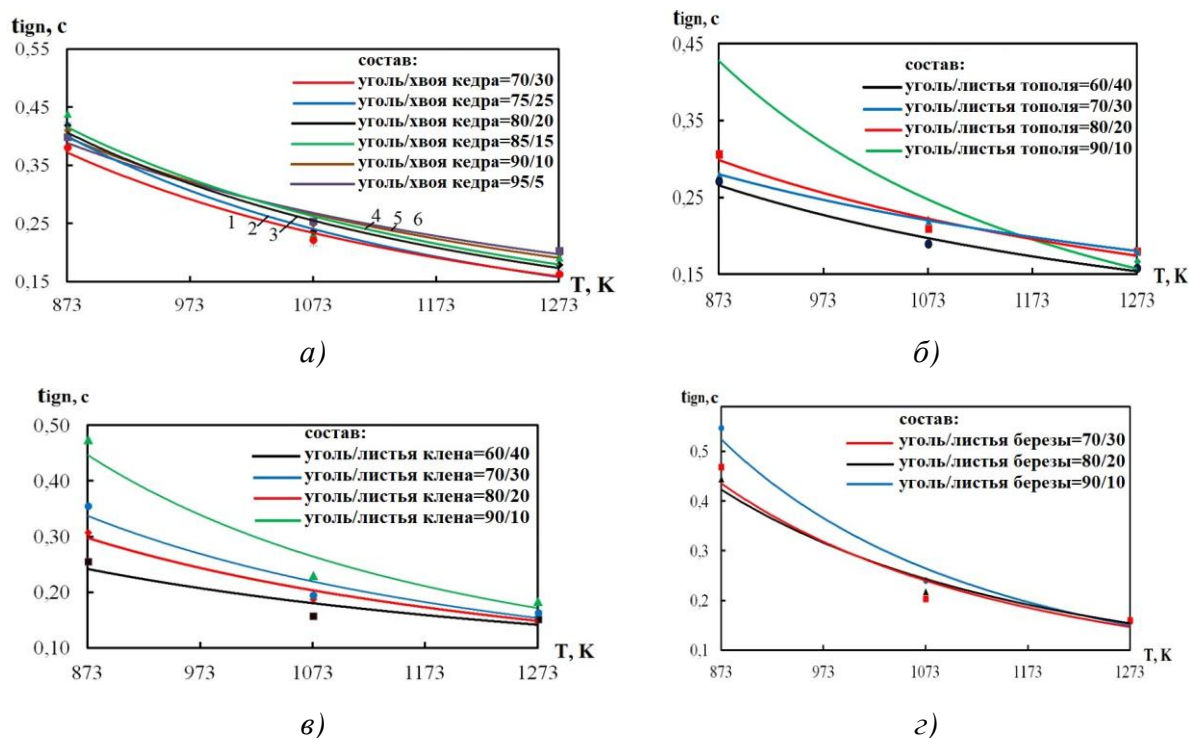


Рисунок 5.1.3 — Времена задержки воспламенения био – угольных смесей при различных температурах внешней среды и концентрациях компонентов смеси.

а – уголь/хвоя кедра; *б* – уголь/листья тополя; *в* – уголь/листья клена; *г* – уголь/листья березы

По результатам проведенных экспериментальных исследований разработана математическая и физическая модели процесса зажигания смеси частиц угля и лесного горючего материала. В начальный момент времени частицы угля и лесного горючего материала (листок, хвоинка) попадают в высокотемпературную газовую среду и нагреваются за счет конвекции и излучения (Рисунок 5.1.5). При этом вследствие разных теплофизических характеристик компонент смеси прогрев частиц каждого топлива происходит неравномерно. В результате нагрева инициируется процесс удаления адсорбционно – связанной влаги и термического разложения ЛГМ с выходом летучих. При этом водяные пары вступают в термохимическое взаимодействие с углеродом. В результате образуются горючие газообразные

продукты реакции (CO и H_2). Они формируют в пограничном слое частицы (малая окрестность вблизи их поверхности) парогазовую смесь, воспламеняющуюся при критических значениях температур и концентраций. Параллельно, но с некоторой задержкой по времени, аналогичные процессы протекают в частицах угля после воспламенения продуктов пиролиза ЛГМ. Через малый (не более 0,001 с) интервал времени происходит зажигание летучих, образовавшихся при термическом разложении угля.

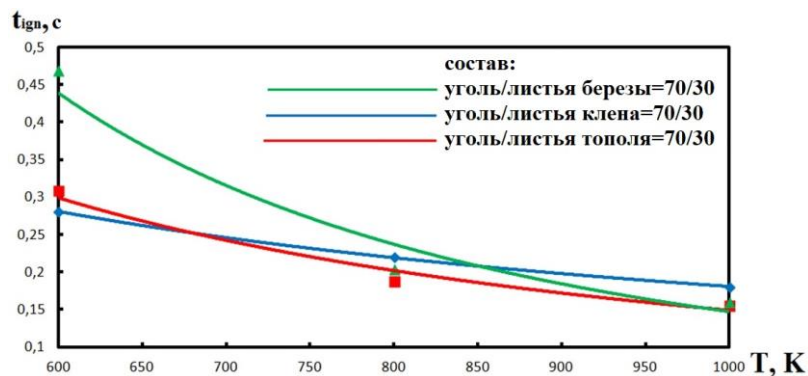


Рисунок 5.1.4 – Зависимость времени задержки зажигания от температуры внешней среды при различных компонентных составах топливных смесей

Математическая постановка задачи воспламенения био – угольного топлива, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных переменных.

Область решения задачи – «частица угля – частица ЛГМ – газовая среда» (рис. 5.1.5). В период термической подготовки частицу угля (или ЛГМ) можно условно разделить на две зоны: исходное (влажное) топливо и сухой твердый каркас. Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии. Оно учитывает кроме процесса теплопроводности удаление влаги, пиролиз ЛГМ и угля, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, а также фильтрационный тепло – и массоперенос.

Математическая постановка задачи воспламенения частиц смеси биомасса/угольное топливо, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных переменных.

При разработке математической модели задачи зажигания принимались следующие допущения:

- 1) Принята двумерная (плоская) математическая модель процессов тепло-массопереноса.
- 2) Влияние гравитационных сил незначительно.

В реальных условиях горения в топках паровых и водогрейных котлов (как известно [448]) частицы угля и древесины не перемещаются в режиме свободного падения. Линии тока топливных частиц практически совпадают с линиями тока несущей среды [449]. Следовательно, силы тяжести не оказывают значимого влияния на траектории угольных и древесных частиц размером в сотни микрон.

3) Форма частиц угля и дерева – куб.

4) Воспламенение потока топливных частиц будет несколько отличаться от воспламенения одиночных (того же размера и конфигурации) частиц того же топлива. Это связано с тем, что частицы, находящиеся в ядре потока, будут нагреваться заведомо медленнее, чем частицы, движущиеся по периферии топливной струи (из – за их затенения от теплового излучения окружающей среды). Но в то же время дисперсная фаза топливной смеси, движущаяся по периферии топливовоздушной смеси, также нагревается (с той же скоростью) как отдельная частица топлива.

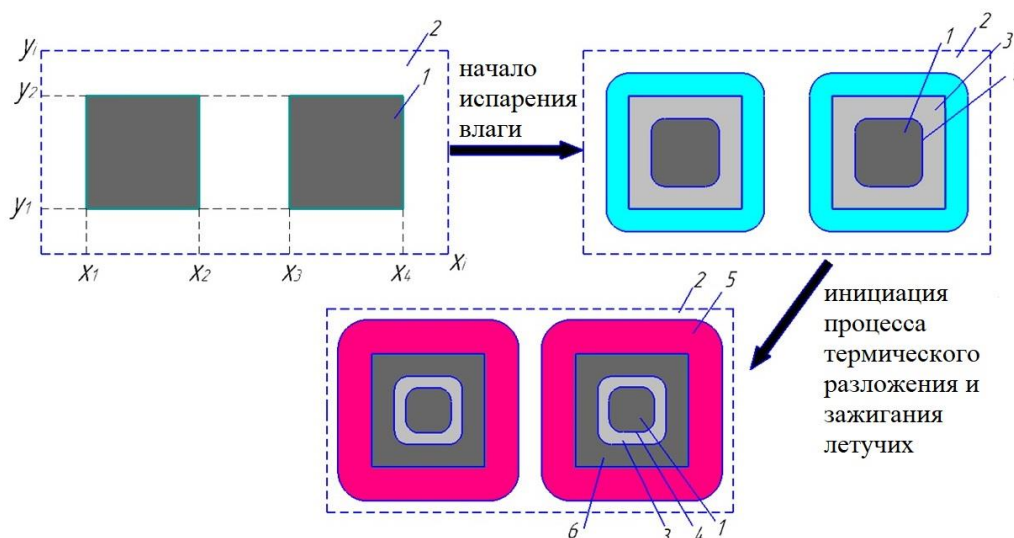


Рисунок 5.1.5 – Схема области решения задачи:

1 – топливная частица; 2 – высокотемпературный окислитель; 3 – сухое топливный каркас; 4 – граница раздела системы «сухое топливо – влажное топливо»; 5 – газобразные продукты пиролиза; 6 – топливо при температуре $T > T_{std}$ (где T_{std} – температура начала термического разложения); 7 – зона термического взаимодействия газобразных продуктов пиролиза с окислителем

По результатам экспериментов установлено, что после зажигания первой (или лидирующей) частицы остальные могут воспламениться практически мгновенно. Соответственно, можно сказать, что временные характеристики воспламенения полидисперсного потока частиц топлива будут немного отличаться от аналогичных характеристик воспламенения одиночных частиц смеси био – угольного топлива.

Область решения задачи – «частица угля – частица биомассы – газовая среда» (Рисунок 5.1.5). В период термической подготовки частицу угля (или ЛГМ) можно разделить на две зоны: исходное (влажное) топливо и сухой твердый каркас. Распределение температуры в такой гетерогенной системе описывается уравнением энергии, описывающего кроме процесса теплопроводности, также удаление влаги, пиролиз, взаимодействие водяного пара и углерода кокса и фильтрационный теплоперенос.

– Уравнение энергии для угольной и древесной частиц и биомассы

$$\begin{aligned} \frac{K_a^m}{Fo_m} \frac{\partial E}{\partial \tau} - C_{gm} P_{gm} \frac{Pe_{gm}}{Dar} \left(\frac{\partial H}{\partial X} \frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\partial H}{\partial Y} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) O(\xi) = \frac{\partial}{\partial X} \left[(\Lambda_m + N_{rc}) \frac{\partial \theta}{\partial X} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial Y} \left[(\Lambda_m + N_{rc}) \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right] - \frac{Ku \cdot \Delta(\xi)}{\Omega^\theta} \frac{d\xi}{d\tau} - \left\{ \sum_{j=1}^{n_1} [Po_{td} (1-\eta) \exp(-Arr_{td})] - \right. \\ \left. - \sum_{i=1}^{n_2} [Po_i^{get} Y_j \exp(-Arr)] \pm \sum_{i=1}^{n_3} \left[Po_i^{gf} \exp(-Arr) \prod_{j=1}^m Y_j \right] \right\} O(\xi) \end{aligned} \quad (5.1.1)$$

$$E = C_m(X, Y, \tau) P_m(X, Y, \tau) \theta(X, Y, \tau)$$

Теплофизические характеристики (Λ_m – теплопроводность, C_m – теплоемкость, P_m – плотность) рассчитывались в соответствии с положением фронта испарения воды. Где $m \rightarrow c$ для угля; $m \rightarrow bio$ – для биомассы. Массовая скорость испарения (W_{eva} [кг/(м²с)]) рассчитывалась из математического выражения закона Кнудсена – Ленгмюра – Герца:

$$W_{eva} = \frac{A(p_{sat} - p)}{\sqrt{2\pi m k_B T}} \quad (5.1.2)$$

При постановке задачи предполагается, что продукты термического разложения движутся через сухой пористый каркас. Распределение давления (H) в частицах угля и биомассы было рассчитано путем решения уравнения пьезопроводимости:

$$\begin{aligned} \frac{K_H^m}{Fo_H} \frac{\partial (PH)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left(X \frac{\partial H}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(X \frac{\partial H}{\partial Y} \right) + \frac{Dar}{\Omega^H} \frac{d\xi}{d\tau} \Delta(\xi) + \\ + \left\{ \sum_{k=1}^{n_1} \left[\frac{Po_k^{td} Dar}{Da_{III} B^H} (1-\eta_k) \exp(-Arr_k) \right] \pm \sum_{i=1}^{n_2} \left[\frac{Po_i^{get} Dar}{Da_{III} B^H} \exp(-Arr_i) Y_j \right] \right. \\ \left. \pm \sum_{i=1}^{n_3} \left[\frac{Po_i^{gf} Dar}{Da_{III} B^H} \exp(-Arr_i) \prod_{j=1}^n Y_j \right] \right\} O(\xi) \end{aligned} \quad (5.1.3)$$

Распределение температуры в тонком слое газа вокруг частиц угля и ЛГМ описывается уравнением энергии. Последнее учитывает экзотермические эффекты реакций окисления основных горючих компонентов воздухом и радиационный теплоперенос:

$$N_R \frac{K_a^m}{F o_c} \frac{\partial E_g}{\partial \tau} + B o \left[\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial E_g}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial E_g}{\partial Y} \right] = N_R \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\Lambda_g \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Lambda_g \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right] \pm$$

$$\pm N_R \sum_{i=1}^n \left[P o_i^{sf} \cdot \exp(-A r r_i) \prod_{j=1}^m Y_j \right] + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial X} + \frac{\partial \Gamma}{\partial Y} \right)$$

(5.1.4)

$$E_g = C_g (X, Y, \tau) P_g (X, Y, \tau) \theta (X, Y, \tau)$$

Скорость газа в пограничном слое частиц вычислялась из решения системы уравнения движений и неразрывности для газовой смеси. Последние решались в переменных «функция тока и вихрь» [418]:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = 2\Omega$$

(5.1.5)

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + Ri \frac{\partial \theta}{\partial X}$$

(5.1.6)

На границе раздела системы «частица топлива (уголь или ЛГМ) – газовая среда» принято граничное условие 4 – го рода. При этом учитывался экзотермический эффект реакции углерода с кислородом воздуха и тепловое излучение внешней среды:

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = K_{\lambda}^{m-g} \frac{\partial \theta}{\partial X} + K i_{\Sigma}$$

(5.1.7)

$$\theta(X, Y, \tau) \Big|_{\substack{X=X_1+0 \\ X=X_2+0}} = \theta(X, Y, \tau) \Big|_{\substack{X=X_2-0 \\ X=X_2-0}}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Y} = K_{\lambda}^{m-g} \frac{\partial \theta}{\partial Y} + K i_{\Sigma}$$

(5.1.8)

$$\theta(X, Y, \tau) \Big|_{\substack{Y=Y_1+0 \\ Y=Y_2+0}} = \theta(X, Y, \tau) \Big|_{\substack{Y=Y_2-0 \\ Y=Y_2-0}}$$

$$K i_{\Sigma} = S k \cdot \left(\Gamma \Big|_{Y=Y_1+0} - \Gamma \Big|_{Y=Y_1} \right) + K i_{C+O_2}$$

Интенсивность радиационного теплопереноса в пограничном слое частиц рассчитывалась из решения уравнения переноса энергии излучения:

$$\frac{\partial \Gamma_g}{\partial N} = -h_{\lambda} \Gamma_g(\bar{N}) + \frac{1}{4\pi} \Gamma_{eff}(\bar{N})$$

(5.1.9)

Процесс термического разложения органической части угля и основных компонентов ЛГМ описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial \tau} = [1 - \eta_i] K_{td-i} (-A r r_i)$$

(5.1.10)

При постановке задачи зажигания принята кинетическая схема воспламенения основных горючих компонентов газообразных продуктов пиролиза древесины и угля (метан – CH_4 ; окись углерода – CO ; водород – H_2), соответствующая схеме воспламенения летучих

по аналогии с §2.1 и §3.1. Концентрации компонентов парогазовой смеси (H_2 , CO , CH_4 , CO_2 и H_2O) в пограничном слое частиц рассчитывались при решении уравнений диффузии для соответствующего компонента реакции:

$$\frac{1}{Fo_{dif}} \frac{\partial P_g \zeta_i}{\partial \tau} + Pe_{dif} \left[U_g \frac{\partial P_g \zeta_i}{\partial X} + V_g \frac{\partial P_g \zeta_i}{\partial Y} \right] = \frac{\partial}{\partial X} \left(P_g D_i \frac{\partial \zeta_i}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(P_g D_i \frac{\partial \zeta_i}{\partial Y} \right) \pm \sum_{i=1}^n \left[\frac{P_o_i^{gf}}{Da_i^m} Le_i \exp(-Arr) \prod_{j=1}^m Y_j \right] \quad (5.1.11)$$

Система уравнений решалась при следующих начальных:

$$t=0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \theta(X, Y, 0) = 0; H(X, Y, 0) = 1 \\ \Pi(X, Y, 0) = \Pi_0; \eta(X, Y, 0) = 0; \\ \theta_g(X, Y, 0) = 1, \\ \zeta_i(X, Y, 0) = 0; \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_1 < x < x_2, x_3 < x < x_4, y_1 < y < y_2 \\ 0 < x < x_1, x_2 < x < x_3, x_4 < x < x_g, 0 < y < y_2; 0 < y < y_1, y_2 < y < y_g, x_1 < x < x_2. \end{array}$$

и граничных условиях:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} \Big|_{\substack{X=0; 0 < Y < Y_g \\ X=X_g; 0 < Y < Y_g}} = 0; \quad (5.1.12)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \Big|_{\substack{Y=0; 0 < X < X_g \\ Y=Y_g; 0 < X < X_g}} = 0; \quad (5.1.13)$$

$$H \Big|_{\substack{Y=Y_1; Y=Y_2; X_1 < X < X_2 \\ X=X_1; X=X_2; Y_1 < Y < Y_2}} = 1; \quad (5.1.14)$$

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial X^2} \Big|_{\substack{X=0; 0 < Y < Y_g \\ X=X_g; 0 < Y < Y_g}} = 0; \quad (5.1.15)$$

$$D_{i \rightarrow air} P_g \frac{\partial \zeta_i}{\partial X} \Big|_{\substack{X=X_1, Y_1 < Y < Y_2 \\ X=X_2, Y_1 < Y < Y_2}} = P_{gm} \frac{N_D}{Da} \frac{\partial H}{\partial X} \Big|_{\substack{X=X_1, Y_1 < Y < Y_2 \\ X=X_2, Y_1 < Y < Y_2}} \quad (5.1.16)$$

$$D_{i \rightarrow air} P_g \frac{\partial \zeta_i}{\partial Y} \Big|_{\substack{Y=Y_1, X_1 < X < X_2 \\ Y=Y_2, X_1 < X < X_2}} = P_{gm} \frac{N_D}{Da} \frac{\partial H}{\partial Y} \Big|_{\substack{Y=Y_1, X_1 < X < X_2 \\ Y=Y_2, X_1 < X < X_2}} \quad (5.1.17)$$

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial Y^2} \Big|_{\substack{Y=0; 0 < X < X_g \\ Y=Y_g; 0 < X < X_g}} = 0; \quad (5.1.18)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \Big|_{\substack{x=x_1; x=x_2; \\ y_1 < y < y_2}} = -\frac{1}{Da} \frac{\partial H}{\partial X} \Big|_{\substack{x=x_1; x=x_2; \\ y_1 < y < y_2}}; \quad (5.1.19)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y \partial X} \Big|_{\substack{x=0; x=X; \\ y_1 < y < y_2}} = 0; \quad (5.1.20)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial X} \Big|_{\substack{y=y_1; y=y_2; \\ x_1 < x < x_2}} = -\frac{1}{Da} \frac{\partial H}{\partial Y} \Big|_{\substack{y=y_1; y=y_2; \\ x_1 < x < x_2}}; \quad (5.1.21)$$

$$\Gamma \Big|_{\substack{x=0; 0 < y < y_g \\ x=x_g; 0 < y < y_g}} = 1; \quad (5.1.22)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X \partial Y} \Big|_{\substack{y=0; y=Y; \\ x_1 < x < x_2}} = 0; \quad (5.1.23)$$

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г. На Рисунке 5.1.6 приведены результаты математического моделирования процесса зажигания частиц био – угольного топлива в условиях выкотемпературного нагрева. Можно отметить, что температура внешней среды оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Увеличение температуры внешней среды на 400К (с 873К до 1273К) приводит к существенному сокращению всего периода индукции (в 2 – 3

раза). Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных зависимостей показывает их хорошее соответствие. Можно сделать обоснованный вывод о достаточно высоком прогностическом потенциале разработанной математической модели.

На Рисунке 5.1.7. приведено температурное поле в системе «частица уголь – частица ЛГМ – высокотемпературная среда» в момент воспламенения частицы лесного горючего материала. Анализ Рисунка 5.1.7 показывает, что зона воспламенения локализуется как правило в зоне вершин куба – частицы. Это скорее всего обусловлено тем, что такие точки являются концентраторами тепловых потоков, в результате температура в них растет значительно быстрее.

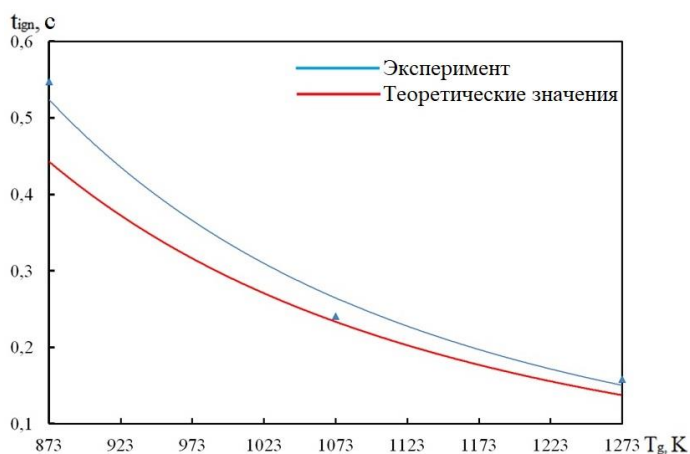


Рисунок 5.1.6 – Зависимость времени задержки зажигания частиц (характерный размер $\delta = 300$ мкм) био – угольного топлива в условиях высокотемпературного нагрева

На Рисунке 5.1.8 приведены температурные поля в системе «частица угля – частица ЛГМ – высокотемпературная среда» в момент зажигания угольной частицы. Можно отметить, что инициирование горения коксового остатка также локализуется в районе граней куба. Можно сделать аналогичный рисунку 5.1.7 вывод о концентрации тепловых потоках в этих точках.

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на динамику процессов термической подготовки и зажигания био – угольных смесей, является влажность лесного горючего материала. При этом влажность свежесрезанной листвы может достигать 60%. Известно [451], что одним из энергозатратных процессов на тепловой электрической станции является сушка топлива. На обезвоживание топлива тратится, как правило, до 2% выработанной тепловой энергии. При этом стоит отметить, что технологическая линейка сушильного оборудования может занимать до 10% от всего внутростанционного пространства. По этой причине наиболее целесообразным проводить процедуру обезвоживания ЛГМ в внутритопочном пространстве котельного агрегата.

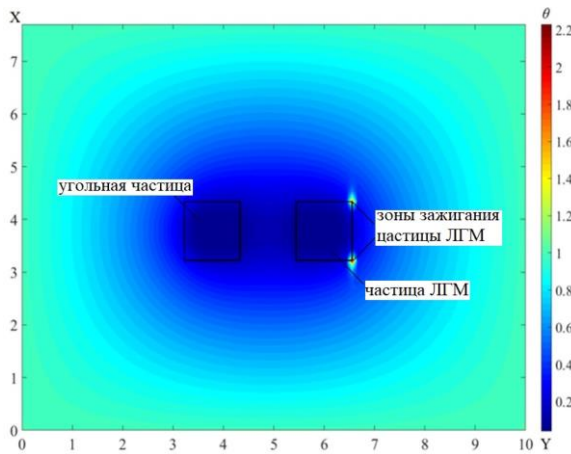


Рисунок 5.1.7 – Безразмерные температурные поля в момент воспламенения частицы лесного горючего материала. Частицы угля и ЛГМ с характерным размером $d = 300$ мкм. Температура внешней среды $T_g = 1473$ К

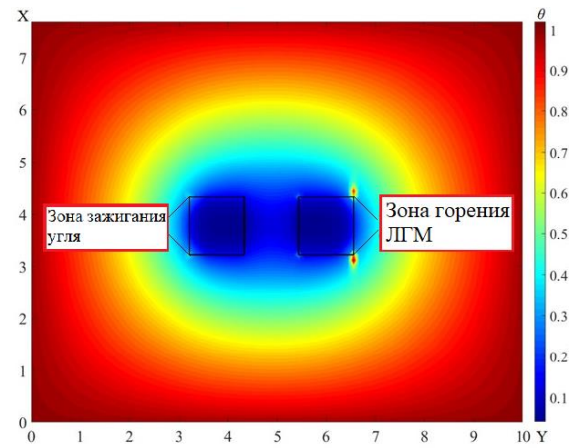


Рисунок 5.1.8 – Безразмерные температурные поля в момент воспламенения частиц лесного горючего материала. Частицы угля и ЛГМ с характерным размером $d = 300$ мкм. Температура внешней среды $T_g = 1473$ К

Однако на настоящее время нет результатов теоретических и экспериментальных оценок влияния влажности лесного горючего материала на характеристики и условия воспламенения био – угольных смесей.

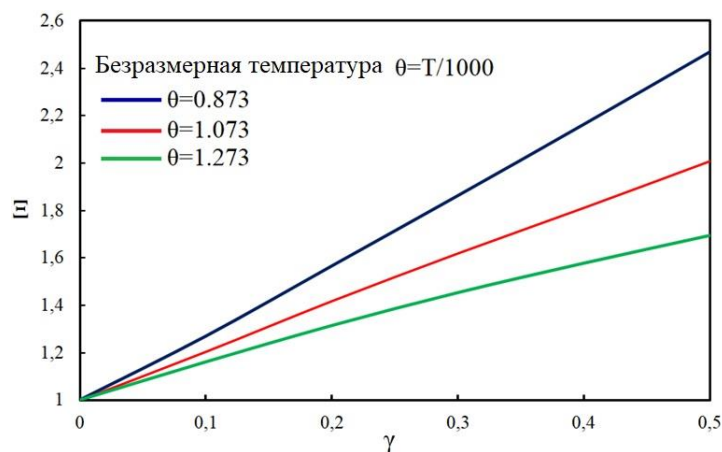


Рисунок 5.1.9 – Зависимость безразмерных времен задержки зажигания Ξ от доли влаги топлива γ

На Рисунке 5.1.9 приведены зависимости безразмерных времен задержки зажигания (Ξ) смесевое топлива от доли влаги (γ), содержащейся в ЛГМ, при различных температурах внешней среды (где: $\Xi = t_{ign}/t_{ign}^0$, t_{ign} – время задержки зажигания влажной частицы, t_{ign}^0 – время задержки зажигания при $\gamma = 0$). Можно отметить, что влажность ЛГМ оказы-

вает достаточно существенное влияние на характеристики и условия воспламенения топливной смеси. Так при доле влаги в топливе 50% имеет место более чем двукратное (в 2,5 раза) увеличение всего индукционного периода при температуре внешней среды $T_g = 873\text{K}$. Можно отметить, что увеличение T_g приводит к снижению эффекта влияния влажности ЛГМ на характеристики воспламенения. Это обусловлено тем, что, как было установлено ранее [151], в условиях высокотемпературного (при $T_g \geq 1073\text{K}$) нагрева высоковлажные топлива могут воспламенятся еще до их полного обезвоживания.

5.2 Влияние расстояния между частицами древесины и угля на характеристики их совместного зажигания

Вышеприведенные исследования посвящены экспериментальному и теоретическому анализу процесса зажигания частиц мелко диспергированных древесно – угольных смесей в условиях их свободного падения в высокотемпературной окислительной среде. В таких условиях практически невозможно определить какое воздействие на друг друга оказывают частицы угля и биомассы в период их термической подготовки. Соответственно, анализа влияния расстояния между топливными частицами на интегральные характеристики их совместного воспламенения не проводилось. По этой причине цель этого параграфа диссертации – экспериментальный и теоретический анализ влияния расстояния между частицами угля и биомассы на временные характеристики их совместного зажигания.

Проведены экспериментальные исследования процессов совместного воспламенения и горения частиц сухого угля и древесины. В экспериментах использовался стенд, схема которого приведена на Рисунке 5.2.1. По методам регистрации основных характеристик (время задержки зажигания t_{ign}) и условий нагрева (температура внешней среды T_g) стенд аналогичен описанному в [151]. В экспериментах использовались два вида топлив: частицы длиннопламенного угля, и древесины (лиственницы). Методика подготовки топлива аналогична приведенной в разделе 5.1 схеме. Каждая частица биомассы крепилась на металлической игле – держателе. Варианты расположения частиц угля и биомассы в камере сгорания приведены на Рисунке 5.2.2.

На Рисунке 5.2.3 приведены кадры типичных видеogramм процессов воспламенения и горения частиц древесно – угольного топлива (с характерным размером $\delta = 3\text{мм}$). Температура внешней среды $T_g = 1073\text{K}$. Время задержки зажигания одиночной частицы древесины $t_{ign} \approx 1,43\text{c}$; частицы угля – $t_{ign} \approx 3,71\text{c}$.

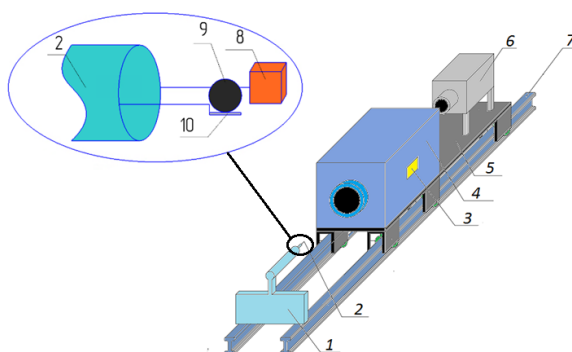


Рисунок 5.2.1 – Схема экспериментальной установки: 1 – подставка для держателя; 2 – металлический держатель; 3 – табло управления; 4 – высокотемпературная печь; 5 – передвижная платформа; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – рельсы; 8 – частица древесины; 9 – частица угля; 10 – держатель

Как показывают эксперименты совместное воспламенение частиц древесно – угольного топлива происходит, как правило, в два этапа. На первом этапе происходит газофазное воспламенение частицы древесной биомассы. В результате существенно интенсифицируется нагрев частицы угля. Последнее приводит к ускорению процесса термического разложения органической части угля и, соответственно, выхода летучих. При достижении критической концентрации горючего в малой окрестности частиц происходит их газофазное воспламенение.

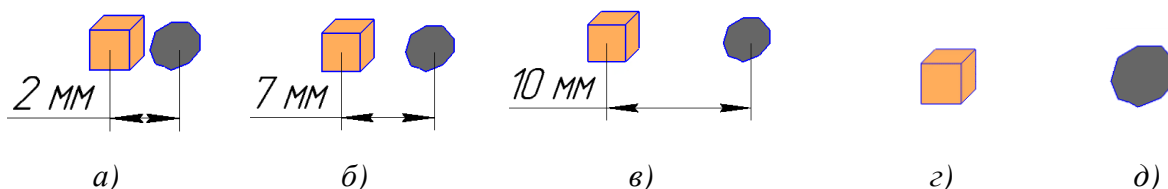


Рисунок 5.2.2 — Варианты расположения частиц древесно – угольного топлива в камере экспериментальной установке:

г – частица биомассы; д – частица угля

Стоит отметить, что воспламенение частицы древесины также протекает в несколько взаимосвязанных стадий. Каждую из них можно охарактеризовать доминированием одного конкретного физического процесса (инертный нагрев, испарение воды, термическое разложение органической части топлива, воспламенение, горение летучих, зажигание и горение коксового остатка).

На Рисунке 5.2.4 а – в приведены зависимости времен задержки зажигания (t_{ign}) частиц древесины и угля (как по отдельности, так и в составе древесно – угольно смеси) от температуры внешней среды. Анализ зависимости показывает, что температура окислителя

оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. При этом стоит отметить, что зависимости $t_{ign}(T_g)$ нелинейная. Это обусловлено существенным влиянием комплекса совместно – протекающих теплофизических (инертный радиационно – конвективный нагрев, испарение внутрипоровой и адсорбционно – связанной влаги) и термохимических (термическое разложение органической части угля и основных компонентов древесины, воспламенение летучих) процессов термической подготовки и воспламенения частиц

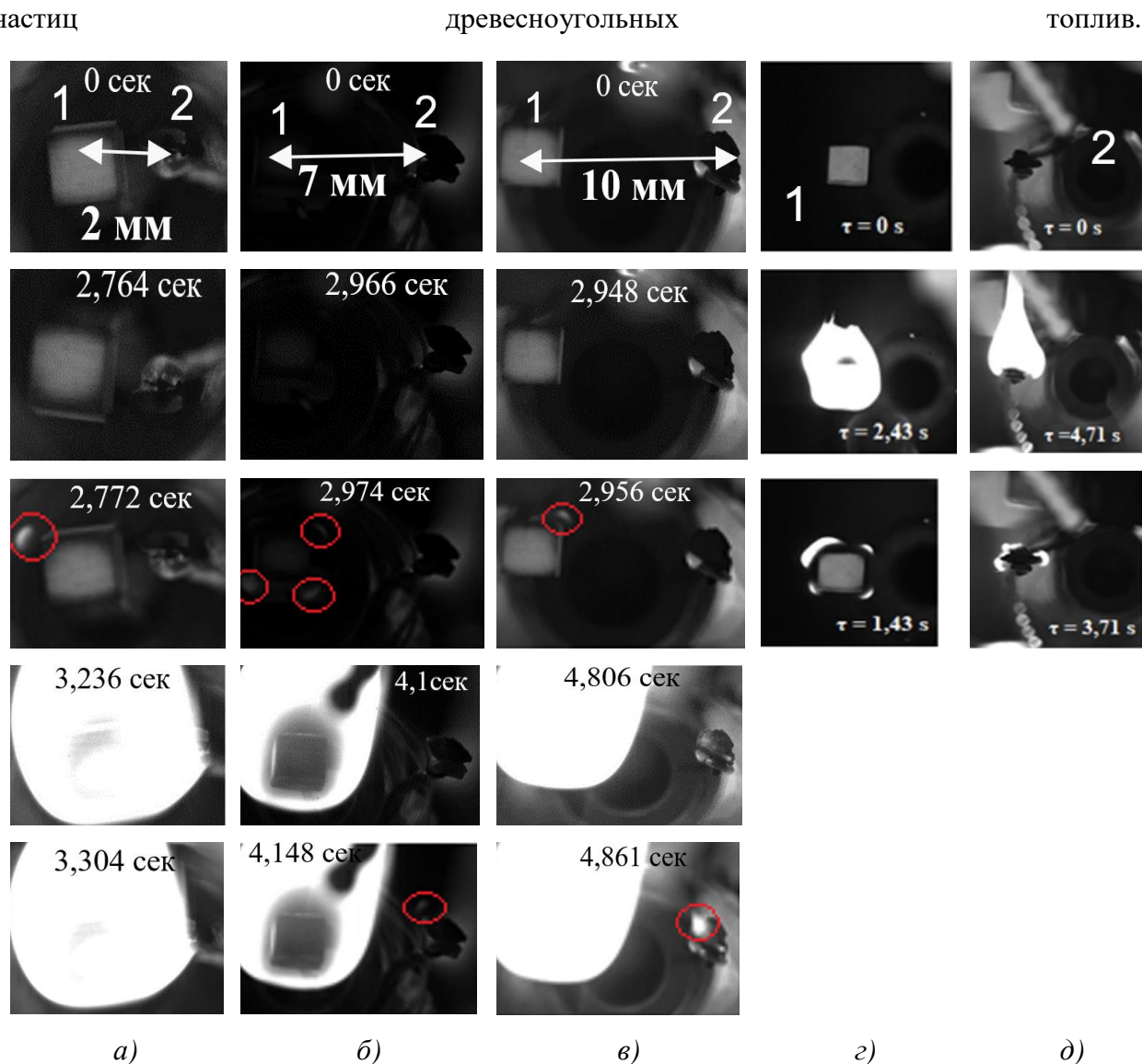


Рисунок 5.2.3 – Типичные кадры процесса воспламенения частиц древесины и угля при $T_g = 1073\text{K}$. 1 – частица древесины; 2 – частица угля. Обозначение кадров соответствует схеме, приведенной На Рисунке 5.2.2

Также анализ зависимостей на Рисунке 5.2.4 показывает, что одиночные древесные частицы практически всегда зажигаются раньше угольных. Но при этом по результатам экспериментов установлено, что при расстоянии между частицами $d = 7\text{мм}$ (схема – a (Рисунок 5.2.1)) в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g \approx 873\text{K}$) времена

задержки зажигания частиц угля и биомассы сопоставимы. Это, скорее всего, обусловлено тем, что в условиях низкотемпературного нагрева ($T_g \approx 873\text{K}$) процесс термического разложения угля и древесины протекает относительно медленно. По этой причине газообразные продукты пиролиза как угля, так и древесины успевают выйти и сформировать общую зону газофазного реагирования с окислителем. В результате после зажигания древесной частицы происходит быстрое (практически мгновенное) воспламенение угля.

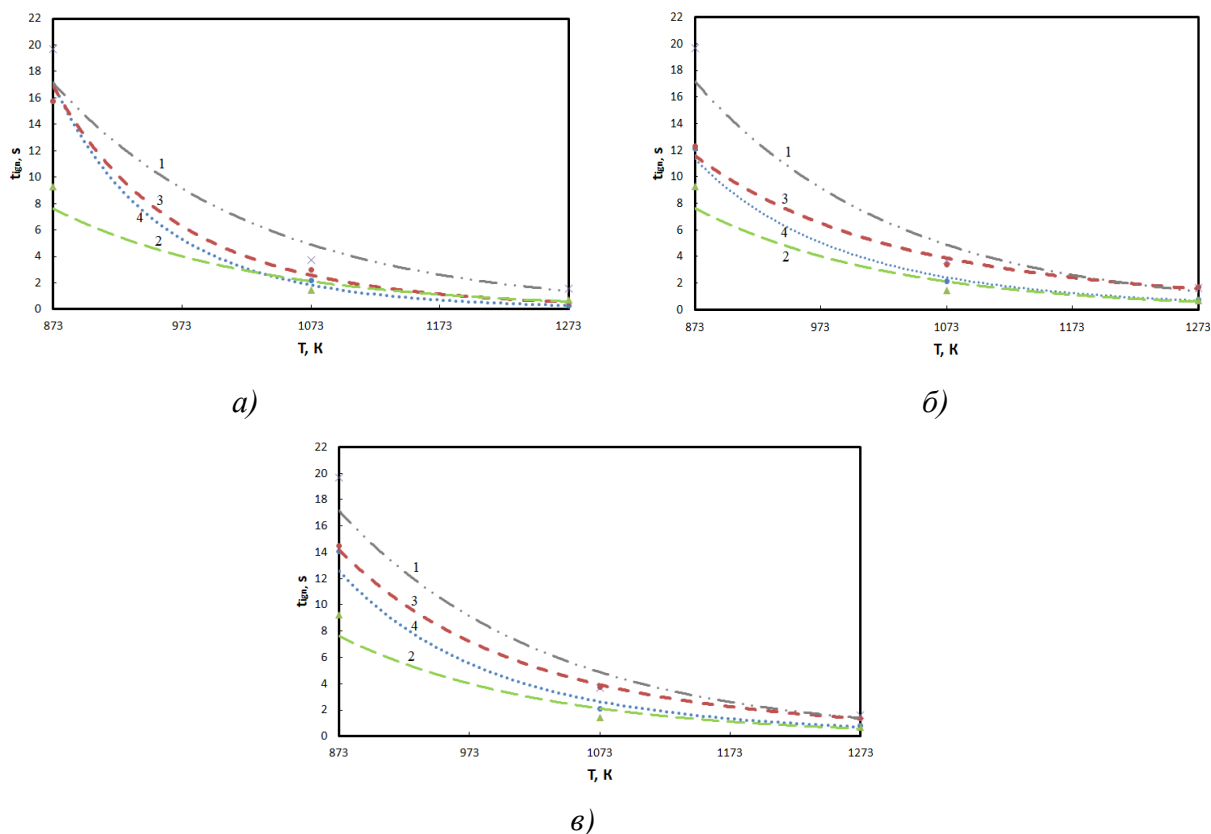


Рисунок 5.2.4 – Зависимости времён задержки зажигания частиц угля и биомассы от температуры окружающей среды при различных вариантах расположения частиц. Обозначения рисунков (*a* – *в*) соответствуют обозначениям, приведенным На Рисунке 5.2.2:

1 – одна частица угля, 2 – одна частицы древесины, 3 – частица угля при совместном зажигании древесина/уголь, 4 – частица древесины при совместном зажигании древесина/уголь

Также стоит сказать, что при нагреве в условиях относительно низких температур ($T_g \leq 873\text{K}$) окислителя значения t_{ign} частиц угля и биомассы в составе смеси находятся в диапазоне между временами задержки зажигания одиночных частиц угля t_{ign}^{coal} и древесины t_{ign}^{wood} (где значения t_{ign}^{wood} и t_{ign}^{coal} являются нижней и верхней оценками времен задержки воспламенения).

Анализ зависимостей $t_{\text{ign}}(T_g)$ при низких температурах внешней среды позволяет сделать вывод, что в условиях совместного сжигания частицы угля и древесины оказывают существенное влияние на динамику воспламенения друг друга. Можно сказать, что частица древесины существенно ускоряет процесс зажигания угольной частицы, в тоже время последняя существенно замедляет зажигание древесины. Увеличение температуры окислителя приводит к тому, что времена задержки зажигания частиц угля и древесины в составе смеси становятся сопоставимы со значениями t_{ign} одиночных частиц угля и древесины, соответственно. Также стоит сказать, что анализ зависимостей, приведенных на Рисунке 5.2.4 показывает, что расстояние между частицами угля и биомассы оказывает существенное влияние на характеристики и условия зажигания.

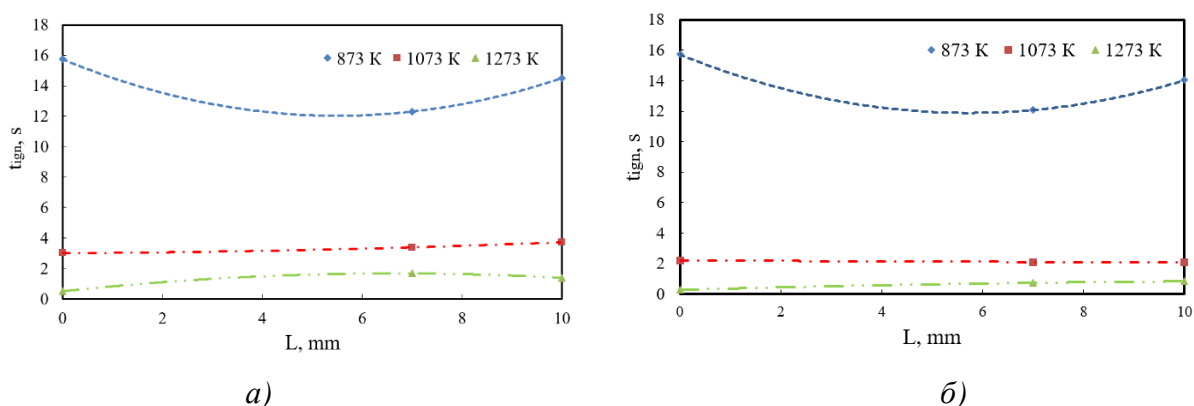


Рисунок 5.2.5 – Зависимости времён задержки зажигания частицы угля (*a*) и древесины (*б*) от среднего расстояния между ними при разных температурах окружающей среды

На Рисунке 5.2.5 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц угля (Рисунок 5.2.5 *a*) и биомассы (Рисунок 5.2.5 *б*) от расстояния между частицами при различных температурах внешней среды. Анализ зависимостей показывает, что в условиях относительных низких температур значение L оказывает существенное влияние на t_{ign} . Можно отметить, что при $T_g = 873\text{K}$ зависимость $t_{\text{ign}}(d)$ параболическая. Другими словами, существует некоторое оптимальное (по условиям зажигания) расстояние между частицами топлива. Тенденция характерна при зажигании как угольной, так и древесной частиц. С увеличением температуры внешней среды влияние расстояния между частицами на характеристики их зажигания существенно уменьшается.

Математическая модель состоит из системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процессы термической подготовки и зажигания, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение внутрипоровой и адсорбционно – связанной влаги) и термохимических (термической разложение органической части угля и основных компонентов древесины, термохимическое взаимодействие газообразных

и твердых продуктов пиролиза с окислителем) превращений в период индукции. По своей структуре уравнений математической физики и методам их решения модель аналогична приведенной ранее в разделе 5.1. С целью верификации математических моделей воспламенения частиц древесно – угольного смесового топлива проведен сравнительный анализ характерных времен задержки зажигания, полученных теоретически и экспериментально.

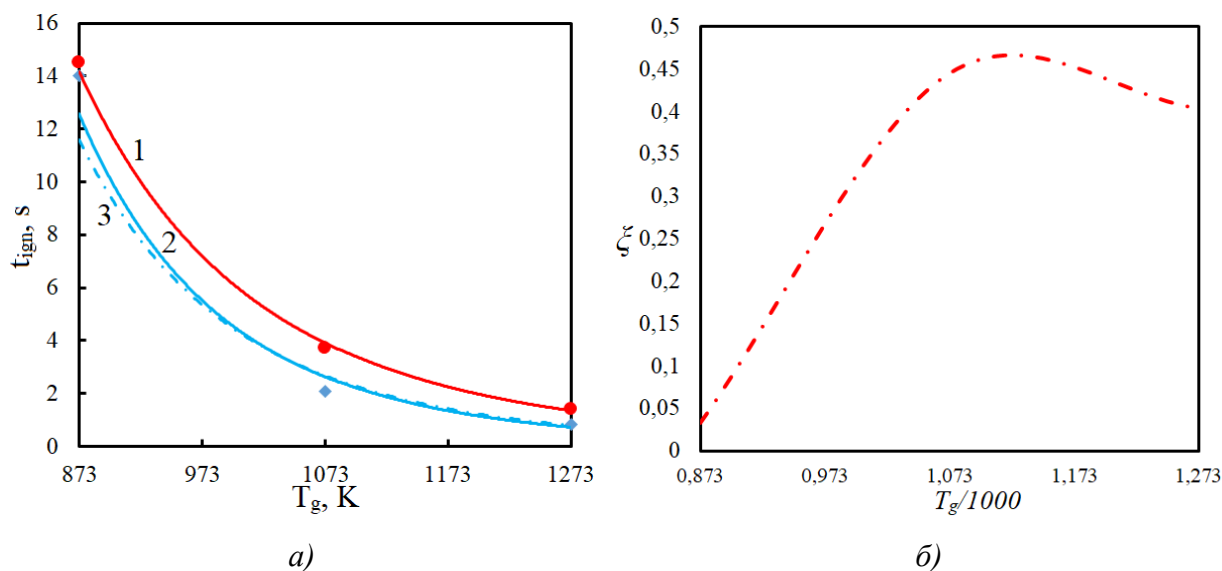


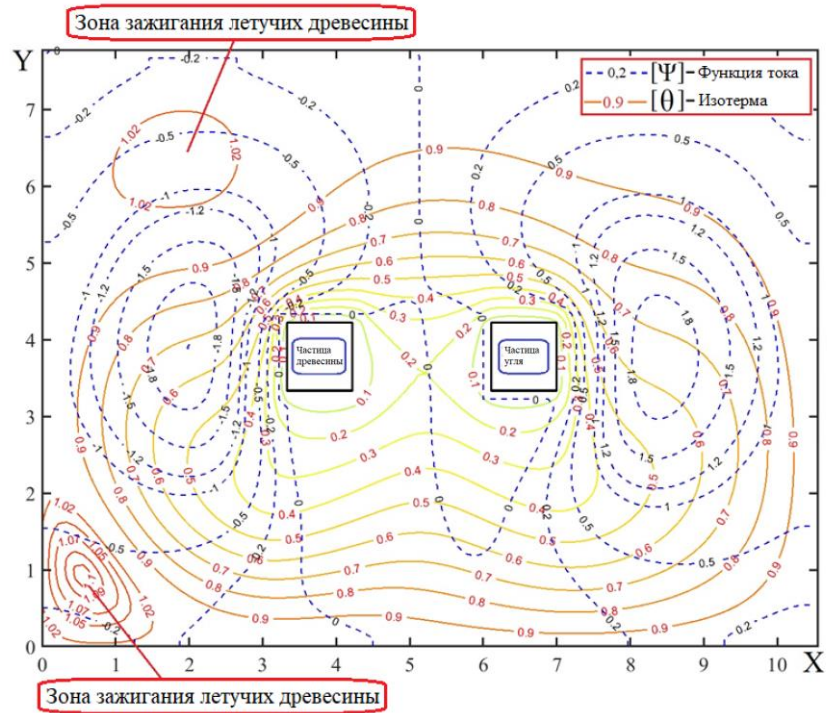
Рисунок 5.2.6 – Зависимости времен задержки зажигания (а) и безразмерного значения интервала времени между зажиганием частиц угля и древесины (б) от размерной и безразмерной температур, соответственно

На Рисунках 5.2.6 (а, б) приведены зависимости времен задержки воспламенения частиц древесно – угольной смеси в условиях высокотемпературного нагрева. Сравнительный анализ экспериментальных и полученных по результатам численного моделирования значений t_{ign} показал их хорошее соответствие. Отличие теоретических и экспериментальных значений времен задержки зажигания не превышает 8,5%. Можно отметить существенно нелинейный характер зависимостей $t_{ign}(T_g)$. Это обусловлено влиянием комплекса теплофизических и термохимических процессов протекающих в условиях интенсивных фазовых превращений (испарение свободной влаги древесины) в индукционный период времени.

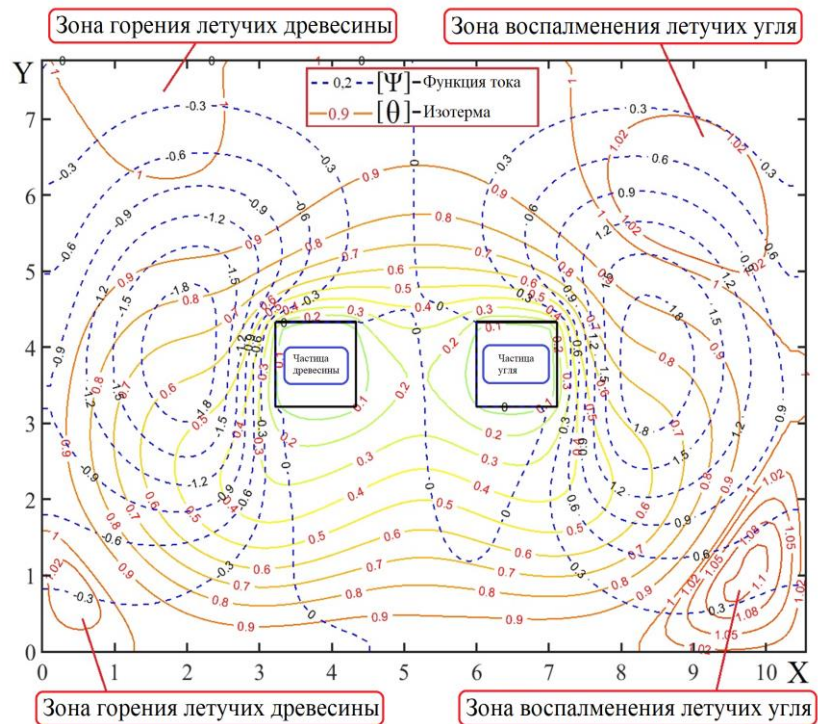
Анализ зависимостей на Рисунке 5.2.6 а показывает, что угольные частицы всегда воспламеняются позже древесных (древесина более реакционное топливо). При это стоит отметить, что интервал времени между моментами зажигания частиц древесины и угля достаточно большой и составляет от 0,5 до 1,5 секунды. Можно сказать, что период времени между зажиганиями частицы угля и биомассы ($t_{br} = t_{ign}^{coal} - t_{ign}^{bio}$) снижается с уменьше-

нием температуры. Это хорошо видно из Рисунка 5.2.6б, на котором приведены зависимости безразмерных значений временных периодов $\zeta = (t_{ign}^{coal} - t_{ign}^{bio})/t_{ign}^{bio}$ (где t_{ign}^{bio} – время задержки зажигания биомассы, t_{ign}^{coal} – время задержки зажигания частицы угля) от безразмерной температуры внешней среды $\theta = T_g/1000$. Уменьшение ζ при снижении T_g , скорее всего, обусловлено тем, что в условиях относительно высоких $T_g > 1073$ К температур происходит быстрый прогрев биомассы. В результате процесс термического разложения также протекает в условиях быстрой термохимической трансформации основных компонентов древесины (целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина) в кокс. Это приводит к быстрому воспламенению летучих в малой окрестности частицы древесины. При температурах $T_g \leq 873$ К термическое разложение (древесины и угля) протекает относительно медленно, поэтому газообразные продукты пиролиза как угля, так и биомассы успевают распространиться по всему пространству и, соответственно, сформировать общую зону газофазного термохимического реагирования летучих с окислителем. В результате зажигание частицы угля происходит практически сразу ($t_{br} \rightarrow 0$) после воспламенения древесины.

На Рисунках 5.2.7 а, б приведены температурные поля и изолинии функции тока в момент воспламенения частиц биомассы (Рисунок 5.2.7 а) и угольного топлива (Рисунок 5.2.7 б). Можно отметить, что зажигание частицы биомассы происходит на значительном расстоянии $L = 1$ (где $L = l/\delta$; l – расстояние от поверхности частицы до зоны воспламенения летучих, м; δ – характерный размер частицы древесины, $\delta = 3$ мм) от поверхности частицы древесины. Соответственно можно сказать, что применение метода приведённой пленки (по аналогии с [324]) при моделировании процесса зажигания частиц древесно – угольной смеси необоснованно. Анализ приведенных на Рисунках 5.2.7 изолиний функции тока показывают, что в малой окрестности частиц древесно – угольной смеси образуется сложная структура течений с нисходящими (у поверхности частиц) и восходящими (на некотором расстоянии от поверхности) потоками смеси паров, газов и окислителя. При этом можно отметить, что в нижней полусфере частиц топлива температура внешней среды существенно снижается. Но в то же время воспламенение происходит именно в этой зоне. Это, скорее всего, обусловлено тем, что в процессе термической подготовки летучие, выходящие из частицы древесины «увлекаются» нисходящим относительно холодным потоком воздуха и аккумулируются под частицами топлива. В результате при достижении необходимых (по условиям воспламенения) концентраций и температур происходит зажигание парогазовой смеси.



а)



б)

Рисунок 5.2.7 – Безразмерное температурное поле (θ) и значения функций тока (Ψ) в момент воспламенения газообразных продуктов пиролиза древесины (а) и угля (б)

На Рисунках 5.2.8 (а – г) приведены поля интенсивности излучения (Γ) и концентрации водяного пара (H_2O) в малой окрестности частиц топлива в момент воспламенения газообразных продуктов пиролиза древесины при различных значениях влагосодержания (φ) древесины. Можно отметить, что максимум интенсивности излучения сконцентрирован в

области интенсивного термохимического реагирования летучих с окислителем. Это обусловлено существенным увеличением температуры в этих областях. Также стоит сказать, что $\max(\Gamma)$ соответствует максимальным значениям концентрации H_2O в малой окрестности частиц древесины и угля. При этом можно отметить, что увеличение φ приводит к увеличению интенсивности излучения. Это обусловлено вдвум водяных паров (H_2O) в пристенную область частиц топлива в период термической подготовки (испарения внутрипоровой воды). В результате повышения концентраций паров H_2O (другими словами трехатомного газа) существенно возрастает и лучеиспускательная способность парогазовой смеси в пограничном слое топливных частиц.

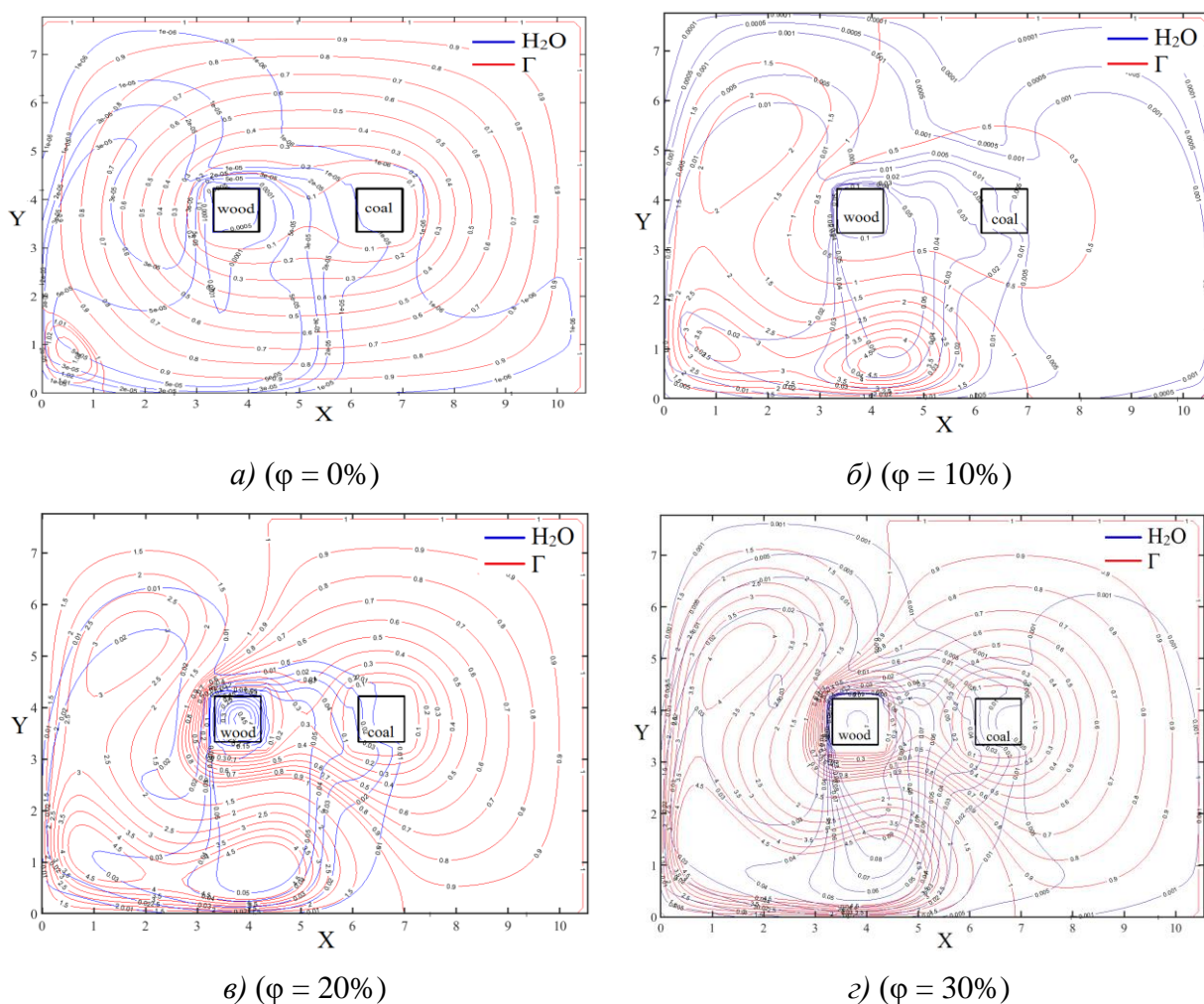


Рисунок 5.2.8 – Поля интенсивности излучения и концентрации водяного пара в малой окрестности частицы в момент воспламенения

В результате горения летучих существенно интенсифицируется нагрев угольной частицы. Это приводит к интенсификации термического разложения органической части угля и, соответственно, выходу летучих угля и их воспламенению. Одним из важнейших факто-

ров, влияющих на технико – экономическое обоснование основных конструктивных параметров (размеры, конфигурация, режимы подачи котлового воздуха) топочных и горелочных устройств котельных агрегатов является динамика температур частиц топлива в условиях их высокотемпературного нагрева.

На Рисунке 5.2.9 приведены зависимости безразмерных среднеобъемных температур частиц угля ($\theta_{\bar{V}}^c$) и древесины ($\theta_{\bar{V}}^w$) от безразмерных времен $\xi = t/t_{ign}$ в условиях их высокотемпературного нагрева.

$$\text{где } \theta_{\bar{V}}^i = \frac{1}{V_i} \iiint_0^{V_i} \theta(X, Y, Z, Fo) dV$$

$\theta = T_i/T_g$; T_g – температура внешней среды, К; V_i – объем частицы топлива ($i = c$ – частица угля; $i = w$ – частица древесной биомассы). Анализируя зависимости $\theta_{\bar{V}}^i(\xi)$ можно отметить, что в условиях высокотемпературного нагрева частицы угля и биомассы прогреваются практически идентично (различие между значениями $\theta_{\bar{V}}$ незначительно). Это обусловлено тем, что при температурах внешней среды $T_g \geq 1273\text{К}$ времена задержки зажигания малы и, соответственно, влияние различий теплофизических характеристик (ТФС) – теплопроводности, плотности и теплоемкости на динамику воспламенения незначительно. С уменьшением T_g влияние ТФС становится более значимым.

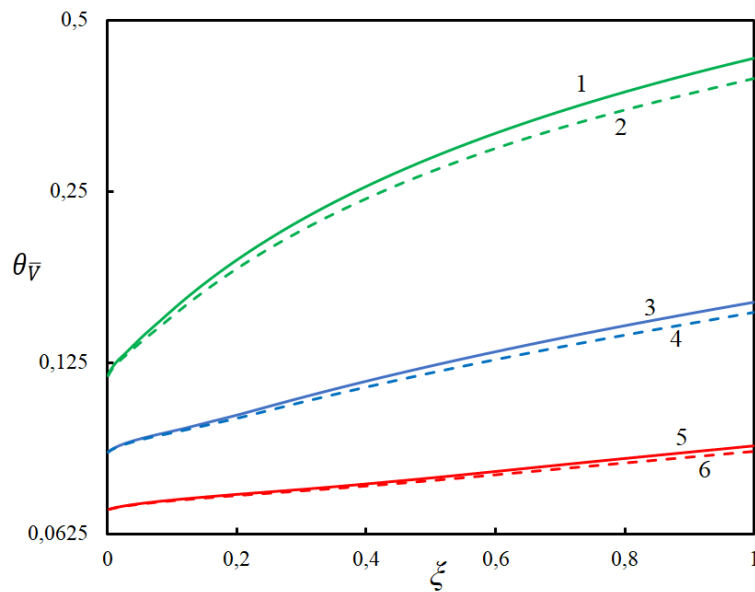


Рисунок 5.2.9 – Зависимости среднеобъемных температур частиц угля ($\theta_{\bar{V}}^c$) и древесины ($\theta_{\bar{V}}^w$) от безразмерного времени (ξ) в период термической подготовки при температурах внешней среды: 1,2 – $T_g = 873\text{ К}$; 3,4 – $T_g = 1073\text{ К}$; 5,6 – $T_g = 1273\text{ К}$; 1, 3, 5 – частица биомассы; 2, 4, 6 – частица угля

Одним из важнейших параметров, влияющих на выбор конструктивных характеристик котельного агрегата являются длительности стадий термической подготовки (или период прогрева (t_{heat}), в соответствии с терминологией [315]) и индукции (t_{ind} – непосредственное реагирование газообразных продуктов пиролиза с окислителем). Достоверные сведения о значениях t_{heat} и t_{ind} (соответственно время задержки зажигания – $t_{\text{ign}} = t_{\text{heat}} + t_{\text{ind}}$) позволят обосновано выбирать (выделяя зоны термической подготовки, зажигания и горения топлива) конструктивные характеристики (форма и размеры топки) камер сгорания котельных агрегатов, сжигающих древесно – угольные смеси.

Также стоит сказать, что помимо прикладного значения выделение периодов t_{heat} и t_{ind} имеет и глубоко фундаментальный характер. По результатам анализа значения симплекса $K_t = t_{\text{heat}}/t_{\text{ind}}$ можно сделать вывод о значимости влияния процесса непосредственного термохимического реагирования окислителя и горючего при зажигании топлива. С целью проведения такого асимптотического анализа введен в рассмотрение параметр:

$$\aleph = |\tilde{\Upsilon} - \Upsilon|$$

где

$$\Upsilon = \frac{d\tilde{\theta}_g}{d\xi}$$

$\tilde{\theta}_g$ – средняя температура газа в малой окрестности частиц топлива:

$$\tilde{\theta}_g = \frac{1}{V_g} \iiint_0^{V_g} \theta(X, Y, Z, Fo) dV$$

где V_g – объем слоя (кубической формы) газа вокруг частиц ($V_g = 672 \cdot d^3$, где d – характерный размер частиц топлива). На Рисунке 5.2.10 приведены зависимости параметра \aleph от безразмерного времени. Минимум ($\min(\aleph)$) кривой $\aleph(\xi)$ соответствует моменту воспламенения частиц древесноугольной смеси. Анализ приведенных на Рисунке 5.2.10 зависимостей $\aleph(\xi)$ показывает, что длительность периода термической подготовки к воспламенению (включающего комплекс протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение внутрипоровой и абсорбционно – связанной влаги) и термохимических (термическое разложение органической части угля и основных компонентов древесины) превращений процессов) составляет около $0.89 \cdot t_{\text{ign}}$. Соответственно, длительность периода индукции $t_{\text{ind}} = 0.11 \cdot t_{\text{ign}}$. Другими словами, период прогрева топлива составляет большую часть времени задержки зажигания. В этом случае можно сказать, что подавляющее влияние на динамику воспламенения оказывают комплекс процессов, предшествующих непосредственному воспламенению (термохимическому реагированию горючего и окислителя) или другими словами интенсивный нагрев. Соответственно, можно сказать, что химическая кинетика (или

кинетическая схема: одностадийная или многостадийная) газофазного реагирования основных компонентов летучих и окислителя оказывает незначительное влияние на результаты моделирования динамики зажигания.

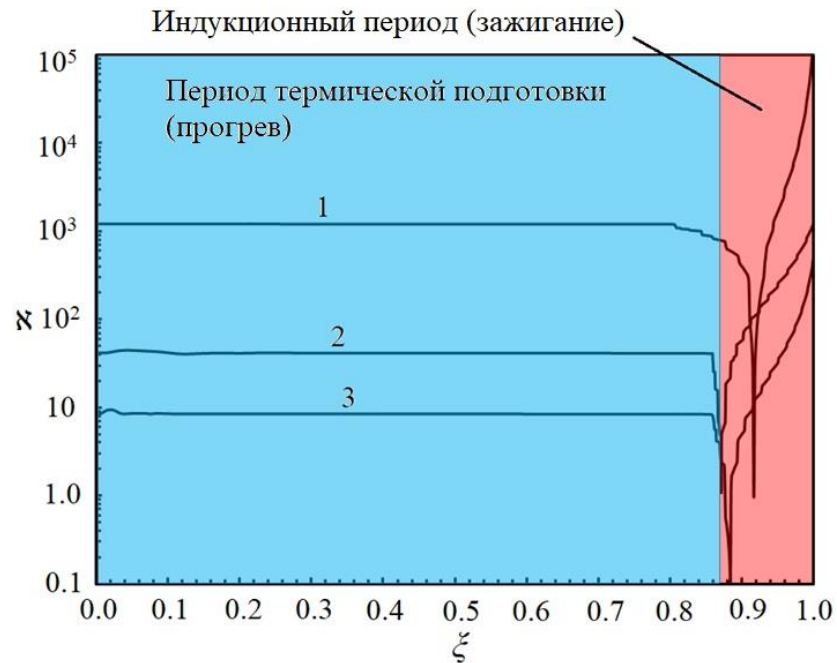


Рисунок 5.2.10 – Зависимости асимптотического параметра X от безразмерного времени ζ при разных температурах внешней среды: 1 – $T_g = 1273\text{K}$; 2 – $T_g = 1073\text{K}$; 3 – $T_g = 873\text{K}$

Выводы по пятой главе

1. Обоснована возможность использования лесного горючего материала в качестве компонента топлива для энергетики. Показано, что увеличение концентрации ЛГМ в топливной смеси, приводит к существенному уменьшению всего периода индукции.
2. Разработана прогностическая математическая модель физико – химических процессов, протекающих при нагревании частицы био – угольного топлива, учитывающая комплекс процессов термической подготовки. Эта математическая модель отличается от известных тем, что описывает нестационарные распределения основных характеристик процессов тепло-массопереноса в частице древесины и в ее малой окрестности в условиях конвективного и лучистого теплообмена с внешней высокотемпературной средой.
3. По результатам экспериментальных исследований установлены времена задержки зажигания частиц угля и биомассы в условиях их совместного (в одной камере сгорания) воспламенения в высокотемпературной среде. Показано, что частицы оказывают существенное

влияние на характеристики и условия воспламенения друг друга. Установлено, что в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g = 873\text{K}$) добавление древесины к углю существенно ускоряет процесс зажигания последнего (в среднем на 20 – 30%), по сравнению с процессом воспламенения однородного угля. Также установлено, что при $T_g = 873\text{K}$ угольная частица существенно замедляет (в среднем на 30%) процесс воспламенения древесины. Результаты экспериментов также показали, что увеличение температуры внешней среды приводит к тому, что интегральные характеристики зажигания частиц древесины и угля в составе смеси становятся сопоставимы со временами задержки зажигания таких же (по природе) отдельных частиц. Анализ влияния расстояния между частицами угля и древесины на динамику воспламенения показал, что значение d оказывает существенное влияние на скорость воспламенения. Показано, что при $T_g = 873\text{K}$ есть оптимальное (по условиям зажигания) среднее расстояние ($d \approx 5 - 6$ мм) между топливными частицами, при котором $t_{\text{ign}} \rightarrow \min(t_{\text{ign}})$.

4. По результатам экспериментов разработана математическая модель процесса совместного воспламенения частиц древесины и угля. Математическая модель, отличается от известных, наиболее полным описанием процессов термической подготовки, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение свободной и адсорбционно – связанной влаги) и термохимических (термическое разложение органической части угля и древесины, термохимическое взаимодействие газообразных продуктов пиролиза и
5. Асимптотический анализ показал, что весь период воспламенения можно условно разделить на два этапа: период термической подготовки к зажиганию и непосредственное термохимическое реагирование. При этом период термической подготовки занимает около 90% от всего значения t_{ign} . Соответственно можно сделать обоснованный вывод о том, что на условия зажигания смесового топлива в первую очередь оказывают влияние на динамику воспламенения процессы тепло – и массопереноса, протекающие в период времени, предшествующий зажиганию. Химическая кинетика процессов взаимодействия газообразного горючего и кислорода воздуха оказывает существенно менее значимое влияние на численное значение времен задержки воспламенения.

Основные результаты главы 5 опубликованы в [158, 166, 167, 169].

ГЛАВА 6 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К СЕКВЕСТИРОВАНИЮ ОКСИДОВ АЗОТА И СЕРЫ ПРИ ВОСПЛАМЕНЕНИИ ЧАСТИЦ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ

В настоящее время становится очевидным, что скорее всего, сложносоставные экологически эффективные композиционные топлива – будущее теплоэнергетики. К таким топливам можно отнести водоугольные, био – водоугольные топлива и смеси биомасса/уголь. По мнению многих специалистов самыми перспективным из них являются смеси биомассы (например, древесина) и угля – древесно – угольные топлива (ДУТ). Известно, что к настоящему времени в Европейском союзе более чем на 100 тепловых электрических станциях проводились более или менее успешные попытки сжигания в топочных устройствах котельных агрегатов смесевых топлив биомасса/уголь. Такое внимание энергетиков развитых государств к смесевым топливам обусловлено их существенными экологическими преимуществами (значительно меньше концентрации оксидов серы и азота в газообразных продуктах сгорания) перед «традиционным» однородным углем, отказаться от использования, которого на более чем 35% электростанций мировое сообщество не может. Однако, до настоящего времени еще не разработана единая теория и обеспечивающий ее математический аппарат прогнозирования физико – химических и теплофизических процессов, протекающих в начальный период горения в частицах ДУТ и их малой окрестности.

В этой главе диссертации представлены наиболее детальная (по описанию комплекса теплофизических и термохимических процессов) физические и математические модели воспламенения частиц смеси угля и древесины. Последняя должна обеспечивать возможность теоретического обоснования установленных при проведении экспериментальных исследований многими авторами закономерностей – существенное снижение концентрации оксидов серы и азота в продуктах сгорания древесно – угольных топлив (дымовых газах котельных агрегатов ТЭС).

6.1 Математическое моделирование термохимических процессов секвестирования оксидов серы при горении частиц смеси угля и древесины

Известно [452], что сжигания угля на ТЭС приводит к существенному насыщению атмосферы земли парниковыми (ускоряющими процесс глобального потепления – диоксид углерода CO_2) и высокотоксичными газами (SO_x , NO_x). Последнее приводит, как правило,

к существенному росту респираторных и сердечно – легочных заболеваний [453] населения, проживающего в районах размещения тепловых электрических станций. Стоит отметить, что постоянное увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере (в частности SO_x , NO_x , CO_2) создает предпосылки для увеличения экологических штрафов (для стран подписантов Киотского протокола). Одним из наиболее перспективных технологических решений по существенному снижению концентрации антропогенных газов в продуктах сгорания угля в настоящее время является технология сжигания угля в составе смесевых топливных композитов (на основе угля и биомассы).

Во – первых, авторами [259] установлено, что при сжигании смесевого топлива образуется значительно меньше оксидов серы. Как правило, такой синергетический эффект объясняется тем, что часть угольной компоненты (основного источника SO_x) «вытесняется» древесиной. Также проведенные ранее исследования [259] показали, что при совместном сжигании древесины и угля существенно сокращаются выбросы диоксида углерода в атмосферу. При этом установлено [259], что коэффициент полезного действия котельного агрегата не снижается.

Во – вторых, использование биомассы в качестве одной из компонент топлива может существенно расширить сырьевую базу тепловых электрических станций [454] и повысить маневренность котельных агрегатов (за счет варьирования состава топливной смеси) в различных режимах его работы (пусковой, пиковый или базовый).

На настоящее время опубликовано достаточно много работ, посвященных сравнительному анализу процессов формирования оксидов серы при сжигании однородного угля и древесно – угольных смесей (например, [455 – 459]). Однако в большинстве опубликованных статей не анализируются механизмы подавления антропогенных оксидов в продуктах сгорания топлива.

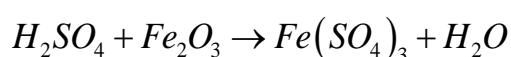
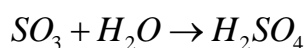
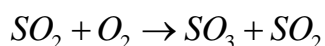
Так можно отметить работу [455], в которой приводятся результаты совместного сжигания угля, биомассы и природного газа. Эксперименты проводились на пилотной установке мощностью 20 кВт. Авторы [455] установили, что добавления даже 10% (по массе) биомассы к угольному топливу приводит к существенному снижению выбросов оксидов серы (на 30 – 37%) по сравнению с дымовыми газами однородного угля.

В работах [456, 457] приведены результаты экспериментальных исследований совместного сжигания биомассы (на основе кукурузного стебля и рисовой шелухи) и высокосернистого угля. Исследовалось [457, 458] сжигание топливных смесей типа уголь/биомасса в соотношении 50/50, а также однородного угля и биомассы. По результатам экспе-

риментальных исследований [457, 458] установлено значительное снижение выбросов оксидов серы SO_x (на 60 – 70%). При этом показано, что при сжигании только биомассы оксиды серы практически не образуются. Но в [456, 457] не описаны физико – химические процессы, приводящие к секвестрованию оксидов серы в процессе горения исследованных смесей.

Как говорилось выше проведенные эксперименты (например, [259]) показали, что при сжигании угольного топлива совместно с древесиной существенно снижаются выбросы оксидов азота и серы. При этом показано, что снижение концентрации SO_x и NO_x отличается от средневзвешенных оценок массового соотношения угля и биомассы. Соответственно, можно сказать, что при горении древесно – угольных смесей в малой окрестности частиц топлива протекает комплекс термохимических реакций, приводящий к секвестрованию оксидов серы и азота. На настоящее время в мировой научной периодике нет примеров статей, описывающее результаты исследования этих процессов.

Известно [458], что древесная биомасса как правило влажная (влажность φ может достигать 80% [459]). Значение φ существенно зависит от вида древесины, условий ее хранения и технологии подготовки к сжиганию. Соответственно, можно обосновано предположить, что при горении такого сложносоставного топлива водяные пары, образующиеся при испарении свободной и связанной влаги, могут играть существенную роль в процессах подавления выбросов SO_x . Возможно, что в условиях высокотемпературного нагрева в пограничном слое частиц древесины и угля водяной пар вступает во взаимодействие с диоксидами серы, образуя серную (H_2SO_4) кислоту. При этом пары этой кислоты в период горения топлива вступают в термохимическое взаимодействие с оксидом железа, содержащимся в минеральной части угля. В результате образуются сульфаты железа, которые улавливаются вместе со шлаком или золой. Схема описанных реакций приведена на Рисунке 6.1.1. Авторами за базовую принята следующая кинетическая схема реакций процесса секвестрования оксидов серы:



Пока не создано общей теории формирования оксидов серы при сжигании углей. Это связано с тем, что нет единого мнения (среди специалистов в области угольной геофизики) о том, как формируется сера в угольных пластах. Сера в угле может находиться в трех состояниях: органическая (S_o), сульфатная (S_s) и пиритная сера (S_p). Согласно утверждению Делафье [460] органическая сера, скорее всего, содержится в углеобразующих растениях

[461]. Более сложный механизм образования серы в угольном пласте — это пиритная сера. Согласно данным [462] S_p образовалась в результате осаждения сероводородом (образующимся из гниющих торфяных болот) сернистого железа при реакции с растворимыми соединениями железа. Сульфатная сера содержится в угле, как правило, в виде гипса ($CaSO_4 \cdot H_2O$). Это обусловлено существенным эрозийным износом угольных залежей в процессе их формирования [463].

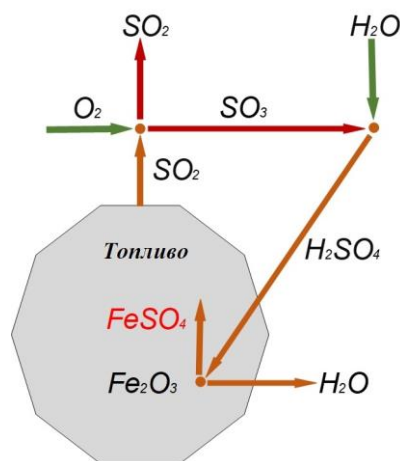
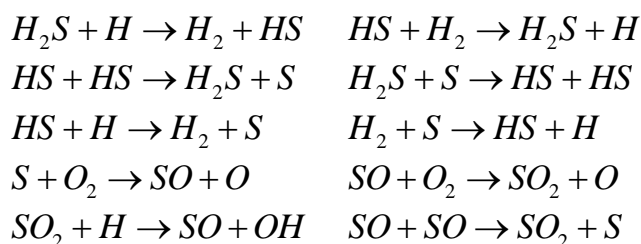


Рисунок 6.1.1 – Схема реакций секвестрирования оксидов серы (SO_x)

Такое разнообразие видов и форм серы, содержащейся в угле существенно усложняет процедуру моделирования образования SO_x в процессе горения угля. Органическая сера в процессе термической деструкции органической части угля выходит совместно с летучими в виде сероводорода (H_2S) [464]. При температурах $T > 900$ К пиритная сера (FeS_2) разлагается на FeS и S , а при прогреве свыше 1100К происходит реакция $FeS_2 \rightarrow Fe + 2S$. В среде кислорода воздуха эти компоненты окисляются до Fe_2O_3 и SO_2 . Процессы превращения топливной серы после ее выхода совместно с летучими в газовую область достаточно сложны и состоят из сотен газофазных и гетерогенных реакций окисления компонентов, содержащих S . При этом значительная часть серы может связываться щелочными компонентами золы [465]. При постановке задачи принята модель образования SO_x [464], кинетическая схема реакций приведена на Рисунке 6.1.2. Предполагалось, что в пограничном слое частиц и в их в пористой структуре протекают следующие реакции:



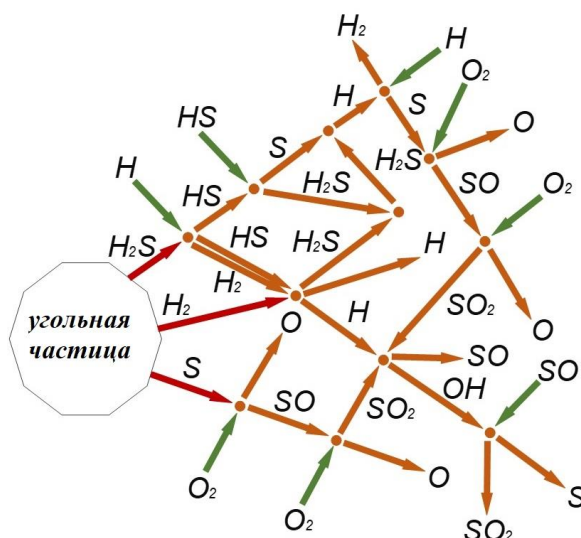


Рисунок 6.1.2 – Кинетическая схема реакций образования оксидов серы [464]

При постановке задачи рассматривался достаточно типичный для практики вариант взаимного расположения частиц угля и древесины. Возможны разные концентрации древесной компоненты в такой смеси (как правило доля биомассы в топливной смеси составляет от 10% до 20% по массе). Но независимо от концентрации, даже если одна частица древесины в смеси будут соответствовать девяти угольным частицам, последние будут ее окружать в пространстве по всем трем координатным направлениям. Поэтому, если представить частицу древесины в форме параллелепипеда (что достаточно вероятно), то каждая грань последней будет обращена к частице угля. Поэтому в качестве базового варианта при математическом моделировании была выбрана схема спаренного (на некотором расстоянии друг от друга) расположения частиц угля и древесины (Рисунок 6.1.3).

Математическая формулировка процесса воспламенения смесового топлива биомасса/уголь, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает в себя систему нестационарных дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных переменных Франк – Каменецкого [249]. При разработке математической модели приняты следующие допущения:

1) Принята двумерная (плоская) математическая модель процессов тепло-массопереноса.

2) Влияние гравитационных сил незначительно.

3) Форма частиц угля и дерева – куб.

Область решения задачи – «угольная частица – частица биомассы – газовая среда» (Рисунок 6.1.3). В течение периода термической подготовки частицу угля и древесины можно разделить на две зоны: исходное (влажное) топливо и сухой твердый каркас. Распределение температуры в такой гетерогенной системе описывается уравнением

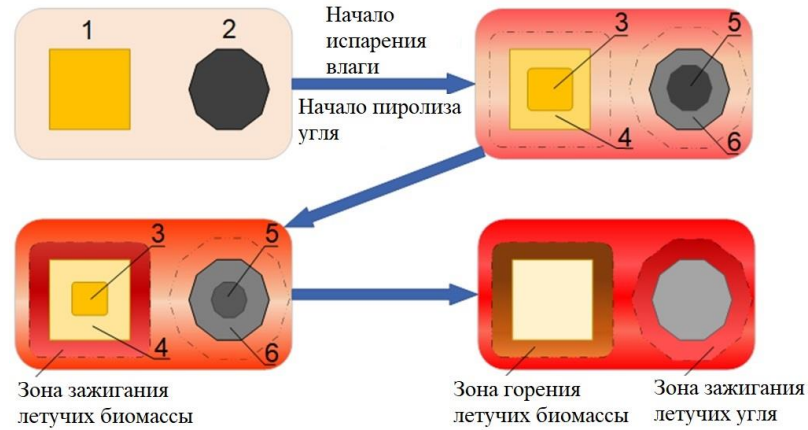


Рисунок 6.1.3 – Схема площадки для решения проблемы воспламенения:

1 – древесная биомасса; 2 – частица угля; 3 – водонасыщенная древесина; 4 – сухой деревянный каркас; 5 – уголь при температуре $T < T_{\text{стп}}$ (где: $T_{\text{стп}}$ – температура начала термического разложения); 6 – уголь в состоянии термического разложения

энергии. Оно учитывает, помимо процесса теплопроводности, испарение влаги, процесс пиролиза, взаимодействие водяного пара и углерода кокса, а также фильтрационный теплоперенос. Теплофизические характеристики (Λ – теплопроводность, C – теплоемкость, P – плотность) рассчитывались в соответствии с положением фронта испарения воды. Математическая постановка задачи горения частиц древесины и сухого угля, соответствующая сформулированным выше физической модели, состоит из системы дифференциальных уравнений в частных производных, записанных в переменных Франк – Каменецкого [249]:

– Уравнение энергии для частиц угля и древесной биомассы

$$\begin{aligned} \bar{C} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\bar{C} \text{Re}_{gm} \text{Pr}_{gm}}{\text{Dar}} \left(\frac{\partial H}{\partial \xi_x} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} + \frac{\partial H}{\partial \xi_y} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) O(\xi_{eva}) = \frac{K_a^m R_K^2}{Fk} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left((\Lambda_m + N_{rc}) \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left((\Lambda_m + N_{rc}) \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] - \\ \frac{Ku \cdot \Delta(\xi_{eva})}{\Omega^\theta} \frac{d\xi_{eva}}{d\tau} + \left\{ \sum_j^m K_j^{td} (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) + \sum_{j=1}^m \left[K_j^{set} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \right] + \sum_{j=1}^m \left[K_j^{gf} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \prod_{k=1}^g Y_j \right] \right\} O(\xi) \end{aligned} \quad (6.1.1)$$

где $m \rightarrow c$ для угля; $m \rightarrow bio$ – для частицы биомассы. Распределение температуры в тонком слое газа вокруг частиц угля и биомасса описывается уравнением энергии:

$$\begin{aligned} N_{rc} \bar{C} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \bar{C} \cdot \text{Bo} \left(U_g \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} + V_g \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) = \frac{N_{rc} K_a^g R_K^2}{Fk} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left(\Lambda_g \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left(\Lambda_g \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] + \\ + N_{rc} \sum_{j=1}^m \left[K_j^{gf} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \prod_{k=1}^g Y_j \right] + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \xi_x} + \frac{\partial \Gamma}{\partial \xi_y} \right) \end{aligned} \quad (6.1.2)$$

$$\bar{C} = C_g(X, Y, \tau) P_g(X, Y, \tau)$$

Интенсивности теплового излучения в малой окрестности частиц древесно – угольной смеси рассчитывались из решения уравнения переноса энергии излучения:

$$\frac{d\Gamma_g}{dN} = -h_\lambda \Gamma_g(\bar{N}) + \frac{1}{4\pi} \Gamma_{eff}(\bar{N}) \quad (6.1.3)$$

На границе системы «частица топлива (уголь или биомасса) – газовая среда» принято граничное условие 4 – го рода:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} = K_\lambda^{m-g} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} + Ki \left(\Gamma \Big|_{\xi_x = \xi_{sur}} - \Gamma \Big|_{\xi_x = \xi_{sur} + 0} \right) \quad (6.1.4)$$

$$\theta(\xi_x, \xi_y, \tau) \Big|_{sur} = \theta(\xi_x, \xi_y, \tau) \Big|_g$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} = K_\lambda^{m-g} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} + Ki \left(\Gamma \Big|_{\xi_y = \xi_{sur}} - \Gamma \Big|_{\xi_y = \xi_{sur} + 0} \right) \quad (6.1.5)$$

$$\theta(X, Y, \tau) \Big|_{Y=Y_1+0}^{Y=Y_1+0} = \theta(X, Y, \tau) \Big|_{Y=Y_2-0}^{Y=Y_2-0}$$

Распределение давления (Н) в частицах угля и биомассы рассчитывалось из решения уравнения пьезопроводности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\text{ПН})}{\partial \tau} = & \frac{K_\lambda^H}{Le^H} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left(X \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left(X \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] + \frac{Dar}{\Omega^H} \frac{d\xi}{d\tau} \Delta(\xi) + \left\{ \sum_j^m Dar \cdot B_{id}^H (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \right. \\ & \left. + \sum_{j=1}^m \left[Dar \cdot B_{get}^H \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) Y_j \right] + \sum_{j=1}^m \left[Dar \cdot B_{gf}^H \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \prod_{k=1}^g Y_j \right] \right\} O(\xi) \end{aligned} \quad (6.1.6)$$

Где $m \rightarrow c$ для угля; $m \rightarrow bio$ – для частицы биомассы. Скорость в пограничном слое частицы топлива вычислялась из решения системы уравнений движения в переменных функция «тока – вихрь»:

$$R_K^2 \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi_x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi_y^2} \right) = \Omega \quad (6.1.7)$$

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + R_K \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \xi_y} \frac{\partial \Omega}{\partial \xi_x} - \frac{\partial \Psi}{\partial \xi_x} \frac{\partial \Omega}{\partial \xi_y} \right) = \frac{R_K^2}{Re} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial \xi_x^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \xi_y^2} \right) + \frac{Ri \cdot R_K}{\theta_g - \theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \quad (6.1.8)$$

Процесс термического разложения органической части угля описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial \tau} = \Upsilon_i [1 - \eta_i] \left(\frac{\theta \gamma_i}{1 + \beta \theta} \right) \quad (6.1.9)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{gm} \zeta_i}{\partial \tau} - \frac{Re_{gm} Pr_{gm}}{Dar} \left(\frac{\partial H}{\partial \xi_x} \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_x} + \frac{\partial H}{\partial \xi_y} \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_y} \right) O(\xi_{eva}) = \frac{K_D}{Le} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left(D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left(D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] + \\ + \left\{ \sum_j^{m_1} \Upsilon_j^{td} (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta \theta}\right) + \sum_{j=1}^m \left[\Upsilon_j^{get} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta \theta}\right) \right] + \sum_{j=1}^m \left[\Upsilon_j^{gf} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta \theta}\right) \prod_{k=1}^g Y_j \right] \right\} O(\xi) \end{aligned} \quad (6.1.10)$$

Уравнения диффузии в газовой области для соответствующих компонентов реакций:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{gm} \zeta_i}{\partial \tau} - \frac{Re_{gm}}{Pr_{gm}} \left(U_g \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_x} + V_g \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_y} \right) = Le^{-1} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left(D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left(D_m \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] + \\ + \sum_{j=1}^m \left[\Upsilon_j^{gf} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1+\beta \theta}\right) \prod_{k=1}^g Y_j \right] \end{aligned} \quad (6.1.11)$$

Задача решена при следующих начальных:

$$t=0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \theta(\xi_x, \xi_y, 0) = \theta_0; \quad H(\xi_x, \xi_y, 0) = 1 \\ \Pi(\xi_x, \xi_y, 0) = \Pi_0; \quad \eta(\xi_x, \xi_y, 0) = 0; \end{array} \right\} x_1 < x < x_2, x_3 < x < x_4, y_1 < y < y_2$$

$$\left. \begin{array}{l} \theta_g(\xi_x, \xi_y, 0) = 0, \\ \zeta_i(\xi_x, \xi_y, 0) = 0; \end{array} \right\} 0 < x < x_1, x_2 < x < x_3, x_4 < x < x_g, 0 < y < y_2; 0 < y < y_1, y_2 < y < y_g, x_1 < x < x_2.$$

и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi_x^2} \right|_{\substack{\xi_x=0; 0 < \xi_y < \xi_g \\ \xi_x=\xi_g; 0 < \xi_y < \xi_g}} = 0; \quad (6.1.12) \quad \left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi_y^2} \right|_{\substack{\xi_y=0; 0 < \xi_x < \xi_g \\ \xi_y=\xi_g; 0 < \xi_x < \xi_g}} = 0; \quad (6.1.13) \quad H \Big|_{\substack{\xi_x=\xi_{sur} \\ \xi_y=\xi_{sur}}} = 1; \quad (6.1.14)$$

$$D_{i \rightarrow air} P_g \left. \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_x} \right|_{\xi_x=\xi_{sur}} = D_{i \rightarrow air} P_{gm} \left. \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_x} \right|_{\xi_x=\xi_{sur}+0} \quad (6.1.15) \quad \left. \frac{\partial^2 \zeta_i}{\partial \xi_y} \right|_{\xi_g} = 0; \quad (6.1.16)$$

$$D_{i \rightarrow air} P_g \left. \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_y} \right|_{\xi_y=\xi_{sur}} = D_{i \rightarrow air} P_{gm} \left. \frac{\partial \zeta_i}{\partial \xi_y} \right|_{\xi_y=\xi_{sur}+0} \quad (6.1.17) \quad \left. \frac{\partial^2 \zeta_i}{\partial \xi_x} \right|_{\xi_g} = 0; \quad (6.1.18)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial \xi_y} \right|_{\xi_{sur}} = - \frac{1}{Dar} \left. \frac{\partial H}{\partial \xi_x} \right|_{\xi_y}; \quad (6.1.19) \quad \left. \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi_x \partial \xi_y} \right|_{\xi_g} = 0; \quad (6.1.21)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial \xi_x} \right|_{\xi_{sur}} = - \frac{1}{Dar} \left. \frac{\partial H}{\partial \xi_y} \right|_{\xi_x}; \quad (6.1.20) \quad \left. \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi_x \partial \xi_y} \right|_{\xi_g} = 0; \quad (6.1.22)$$

$$\Gamma \Big|_{\xi_g} = 1; \quad (6.1.23)$$

Теплопроводность, теплоемкость и плотность влажных и «обезвоженных» частей топлива с учетом объемных долей компонентов:

$$\Lambda_m = \begin{cases} \Lambda_1, & O(\xi_{eva})=0; \\ \Lambda_2, & O(\xi_{eva})=1; \end{cases} \quad C_m = \begin{cases} C_1, & O(\xi_{eva})=0; \\ C_2, & O(\xi_{eva})=1; \end{cases} \quad P_m = \begin{cases} P_1, & O(\xi_{eva})=0; \\ P_2, & O(\xi_{eva})=1; \end{cases}$$

$$\Lambda_1 = \gamma_m \Lambda_m + \gamma_{wat} \Lambda_{wat} \quad \Lambda_2 = \gamma_m \Lambda_m + \gamma_s \Lambda_s \quad (6.1.24)$$

$$C_1 = \gamma_m C_m + \gamma_{wat} C_{wat} \quad C_2 = \gamma_m C_m + \gamma_s C_s \quad (6.1.25)$$

$$P_1 = \gamma_m P_m + \gamma_{wat} P_{wat} \quad P_2 = \gamma_m P_m + \gamma_s P_s \quad (6.1.26)$$

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи зажигания подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г. При решении методом конечных разностей сформулированной краевой задачи математической физики с соответствующими начальными и граничными условиями численный анализ проведен для начального периода горения – выхода на условия устойчивого зажигания продуктов пиролиза угля и древесины. Все процессы, проходящие в зоне интенсивного химического взаимодействия горючего с окислителем, на стадиях зажигания продуктов пиролизу древесины идентичны процессам горения. Но в такой сложной постановке задачи развитого горения будут решаться по целому ряду объективных причин во много раз больше времени чем задача зажигания. Продукты же горения смеси угля и древесины будут идентичны как на стадии зажигания, так и на стадии развитого горения. По этой причине в дальнейшем анализ основных характеристик исследуемых процессов проходил для периода времени, соответствующий устойчивому газофазному зажиганию смеси газообразных продуктов пиролиза угля и древесины и последующих термических процессов взаимодействия промежуточных продуктов вторичных реакций (как гомогенных, так и гетерогенных) между собой. Верификация математической модели проводилась методом сравнительного анализа теоретических и экспериментальных значений времен задержки зажигания частиц древесно – угольного топлива по аналогии с §5.3.

На Рисунках 6.1.4 (а – в) приведены поля концентраций оксидов (SO), диоксидов серы (SO₂) и сернистого ангидрида (SO₃) в момент воспламенения частиц древесно – угольного композита в условиях высокотемпературного нагрева при различных значениях начальной влажности (φ) древесной компоненты топливной смеси. Можно отметить, что SO_x формируются, как правило, в малой окрестности частицы угля. Очевидно это обусловлено тем, что древесная биомасса в своем составе не содержит органической (тем более пиритной) серы. Сероводород (H₂S) формируется при термическом разложении органической части угля, вдувается во внешнюю газовую область и окисляется кислородом воздуха до SO₂ и SO₃.

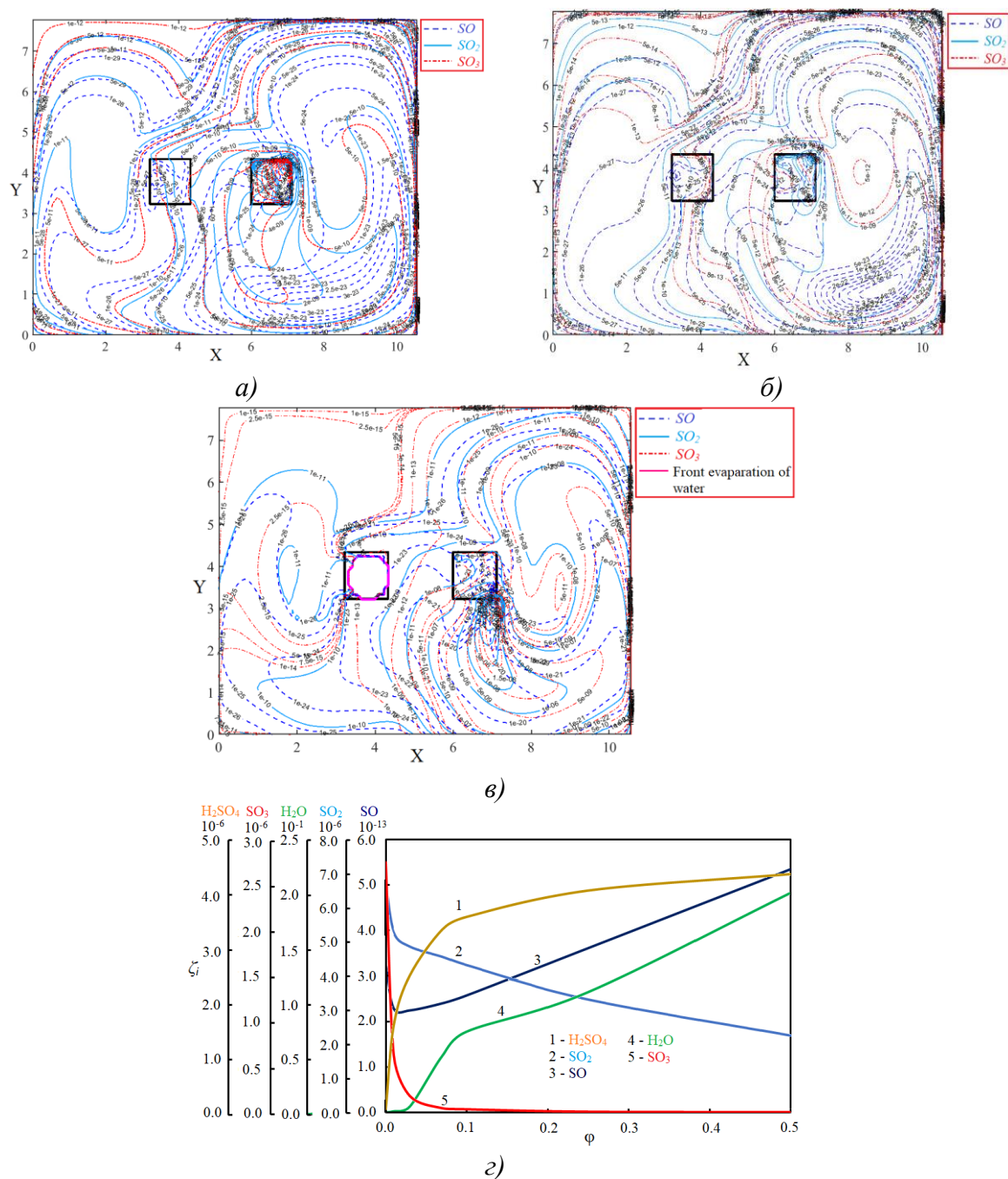


Рисунок 6.1.4 – Поля концентраций (*a* – *в*) оксидов серы (SO_x) и зависимости среднеобъемных концентрация (*z*) компонентов газовой среды (H₂O, H₂SO₄, SO, SO₂, SO₃) в момент воспламенения частиц смеси древесина/уголь при различном значении влагосодержания в древесной компоненте топлива:

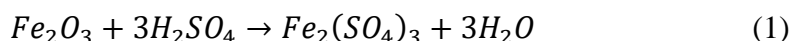
a – $\varphi = 0$; *б* – $\varphi = 0.1$; *в* – $\varphi = 0.3$; Схема расположения топливных частиц соответствует схеме, приведенной На Рисунке 6.1.3

Также можно отметить, что увеличение φ приводит к снижению трёхокси серы. Это обусловлено тем, что сернистый ангидрид вступает в термохимическое взаимодействие с водяными парами, образующимися при испарения свободной и адсорбционной влаги древесины. Последнее хорошо видно на Рисунке 6.1.4 *z* (приведены зависимости значений

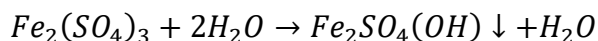
среднеобъемных концентраций (\bar{Y}) SO_x , а также водяных (H_2O) и сернокислотных (H_2SO_4) паров от влагосодержания древесины), где:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{V} \int_0^V Y_i dV$$

Анализ зависимостей на Рисунке 6.1.4 *з* показывает, что увеличение ϕ приводит к повышению концентраций H_2O и H_2SO_4 в продуктах сгорания смесевое топлива. В этих условиях можно сказать, что водяной пар выступает в качестве абсорбирующего агента для трёхоксида серы. Формирующаяся при термохимическом взаимодействии H_2O и SO_3 серная кислота может быть удалена посредством ее конденсации в специальных коррозионностойких теплообменниках (например, кожухотрубчатого (рекуперативный [466] или регенеративный [467]) или смешивающего [468] типа), а также за счет взаимодействия с оксидами металлами (в частности с Fe_2O_3), содержащимися в минеральной части угля. Как уже говорилось выше в результате взаимодействия оксида железа и серной кислоты формируются твердые соли (*Ferrum sulfuricum oxydatum*) и водяной пар:



Пары воды, формирующиеся в результате этой реакции, а также испарения влаги древесной компоненты топлива и термохимического реагирования водорода и метана с кислородом воздуха в дальнейшем вступают в реакцию с сульфатами железа с образованием улавливающегося совместно с золой и шлаком гидросульфата железа:



На Рисунке 6.1.5 приведены концентрации серной кислоты и водяного пара в момент воспламенения частиц древесно – угольного топлива. Анализ зависимостей на Рисунке 6.1.5 показывает, что зоны увеличения концентрации H_2SO_4 соответствуют зоне уменьшения H_2O . Это объясняется термохимическим взаимодействием водяных паров (H_2O) и сернистого ангидрида (SO_3). При этом анализ полей концентраций H_2O и H_2SO_4 , приведенных на Рисунке 6.1.5 показывает, что наибольшие концентрации серной кислоты соответствуют пространству между топливными частицами. Скорее всего, это обусловлено тем, что в этой зоне наибольшие концентрации обоих реагентов.

Соответственно, можно сделать аналогичный Рисунку 6.1.4 вывод о возможности регулирования (за счет программированной сушки древесины перед ее сжиганием) выбросов оксидов серы в атмосферу. На Рисунке 6.1.6 *а – з* приведены типичные температуры (θ – Рисунки 6.1.6 *а, б*), линии тока (Ψ) и изотахи (T) смеси водяных паров, летучих, окислителя и продуктов реакций их взаимодействия в малой окрестности топливных частиц в период газозафазного горения газообразных продуктов пиролиза древесины, при различных

значениях влагосодержания последней (Рисунки 6.1.6 *а*, $\varphi = 0,3$; Рисунки 6.1.6 *б*, $\varphi \approx 0,01$).

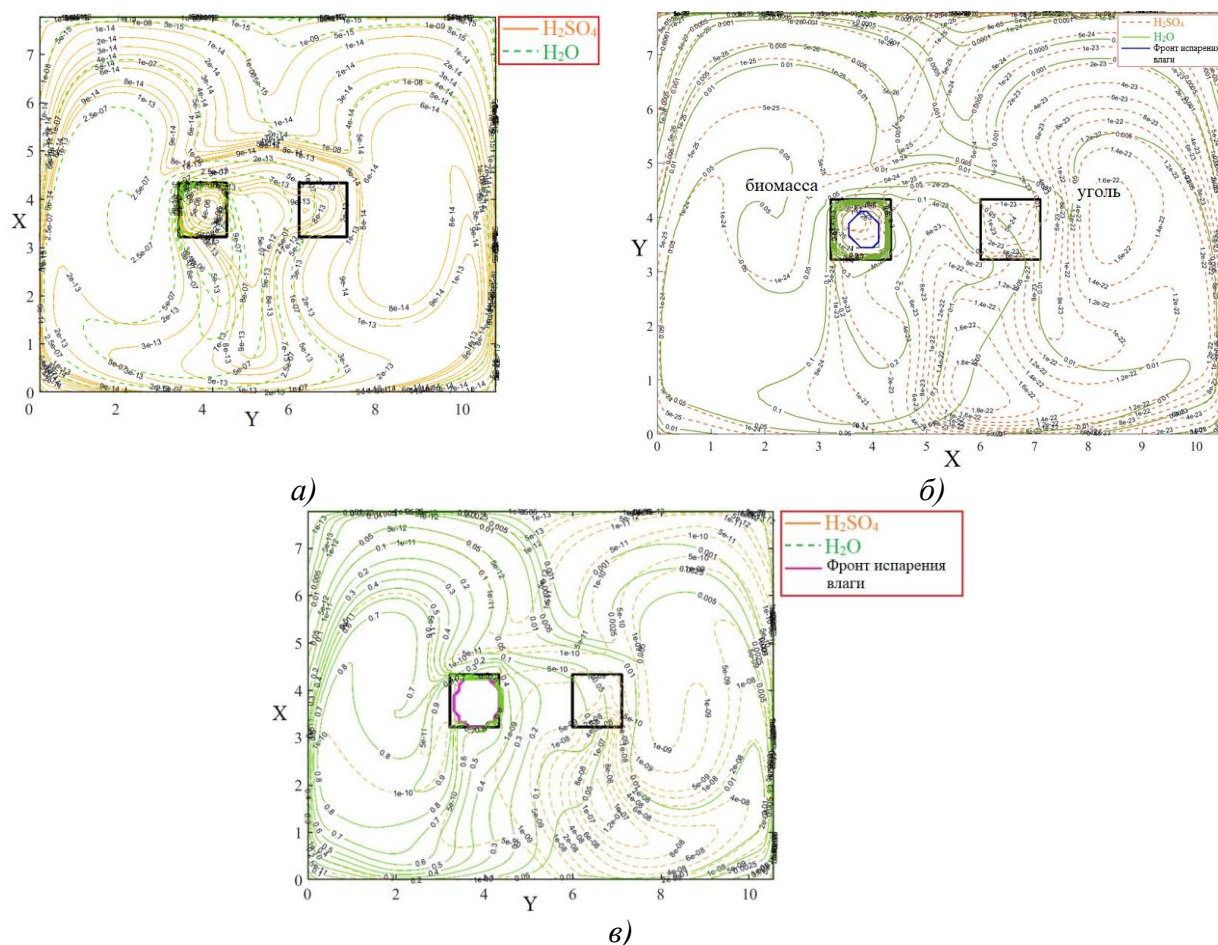


Рисунок 6.1.5 – Поля типичных значений концентрации серной кислоты (H_2SO_4) и водяного пара (H_2O) в начальный период горения частиц древесно – угольного топлива при различных значениях влагосодержания в древесные компоненты топлива: *а* – $\varphi = 0$; *б* – $\varphi = 0,1$; *в* – $\varphi = 0,3$; Схема расположения топливных частиц соответствует схеме, приведенной на Рисунке 6.1.3.

Анализ зависимостей, приведенных на Рисунках 6.1.6 *а* – *г*, показывает, что в период горения (в его нестационарной стадии, в частности) такого существенно неоднородного топлива, как смесь угля и биомассы, в малой окрестности частиц формируется сложный спектр течений газовой среды с нисходящими (возле частиц) и восходящими (на некотором удалении от топлива) потоками. Можно отметить существенно отличающиеся картины течений вокруг частиц в зависимости от влажности биомассы.

Анализ Рисунка 6.1.6 *б* также показывает, что в период горения летучих формируется существенно нелинейный и асимметричный спектр течений смеси газообразных продуктов пиролиза и окислителя в случае сжигания влажной биомассы. Проведя сравнительный анализ вихревых структур вокруг частиц древесины и угля можно отметить, что ядро

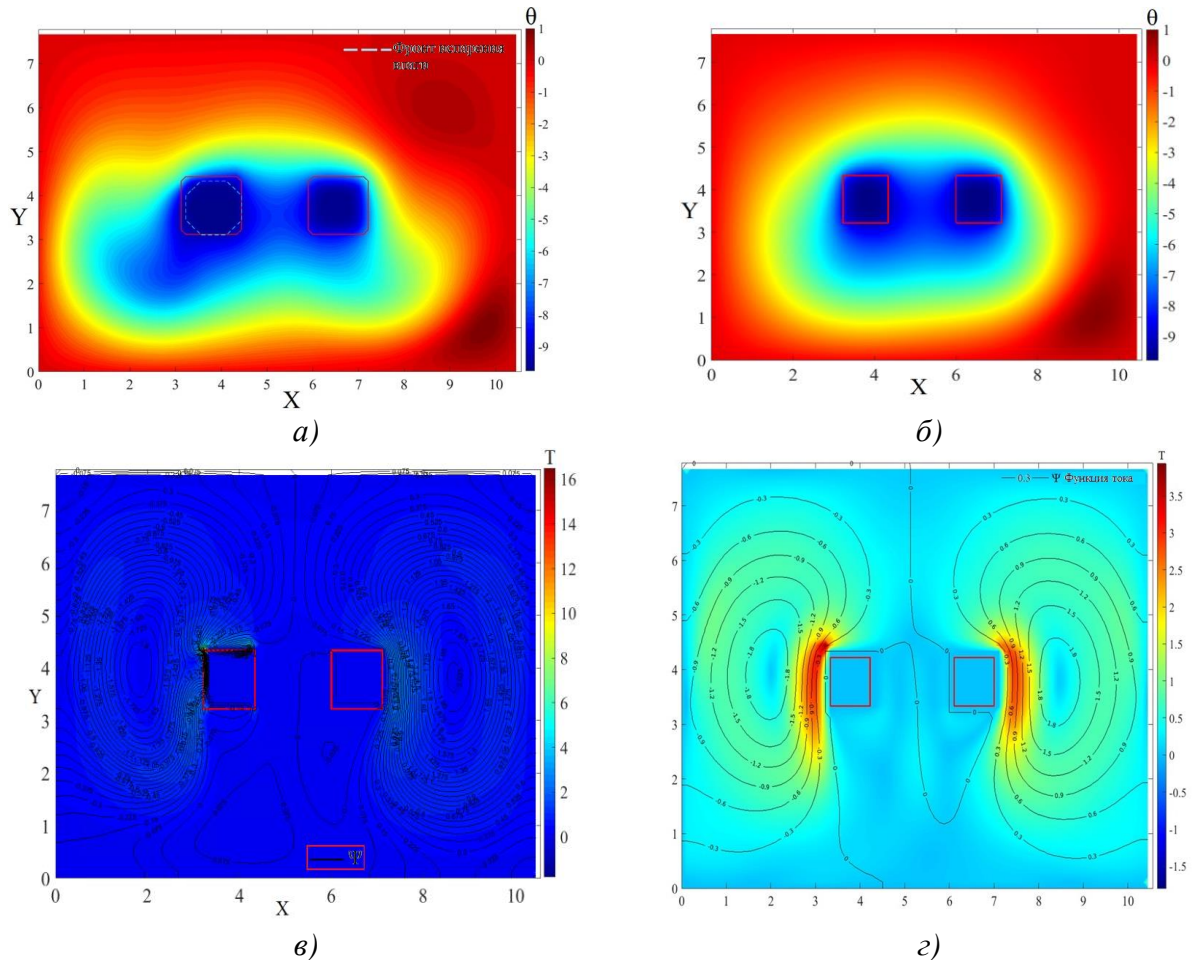


Рисунок 6.1.6 – Типичные температуры (θ – *a* – *б*), линии тока (Ψ) и изотахи (T) (*в* – *г*) смеси водяных паров, летучих, окислителя и продуктов их взаимодействия в малой окрестности топливных частиц в период газофазного горения частиц древесины и угля, при влагосодержании биомассы:

a, *в* – $\varphi = 0,3$; *б*, *г* – $\varphi = 0,0$; *a*, *б* – изотермы, θ ; *в*, *г* – изолинии функции тока (Ψ) и изотахи (T); схема расположения топливных частиц соответствует схеме, приведенной на Рисунке 6.1.3

вихря вокруг частицы биомассы находится значительно выше, чем вокруг частицы угля. Это скорее всего обусловлено комплексным влиянием основных значимых и существенно влияющих на процессы конвекции факторов. Во – первых, при сжигании обводненной древесины неизбежно происходит испарение внутрипоровой (массовая доля которой много больше массовой доли адсорбционно – связанной воды) влаги топлива. Как показали исследования [169] в результате происходит существенная интенсификация процесса массопритока (вследствие фазовых трансформаций воды) внутри пор древесины. Это приводит к значительному росту давления в древесной структуре. Как показано (на примере решения задачи зажигания частицы водоугольного топлива) в [169] это может приводить даже к диспергации или микровзрыву топлива. В результате скорости движения сквозь пористую

структуру древесины и, соответственно, вдува смеси летучих, водяных паров и продуктов взаимодействия газообразных и твердых продуктов пиролиза в пограничный слой частицы также значительно возрастают. Последнее оказывает существенное влияние на условия течения смеси газов в малой окрестности частиц этого топлива. Также анализ Рисунка 6.1.6 с показывает, что в нижней полусфере частиц формируются вторичные вихри. Это также скорее всего обусловлено интенсификацией вдува газообразных продуктов пиролиза и водяных паров в малую окрестность топливных частиц. Можно предположить, что вдуваемая с относительно высокой скоростью струя парогазовой смеси в пограничный слой порождает вихревые тороидальные структуры вокруг себя (по аналогии с [342]). Стоит сказать, что подобные результаты установлены в [175]. Во – вторых, как известно [469] естественная конвекция обусловлена разностью плотностей, и, соответственно, температур газовой области. Теплофизические характеристики (теплоемкость C_p , теплопроводность λ , плотность ρ) угля и древесины существенно отличаются. Соответственно, и условия прогрева каждой компоненты топлива также различны. В результате скорости движения среды при естественной конвекции вокруг древесной и угольной частиц будут отличаться.

На Рисунке 6.1.6 г приведены функции тока и изотакси в случае горения сухой (в условиях отсутствия свободной влаги) древесины совместно с углем. Можно отметить, что картина течений существенно отличается от приведенной на Рисунке 6.1.6 с. Скорее всего это обусловлено тем, что при горении сухой биомассы отсутствуют процессы испарения внутрипоровой влаги. Соответственно, скорость вдува летучих в пристенную область частицы обуславливается только массопритокom за счет термического разложения древесины. В этом случае значения U_{gm} и V_{gm} незначительны и не оказывают существенного влияния на спектр течений парогазовой смеси в малой окрестности частиц.

6.2 Математическое моделирование термохимических процессов секвестрирования оксидов азота при горении частиц древесно – угольной смеси

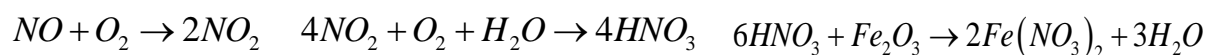
К настоящему времени опубликовано много работ, посвященных сравнительному анализу по результатам экспериментов процессов формирования оксидов азота при сжигании однородного угля и древесно – угольных смесей. Уже достоверно установлено [278], что при совместном сжигании угля и биомассы образуется значительно меньше NO_x (в 1,5 – 2 раза), чем при горении однородного угля. Но на настоящее время не разработана модель, достоверно описывающая процессы секвестрирования оксидов азота при совместном сжига-

нии углей и биомассы. В [278] показано, при совместном сжигании угля, биомассы и природного газа выбросы NO_x снижаются практически на 50%. Но стоит сказать, что в [278] не приведено какой – либо гипотезы о механизме процессов, приводящих к снижению выхода оксидов азота при совместном сжигании угля и биомассы.

В [470] приведены результаты экспериментальных исследований совместного сжигания угля и биомассы в вертикальной печи. Установлен [470] положительный (снижение выбросов NO_x) синергетический эффект при сжигании древесно – угольных смесей. Так при массовом соотношении 70/30 в системе уголь/биомасса снижение NO_x составило 33% по сравнению с горением угля. Важным является то (как установлено в экспериментах), что при совместном сжигании угля и биомассы эффективность энергетической установки заметно повышается. Но в [470] не приведено объяснения физики и химии процессов секвестирования оксидов азота.

В [471] приведены результаты численного моделирования процесса совместного сжигания угля и биомассы в топке котельного агрегата. При разработке математической модели принята модель формирования оксидов азота [471]. Также в [471] принято, то что образующиеся при сгорании топлива NO_x реагирует с полукоксом углеводородов (C_nH_m). Однако в [471] не рассматривались процессы термохимического взаимодействия между продуктами пиролиза угля и биомассы, приводящие к снижению содержания оксидов азота в газообразных продуктах горения таких смесей.

Ранее уже говорилось [473], что древесная биомасса, как правило, является влажной (влажность ϕ может достигать 80% [473]). Значение ϕ существенно зависит от вида древесины, условий ее хранения и технологии подготовки к сжиганию. Соответственно, можно обосновано полагать, что при воспламенении и окислении такого влагонасыщенного топлива водяные пары, образующиеся при испарении свободной и связанной влаги, могут играть существенную роль в процессах подавления выбросов NO_x . В условиях высокотемпературного нагрева в пограничном слое частиц древесины и угля возможно взаимодействие водяного пара с NO_2 с образованием паров азотной кислоты (HNO_3). Кислотные пары в период горения топлива вступают в термохимическое взаимодействие с оксидом железа минеральной части угля. В результате образуются нитраты железа, которые остаются в шлаке. Схема рассматриваемых реакций приведена на Рисунке 6.2.1. При математическом моделировании за базовую принята следующая кинетическая схема реакций процесса секвестирования оксидов азота:



Необходимо отметить, что проведение систематических экспериментальных исследований по определению количества выделившихся в результате горения угля оксидов азота практически невозможно. Это обусловлено, в первую очередь, необходимостью размещения в пограничном слое частицы (очень малая по размерам область вокруг частицы) и в ее пористой структуре топлива датчиков – регистраторов химического состава газа. При этом стоит отметить, что все процессы необходимо регистрировать в условиях горения топлива (другими словами в условиях высоких температур $T_g > 1000$ К). На настоящее время таких высокоточных газоанализаторов, работающих в экстремальных (по температурам внешней среды) условиях просто не существует. В этом случае наиболее приемлемым вариантом исследований является применение аппарата математического моделирования. По этой причине основной целью работы является математическое моделирование комплекса совместно – протекающих процессов термической подготовки, воспламенения и горения частиц древесно – угольного смесового топлива с учетом образования и секвестрования оксидов азота.

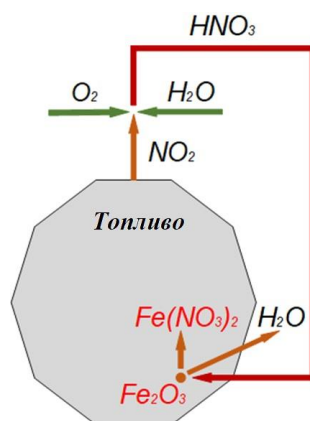
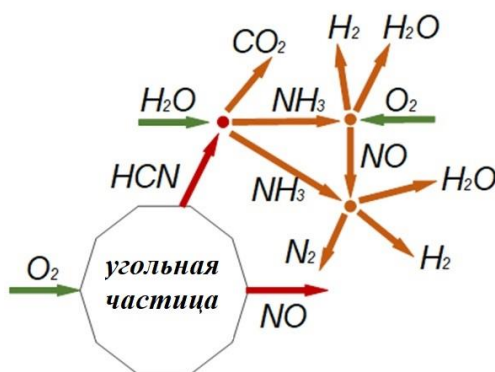


Рисунок 6.2.1 – Схема реакций секвестрования оксидов азота (NO_x)

Согласно данным [23, 473, 474], на настоящее время достоверно установлено три типа процессов формирования оксидов азота при горении угля. Первый механизм – термический: NO_x образуются при окислении молекулярного азота воздуха. Но стоит отметить, что в таком случае оксиды азота формируются только в условиях достаточно высоких температур (более 1600 К [475]). Второй механизм обусловлен формированием NO_x из азото-содержащих компонентов угля в период его горения при температурах $T_g = 800 - 2100$ К [476, 477]. Третий механизм – «быстрые» реакции углеводородных соединений с молекулярным азотом, при условии, что O_2 находится в недостатке [477].

На настоящее время процессы термического образования NO_x достаточно хорошо описывается моделью Зельдовича [474]. Более сложными (с точки зрения описания кинетики)

тического механизма) являются модели формирования топливных [476] и «быстрых» оксидов азота [477]. Но стоит сказать, что модели [477] требуют учета большого числа термодимических реакций (до нескольких десятков). Это существенно ограничивает их применение при проведении математического моделирования. По этой причине в данной работе авторами за базовую принята модель образования оксидов азота [477]. Модель [473] достоверно описывает процесс образования NO_x при горении пылевидного угля. Кинетическая схема формирования NO_x приведена на Рисунке 6.2.2.



Рисунки 6.2.2 – Кинетическая схема реакций образования оксидов азота [473]

Принято, что при нагреве частицы угля происходит термическое разложение органической части топлива, сопровождающееся выходом летучих (Рисунок 6.2.2). Они включают в себя комплекс горючих (метан – CH_4 ; водород – H_2 ; монооксид углерода – CO) и негорючих (диоксид углерода – CO_2 ; водяные пары H_2O) компонентов газовой смеси. Также в период термической деструкции угольного топлива происходит выход и азотсодержащих компонентов топлива. При этом стоит отметить, что 80% азота выходит в виде центров подсистемы цианидов (или другими словами синильной кислоты – HCN). Остальные 20% азота окисляются в внутрипоровой структуре частицы до NO . Цианиды HCN , образовавшиеся в период термической деструкции вступают в реакцию с продуктами термического разложения угля и превращаются в амины, либо восстанавливаются до N_2 из NO [473]. При моделировании принято, что вблизи поверхности частиц и в пористой структуре топлив протекают следующие реакции:



Также при проведении моделирования процесса зажигания частиц топлива учитывалось образование «термических» оксидов азота. Согласно теории Семенова [478], вблизи поверхности частицы будут протекать следующие реакции:



Образовавшийся монооксид азота (NO) доокисляется кислородом воздуха:



Физическая модель процесса воспламенения по своей совокупности основных теплофизических и термохимических процессов, установленных в экспериментах, соответствует модели, приведенной в разделе 6.1. Отличие заключается в описании процесса термического разложения органической части угля, в результате которого выделяется синильная кислота (HCN), которая вследствие термохимического реагирования с кислородом воздуха трансформируется в NO₂ (реакции 6.2.1 – 6.2.4). Исходные данные для расчета приведены в приложении А.

Диоксид азота взаимодействует с водяными парами, поступающими в зону реакций в результате процессов испарения влаги и пиролиза. Образуются пары азотной кислоты, которые взаимодействуют с оксидами железа минеральной части угля. В результате этой реакции образуются соли – нитраты железа, находящиеся в твердом состоянии и выпадающие затем в шлак. Кроме оксидов железа в минеральной части всех углей присутствуют оксиды других металлов, но их концентрации малы по сравнению с Fe₂O₃. Поэтому в качестве основного реагента в реакции с парами азотной кислоты рассматривался только последний.

При постановке задачи рассматривался достаточно типичный для практики вариант взаимного расположения частиц угля и древесины. Возможны разные концентрации древесной компоненты в такой смеси (как правило доля биомассы в топливной смеси составляет от 10% до 20% по массе). Но независимо от концентрации, даже если одна частица древесины в смеси будут соответствовать девяти угольным частицам, последние будут ее окружать в пространстве по всем трем координатным направлениям. Поэтому, если представить частицу древесины в форме параллелепипеда (что достаточно вероятно), то каждая грань последней будет обращена к частице угля. Поэтому в качестве базового варианта при математическом моделировании можно выбрать приведенную на Рисунке 6.1.3 схему, которая практически в любом варианте ориентации древесных и угольных частиц в топочном пространстве соответствует реальным условиям взаимодействия газообразных и твердых продуктов термического разложения угля и древесины в широком диапазоне изменения температур топочной среды и условий расположения топливных частиц.

Математическая постановка задачи секвестрования оксидов азота в индукционный период древесно – угольного топлива и сухого угля, соответствующая сформулированным выше физической модели по структуре системы уравнений и методам решения, соответствует, в основном, математической постановке задачи зажигания, приведенной в разделе 6.1.

Математическая модель с соответствующими краевыми условиями решена для периода времени, соответствующего времени задержки воспламенения рассматриваемой смеси частиц двух твердых топлив (угля и древесины). Этого интервала времени достаточно для адекватной оценки состава смеси газов, образующихся после завершения всех рассматриваемых гетерогенных и газофазных реакций с участием твердых и газообразных продуктов пиролиза угля и древесины, а также кислорода воздуха.

Имеет смысл отметить, что одним из факторов, оказывающих существенное влияние на условия и характеристики горения частиц твердых топлив, является их характерный размер. Чем он меньше, тем меньше время задержки зажигания любого топлива. Но, в то же время, в большинстве случаев целесообразно в качестве второй компоненты топливной смеси использовать отходы лесопиления без их дополнительного измельчения (например, опилки, щепу или стружку). Соответственно, характерный размер частиц древесины может составлять 1 – 3 мм. Аналогично, размер частиц угля может в реальных системах топливоподготовки составлять от десятков микрон до единиц миллиметров. В любом случае можно обосновано полагать, что при концентрациях древесной компоненты в смеси от 10% до 20% по массе приток паров воды с поверхности одиночной частицы древесины относительно крупных размеров будет достаточен для обеспечения условий интенсивного взаимодействия этих паров с продуктами пиролиза углей. Поэтому при численном моделировании были выбраны характерные размеры частиц угля и древесины – 3 мм.

Одной из наиболее важных характеристик процесса при обосновании конструкции камеры сгорания котельного агрегата является концентрация оксидов азота (NO_x) в продуктах сгорания. Это обусловлено тем, что NO_x являются одними из наиболее опасных антропогенных веществ (особенно NO) выбрасываемых тепловыми электрическими станциями в атмосферу. По этой причине целесообразен анализ концентраций оксидов азота в начальный период горения частиц древесно – угольного смесевоего топлива при адекватных (одинаковая температура внешней среды, соотношение угля и древесины) условиях нагрева.

На Рисунке 6.2.3 приведены поля концентраций NO , NO_2 в момент воспламенения частиц древесно – угольной смеси при различных значениях влагосодержания (φ) частицы биомассы. Можно отметить, что диоксид азота формируется, как правило, в малой окрестности частицы угля, в то время как вокруг древесной частицы оксидов азота практически не образуется. Это обусловлено высокой концентрацией азотсодержащих соединений (пары синильной кислоты) в составе газообразных продуктов пиролиза угля. Последнее обусловлено тем, что уголь содержит, как правило, в 10 – 30 раз (в зависимости от вида) больше азота, чем древесина [479].

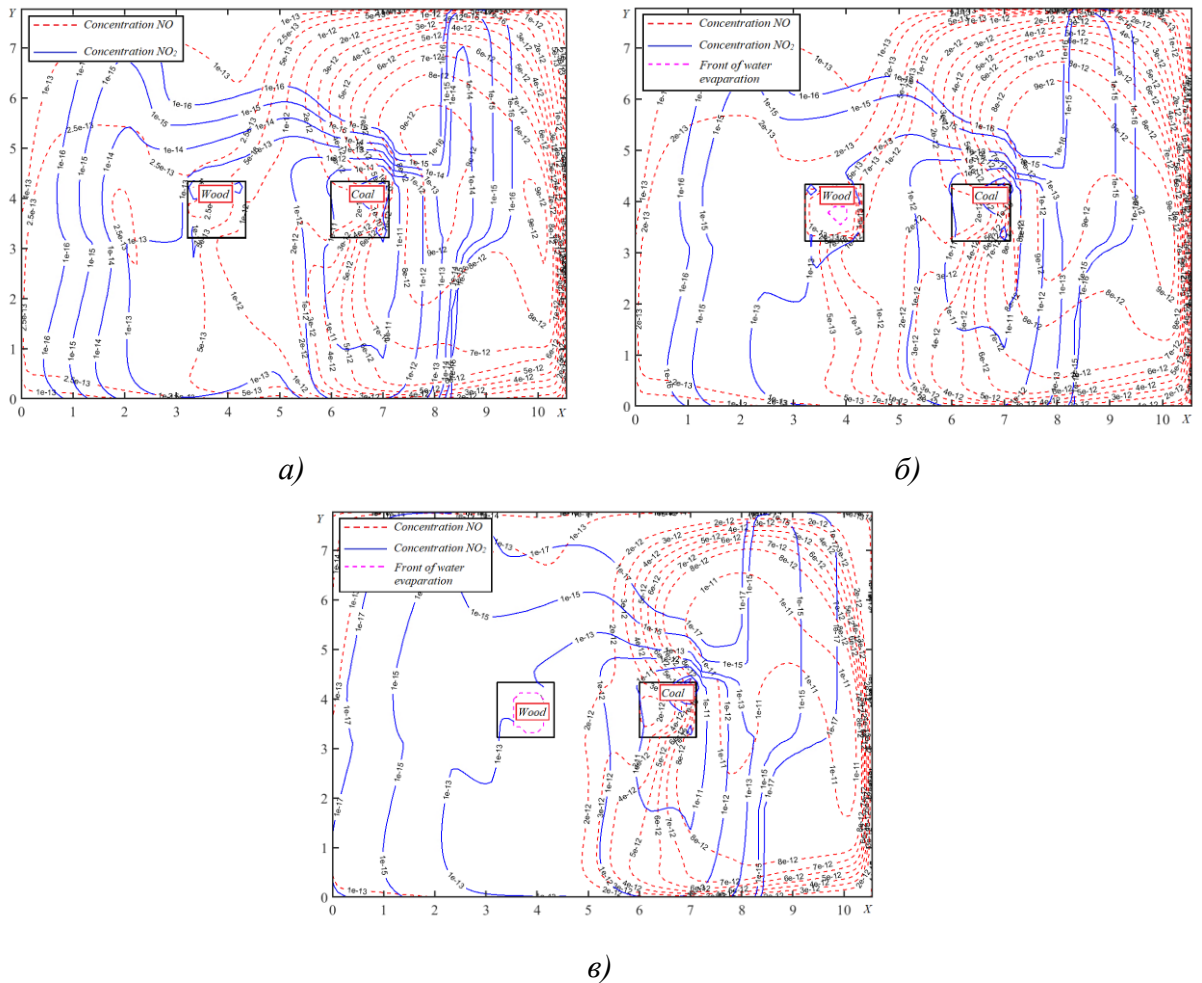
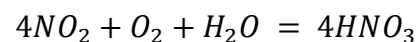


Рисунок 6.2.3 – Концентрации оксидов азота NO_x (NO и NO_2) в момент воспламенения частиц древесно – угольного топлива при температуре внешней среды $T_g = 1273\text{K}$ и влажности древесины: $a - \phi = 0\%$; $b - \phi = 10\%$; $v - \phi = 30\%$

Анализ полей концентраций (Рисунок 6.2.3) показывает, что увеличение ϕ приводит к снижению концентрации оксида азота в малой окрестности частицы. Это обусловлено взаимодействием водяных паров (образующихся в результате нагрева древесины и термохимического взаимодействия метана и водорода с кислородом) с диоксидом азота и кислородом воздуха:



Соответственно можно сделать обоснованный вывод, что изменяя исходную влажность древесной компоненты (методом программируемой сушки древесины) смесового топлива можно контролировать уровень выбросов NO_x . Формирующиеся в результате такого сжигания пары азотной кислоты будут взаимодействовать с оксидами железа минеральной части угля (образуя соли) или конденсироваться в коррозионнотойких теплообменниках.

Результаты численного анализа дают основания и для вывода о том, что так как влага играет значительную роль в подавлении оксидов азота в продуктах сгорания углей при сжигании последних в смеси с древесиной, то процесс сушки угля и древесины до абсолютно сухого состояния ($\varphi \approx 0\%$) при их совместном использовании на ТЭС не всегда целесообразен. Последнее особенно актуально если ставится задача подавления оксидов азота в дымовых газах тепловых электрических станций. При исключении (или частичного снижения требований к влажности топлива) из цикла топливоподготовки тепловых электрических станций процесса сушки существенно снижается и пожароопасность. Это особенно актуально, так как ежегодно на угольных ТЭС разных государств происходят крупные аварии в результате пожаров [480]. Кроме этого снижаются затраты энергии, вырабатываемой станций, на собственные нужды (сушка топлива). Также появляются возможности использования теплоты выхлопных газов котла, затрачиваемые на сушку топлива, на другие нужды (например, на нагрев теплоносителя (питательная вода)).

На Рисунке 6.2.4 приведены концентрации азотной кислоты и водяных паров в момент воспламенения частиц древесно – угольного смесевоего топлива. Можно отметить, что азотная кислота формируется в области между частицами топлива (в зоне наибольшей концентраций диоксида азота). Также анализ зависимостей, приведенных на Рисунке 6.2.4, показывает, что зоны увеличения концентрации HNO_3 соответствуют зонам снижения H_2O . Это обусловлено термохимическим реагированием диоксида азота и водяных паров.

На Рисунке 6.2.5 приведены зависимости среднеобъемной массовой концентрации (\tilde{Y}_i) компонентов газовой смеси (оксиды азота: NO , NO_2 ; пары воды (H_2O) и азотной кислоты (HNO_3)) в малой окрестности топливных частиц.

$$\tilde{Y}_i = \frac{1}{V} \iiint_0^V Y_i dV$$

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

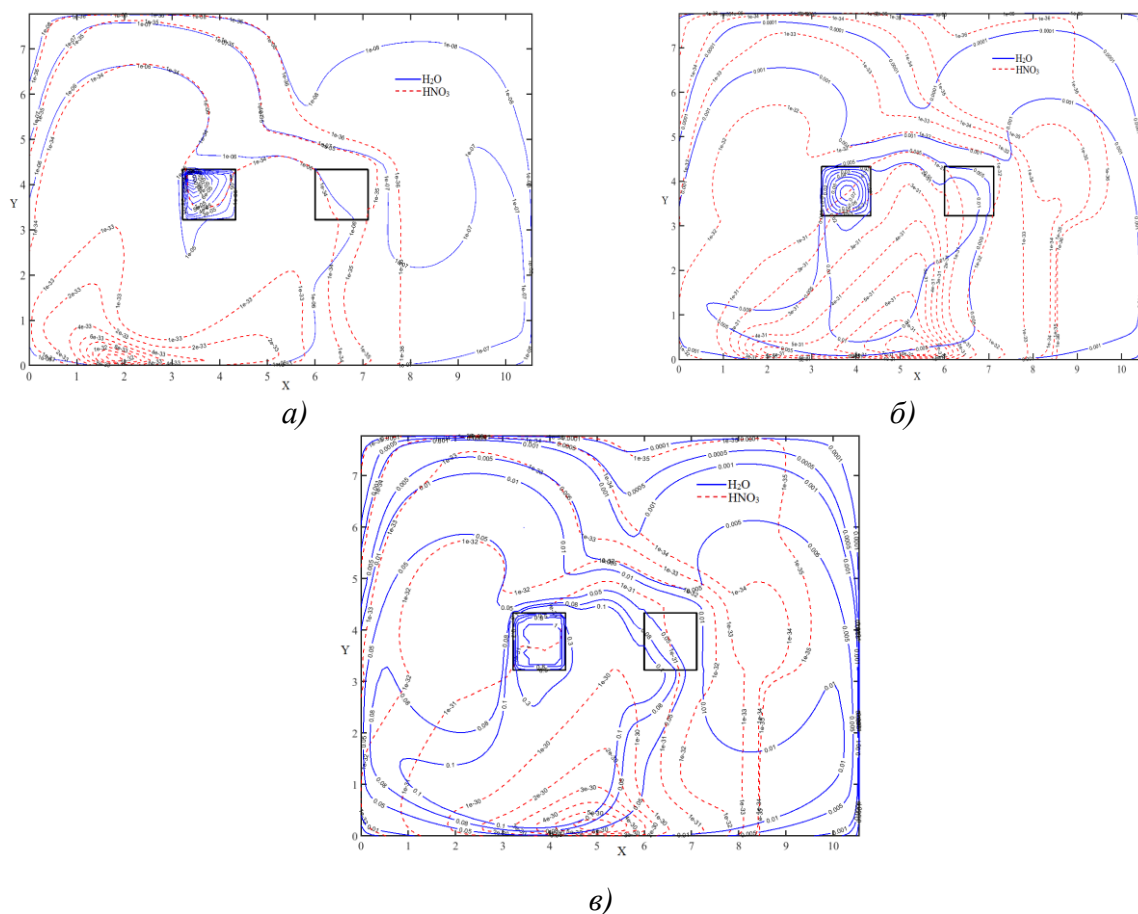


Рисунок 6.2.4 – Поля концентраций паров воды (H_2O) азотной кислоты (HNO_3) в момент воспламенения частиц угля и древесины при температуре внешней среды $T_g = 1273\text{K}$ и влажности древесины: а – $\varphi = 0\%$; б – $\varphi = 10\%$; в – $\varphi = 30\%$

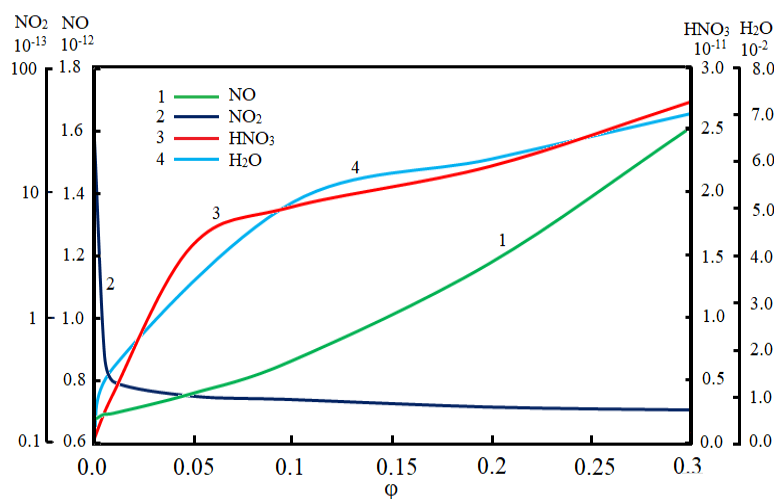


Рисунок 6.2.5 – Зависимость среднеобъемной концентрации компонента газовой смеси в момент воспламенения угольной топливной частицы

Но существенное увеличение содержания влаги в древесины приводит и к повышению концентрации окиси азота (NO) в малой окрестности частиц. Это объясняется тем, что

при высокой влажности древесины существенно возрастает период ее индукции. В этих условиях интенсивность образования NO также увеличивается.

6.3 Математическое моделирование теплофизических и термохимических процессов, приводящих к секвестрованию оксидов азота при сжигании угольного и водоугольного топлив

Перспективность водоугольных технологий доказано выше. По результатам многочисленных экспериментальных исследований (например, [151 – 153]) установлено, что при горении водоугольного топлива формируется существенно меньше (по сравнению с процессами сжигания сухого угля) антропогенных токсичных продуктов сгорания (в частности – оксидов азота (NO_x)). На настоящее время наиболее распространенная гипотеза, объясняющая подавление выбросов NO_x , базируется на представлении о том, что при горении водоугольного топлива температура факела (активной зоны окисления) существенно меньше чем при окислении сухого угля ($T_g \approx 1300\text{K}$ – при горении ВУТ [481], $T_g \approx 1700\text{K}$ – при горении угля [482]). Но при этом до настоящего времени не проведены оценки влияния возможных физико – химических процессов секвестрования оксидов азота, протекающих в индукционный период в капле (в короткий начальный период времени), а затем в частице (после удаления влаги приповерхностного слоя) водоугольного топлива.

К настоящему времени опубликовано достаточно много работ, посвященных сравнительному анализу процессов формирования оксидов азота при сжигании угольного и водоугольного топлив (например [483]). Однако стоит отметить, что большинство из опубликованных статей не рассматривают какие – либо конкретные механизмы подавления оксидов азота, а лишь констатируют факт уменьшения концентрации NO_x в продуктах сгорания.

Так, например, можно отметить работу [484], в которой приводятся результаты сравнительного анализа содержания NO_x при сжигании трех классов топлива: уголь (газовый); водоугольной суспензии на его основе; органо – водоугольное топливо ОВУТ (на базе газового угля, воды и нефтепродуктов). По результатам экспериментальных исследований установлено, что при сжигании водоугольного топлива формируется существенно меньше NO_x , чем при окислении сухого угольного топлива и ОВУТ. Авторы [484] предполагают, что существенное снижение выбросов оксидов азота связано с уменьшением температуры сгорания топлива. При этом в [484] не исследуются возможные физико – химические механизмы подавления процессов образования NO_x . Но стоит сказать, что существенное содер-

жание воды в структуре ВУТ очевидно должно влиять на механизмы протекающих в пористой структуре и в пограничном слое частицы водоугольного топлива термохимических процессов.

В [484, 485] приведены результаты экспериментальных исследований процессов сжигания композиционных топлив на основе угля, воды и промышленных отходов нефтеперерабатывающих мануфактур. Аналогично [486], авторами [484, 485] показано существенное снижение выбросов NO_x и SO_x при сжигании таких топливных композиций по сравнению с окислением сухого угля. Но при этом в [484, 485] выдвинута гипотеза о связывании NO_x водородом, формирующимся при реакции паровой газификации угля ($\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$) и при термическом разложении водяного пара ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$). Но образующийся в условиях газификации угля водород, как правило вступает в термохимическое реагирование с кислородом воздуха. При анализе гипотезы о подавлении оксида азота водородом, образующимся при ионизации водяного пара, стоит сказать, что характерные температуры этой реакции ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$) достаточно высоки (порядка 3000К, по данным [487]). Такие высокие температуры в топочном пространстве котельных агрегатов (особенно водоугольных [488]) просто не достигаются.

Можно отметить статью [239], в которой приведены результаты испытания опытно – промышленной установки по сжиганию водоугольной суспензии. Авторами установлено, что при горении водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов (сжигании большой группы капель ВУТ), образуется существенно меньше NO_x по сравнению с горением угля. Но в [239] не приведено физического описания механизмов, снижающих образование оксидов азота.

В [489] приведены результаты полевых испытаний системы очистки (мокрый скруббер) продуктов сгорания в условиях их предварительного озонирования. Авторы [489] отводят наибольшую роль в процессах подавления оксидов азота и серы водяному пару. Предполагается [489], что NO_x вступают в термохимическое взаимодействие с водяными парами, образуя азотную кислоту (HNO_3), которая впоследствии конденсируется в трактах скруббера. Отметим, что рассматриваемые в [489] процессы протекали, как правило, в относительно низкотемпературных условиях ($T_g \leq 403\text{K}$). В тоже время процессы воспламенения и горения водоугольных топлив протекают при существенно более высоких температурах внешней среды ($800 \leq T_g \leq 1400\text{K}$ [35]).

Скорее всего в период воспламенения и горения частиц водоугольных топлив в топочном пространстве протекает аналогичный описанному выше (в разделеб.2) механизм

физико – химических процессов, приводящих к секвестрованию оксидов азота за счет абсорбции NO_x водяными парами. Для доказательства последнего разработана математическая модель процессов воспламенения частиц угля и водоугольного топлива, описывающая основные теплофизические и термохимические процессы, протекающие в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений во внутривещном пространстве и пограничном слое частиц топлива.

С целью апробации разработанной авторами математической модели по основной характеристике процесса – времени задержки зажигания, проведены экспериментальные исследования процессов воспламенения и горения капель водоугольного топлива и частиц сухого угля. При проведении экспериментальных исследований использовался экспериментальный стенд, который по методам регистрации основных характеристик (время задержки зажигания t_{ign}) и условиях нагрева (температура внешней среды T_g) аналогичен стенду, схема которого приведена в разделе 2.2. В экспериментах использовались два вида топлив: водоугольная суспензия на основе длиннопламенного угля и частицы сухого угля той же марки. Методика подготовки водоугольного и угольного топлив аналогична и проводилась по схеме §2.1.

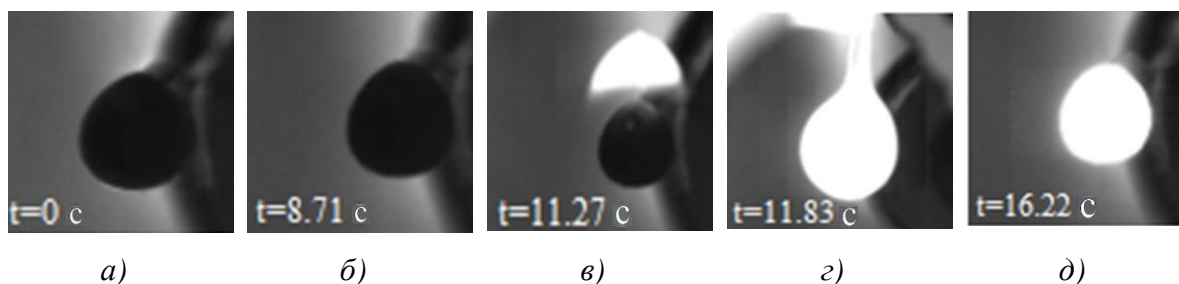


Рисунок 6.3.1 а – Типичные кадры процесса воспламенения капли водоугольного топлива в условиях высокотемпературного нагрева ($T_g = 1073\text{K}$)

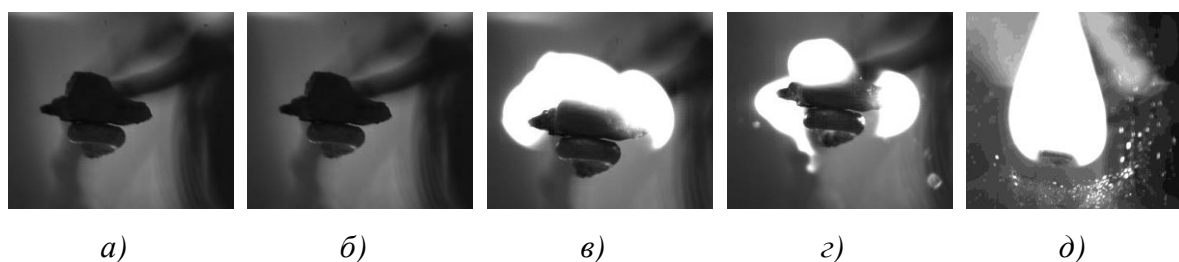


Рисунок 6.3.1 б – Типичные кадры процесса воспламенения частицы сухого угля в условиях высокотемпературного нагрева ($T_g = 1073\text{K}$)

На Рисунке 6.3.1 приведены кадры типичной видеозаписи процессов воспламенения и горения частицы (диаметром $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$ м) водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля. Температура внешней среды $T_g = 1070\text{K}$. Общее время от начала нагрева

до момента воспламенения $t_{\text{ign}} \approx 11,27$ с. Как показывают эксперименты процесс термической подготовки, зажигания и горения можно условно разделить на ряд последовательных взаимосвязанных стадий. Каждую из них можно охарактеризовать доминированием одного конкретного физического процесса (инертный нагрев, испарение воды, термическое разложение органической части топлива, воспламенение, горение). В начальный момент времени (кадр *a*) частица ВУТ представляет собой водоугольную суспензию, поверхность которой покрыта тонким слоем воды. Инертный нагрев инициирует испарение воды и (после осушения приповерхностного слоя частицы) термическое разложение органической части топлива (кадр *б*). Подробный (при большом увеличении) анализ кадра *б* показывает характерное осветление поверхности частицы. Через $t = 11,27$ с после начала нагрева происходит воспламенение (кадр *в*) летучих. Можно отметить, что зона воспламенения локализуется в верхней полусфере частицы. После зажигания летучих формируется сфера пламени (кадры *г* и *д*), размер которой в несколько раз (2 – 3) превышает диаметр частицы.

На Рисунке 6.3.1 *б* приведены типичные кадры процесса зажигания частиц угольного топлива (с характерным размером $d = 2,5 - 3$ мм). Анализ кадров позволяет сделать аналогичный рисунку 6.3.1 *a* вывод о «стадийном» (*a* – нагрев топлива; *б* – термическое разложение органической части топлива, *в* – воспламенение летучих) характере процесса зажигания. Стоит только отметить, что при зажигании частицы сухого угля отсутствует стадия испарения внутриводной влаги и, соответственно, взаимодействия паров воды с газообразными и твердыми продуктами пиролиза угля. При воспламенении газообразных продуктов пиролиза формируется сфера пламени, которая по размерам существенно (в 3 – 4 раза) превышает размеры угольной частицы. Соответственно, можно сделать аналогичный рисунку 6.3.1, *a* вывод о необоснованности применения метода приведенной тонкой пленки при моделировании процесса зажигания крупных (с характерным размером $d \geq 1,5$ мм) частиц угля.

При постановке задачи, за базовую принята совокупность физических процессов, установленная при проведении экспериментальных исследований характеристик и закономерностей процесса зажигания частиц водоугольного и угольного топлив приведены в [151]. Сформулирована физическая модель процесса воспламенения по своим основным элементам и принятым закономерностям соответствует физической постановке задачи зажигания, приведенной в разделе 2.4.

Принята математическая постановка задачи воспламенения частиц угля и ВУТ, соответствующая сформулированной физической модели, которая включает систему неста-

ционарных дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных переменных в сферической системе координат. Решена система дифференциальных уравнений, описывающих основные процессы тепломассопереноса в частице водоугольного топлива аналогичная постановке, приведенной выше в разделе 2.11. Основное отличие постановки задачи зажигания от модели, приведенной в разделе 2.11 заключается в описании процесса формирования и секвестрования оксидов азота в малой окрестности частицы и в ее пористой структуре. Также, скорости парогазовой смеси в пограничном слое топливных частиц рассчитывались из решения системы уравнений движения, записанных в переменных «ток – вихревая функция» [442]:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U_g \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{V_g}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial \Phi} + U_g \frac{\partial V_g}{\partial R} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\nabla \Omega - \frac{\Omega}{R^2 \sin^2 \Phi} - \frac{2}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial R} \right) + Ri \left(\frac{\partial \theta}{\partial \Phi} + R \sin \Phi \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) \quad (6.2.1)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \Phi^2} - \cot \Phi \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} + R^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} = \Omega R^2 \sin \Phi \quad (6.2.2)$$

$$U_g = \frac{1}{R^2 \sin \Phi} \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} \quad V_g = \frac{1}{R \sin \Phi} \frac{\partial \Psi}{\partial R}$$

При постановке задачи зажигания принята кинетическая схема образования и абсорбирования NO_x аналогичная приведенной выше в разделе 6.2 схеме. С целью верификации математических моделей воспламенения частиц угольного и водоугольных топлив проведен сравнительный анализ характерных времен задержки зажигания, полученных теоретически и экспериментально.

На Рисунке 6.3.2 приведены теоретические и экспериментальные значения t_{ign} частиц водоугольного и угольного топлив в зависимости от температуры внешней среды. Анализ зависимостей показывает хорошее (в пределах доверительных интервалов проведенных экспериментов) соответствие между теоретическими и экспериментальными значениями t_{ign} . При этом стоит отметить, что такое соответствие имеет место как для процессов воспламенения угольных частиц, так и водоугольных капель. Можно отметить существенно нелинейный, можно сказать экспоненциальный характер кривых $t_{ign}(T_g)$. Это обусловлено существенным влиянием комплекса процессов термической подготовки, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение органической части угля, воспламенение летучих, паровая газификация угля) превращений. Полиномиальная аппроксимация показывает, что зависимости $t_{ign}(T)$ имеют вид:

$$t_{ign}^c = 5660.6e^{-0.007T} - \text{время задержки зажигания частицы угля};$$

$$t_{ign}^{wcf} = 1278.0e^{-0.004T} - \text{время задержки зажигания капли ВУТ}.$$

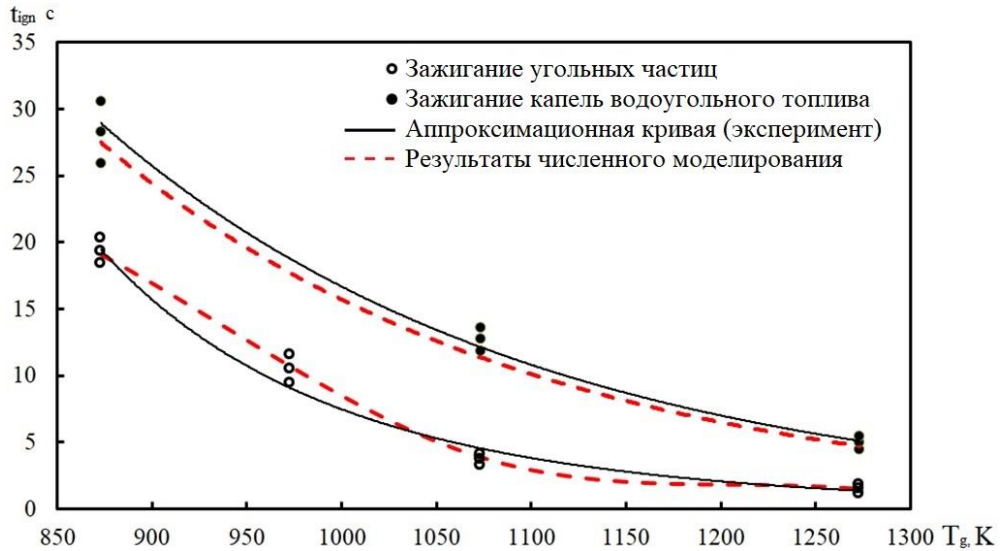


Рисунок 6.3.2 – Зависимости экспериментальных и полученных по результатам численного моделирования времен задержки воспламенения частиц водоугольного и угольного топлив от температуры внешней среды; размер частиц: водоугольного топлива – 3 мм; угля – 1,5 мм

При моделировании предполагалось, что доля органической части в топливных частицах угля и ВУТ одинакова. Соответственно, при выборе характерного размера угольных и водоугольных частиц выполнялось следующее условие:

$$m_c^{cp} = \frac{m_c^{wcf}}{\varphi_c};$$

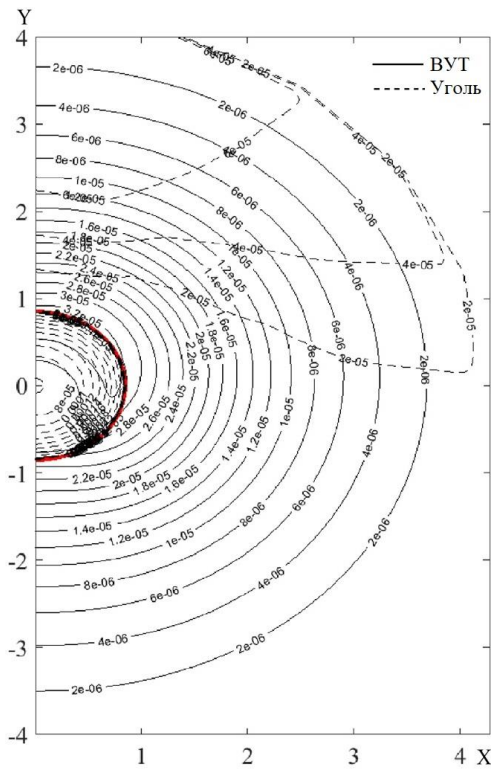
тогда в этом случае:

$$\rho_c \frac{4}{3} \pi r_c^3 = \rho_{wcf} \frac{4}{3} \pi r_{wcf}^3 \varphi_c^{-1};$$

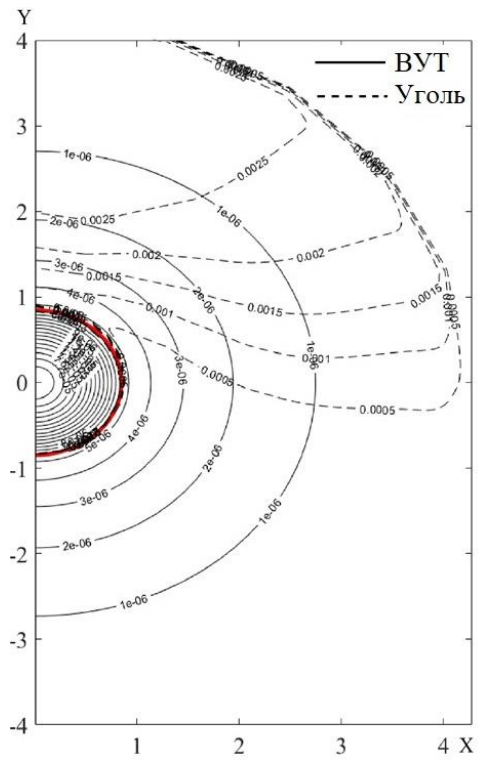
соответственно:

$$r_c = r_{wcf} \sqrt[3]{\frac{\rho_{wcf}}{\rho_c} \varphi_c^{-1}};$$

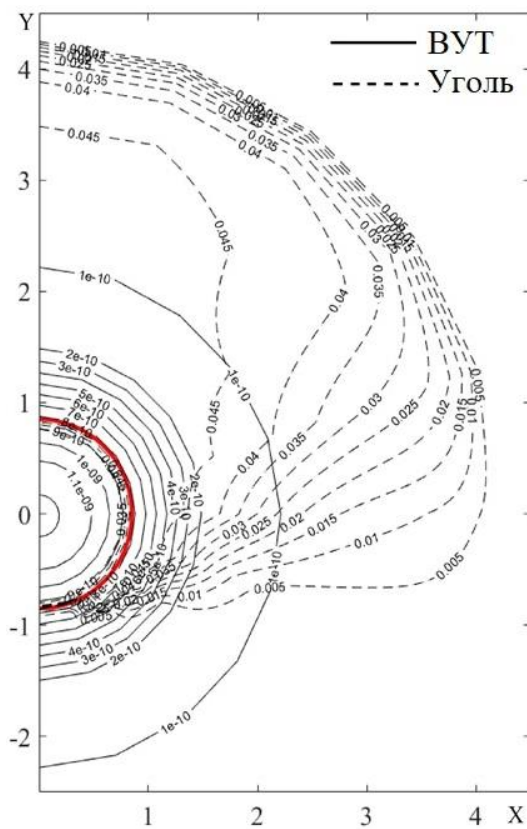
На Рисунках 6.3.3 (a – в) приведены поля концентраций NO_2 в момент воспламенения частицы угольного и водоугольного топлив при различных температурах внешней среды. Можно отметить, что температуры формирования оксидов азота при зажигании частиц угольного и водоугольного топлив сопоставимы ($T_g^{wcf} = T_g^c$). Хорошо видно, что при зажигании частиц водоугольного топлива формируется гораздо меньше оксидов азота. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что водяные пары, формирующиеся при испарении внутрипоровой влаги ВУТ, выступают в роли компонента, связывающего



а)



б)



в)

Рисунок 6.3.3 – Поля концентрации NO_2 в момент воспламенения частиц угля (размером $d = 1.5\text{мм}$) и водоугольного (размером $d = 3.0\text{мм}$) топлив.

а – $T_g = 1273\text{К}$; б – $T_g = 1273\text{К}$; в – $T_g = 873\text{К}$

NO_x. Образуется азотная кислота, которая вступает в термохимическое взаимодействие с железом минеральной части топлива. Необходимо отметить, что при зажигании капель ВУТ водяных паров образуется по массе в десятки раз (при определённых условиях даже сотни) больше, чем при зажигании частиц сухого угля. Это обусловлено высокой обводненностью водоугольного топлива. Источником воды при горении сухого угля является только адсорбционно – связанная влага и продукты реакций горения углеводородсодержащих (C_nH_m) соединений в составе газообразных продуктах пиролиза. Также немаловажным фактором является и то, что пористость водоугольной частицы существенно выше, чем пористость угля. Соответственно, можно обоснованно предположить, что взаимодействие азотной кислоты с железом минеральной части угля при воспламенении капли (а после высушивания – частицы) ВУТ протекает интенсивнее, чем при зажигании сухого угля. Последнее можно обосновать. Рассмотрим значения критериев Дарси для частиц угля и водоугольного топлива:

$$Dar_{wcf} = \frac{K_p^{wcf} P_{atm} u^*}{\mu_{gm} r^*} = 0.84 \text{ – водоугольное топливо}$$

$$Dar_c = \frac{K_p^c P_{atm} u^*}{\mu_{gm} r^*} = 0.077 \text{ – уголь.}$$

Введем в рассмотрение симплекс:

$$K_D = \frac{Dar_{wcf}}{Dar_c} = 11 \gg 1;$$

Можно отметить, что проницаемость структуры водоугольного топлива после влагоудаления существенно выше, чем у угля. В этих условиях химическое взаимодействие азотной кислоты с Fe и, соответственно, связывание NO₂ солями железа, протекает интенсивнее, чем при зажигании частиц сухого угля. Анализ зависимостей, приведенных на Рисунке 6.3.3, показывает, что в случае воспламенения водоугольного топлива NO₂.

На Рисунке 6.3.4 приведены концентрации азотной кислоты (HNO₃) и водяного пара (H₂O) в момент воспламенения частиц угольного и водоугольных топлив. Анализируя Рисунок 6.3.4, можно отметить, что зоны значительно меньших концентраций NO₂ соответствуют зонам снижения концентраций водяного пара и азотной кислоты. Это обусловлено процессами секвестрования оксидов азота посредством связывания их водяным паром и железом в пористом слое топлива после пиролиза. Также можно отметить незначительные ($Y_{HNO_3} \rightarrow 0$) значения концентраций HNO₃ при воспламенении частиц угольного топлива. Последнее объясняется тем, что водяные пары при воспламенении частиц сухого угля формируются только в результате термохимического реагирования углеводородов C_nH_m (в частности, CH₄) с кислородом воздуха. По этой причине значений концентраций H₂O при зажигании угольных частиц существенно ниже чем при воспламенении капель ВУТ.

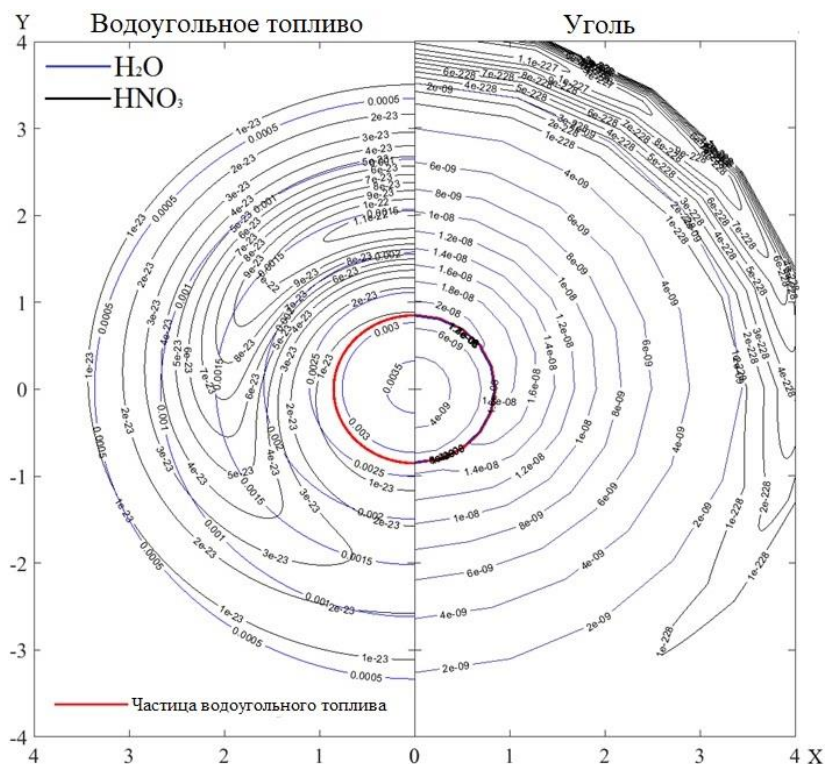
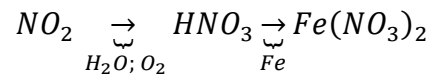


Рисунок 6.3.4 – Поле концентраций азотной кислоты (HNO_3) и водяных паров (H_2O) в момент воспламенения частиц угольного и водоугольного топлив

Выводы по шестой главе

1. Разработана гипотеза, описывающая процессы секвестрирования оксидов азота и серы, протекающие в малой окрестности частиц топливных композиций (водоугольного и древесно – угольного) в период индукции и горения. Основную роль в снижении концентрации NO_x и SO_x играют водяные пары (формирующиеся при испарении внутрипоровой и адсорбционно – связанной влаги топлива), посредством цепочки термохимических реакций переводящих оксиды азота и серы в азотную и серную кислоту соответственно.
2. Разработана самая подробная (на настоящее время) математическая модель процесса горения частиц древесно – угольного топлива, отличающаяся от известных детальным описанием физико – химических процессов, протекающих как в малой окрестности, так и во внутрипоровистой структуре частиц древесины и угля в их индукционный период.
3. Проведено теоретическое обоснование гипотезы о секвестрировании NO_x и SO_x при горении частиц древесно – угольного топлива, в результате влияния водяных паров на процессы формирования NO_x и SO_x .
4. Сформулированы новые (существенно отличающиеся от известных детальным описанием теплофизических и термохимических процессов, протекающих как в пористой структуре

частицы, так и в ее малой окрестности) математическая модели процессов воспламенения частиц угольного и водоугольного топлив. Проведено моделирование процессов формирования оксидов азота в индукционный период времени. Сформулирована гипотеза о механизме секвестрования NO_x при воспламенении частиц угольного и водоугольного топлив. По результатам численного моделирования установлено, что водяные пары, образующиеся в результате испарения внутрипоровой влаги, выступают в качестве основного реагента, связывая NO_x , с образованием азотной кислоты, которая поглощается во внутрипоровой структуре железом минеральной части угля:



По результатам численного моделирования установлено, что в идентичных по температуре внешней среды T_g условиях при воспламенении капель ВУТ образуется значительно меньше NO_x , чем при зажигании угольного топлива. Показано, что при зажигании сухого угля водяных паров в малой окрестности частицы просто недостаточно для секвестрирования оксидов азота. По этой причине при воспламенении угольных частиц оксидов азота образуется существенно больше (на 20%), чем при зажигании капель водоугольного топлива.

Основные результаты главы 6 опубликованы в [162], [170].

ГЛАВА 7 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Как уже говорилось выше в настоящее время большая часть тепловых электрических станций Европы, Северной Америки и Китая используют в качестве основного топлива уголь [260]. Одной из основных проблем современной котельной техники при сжигании угольного топлива является формирование золовых и шлаковых отложений [490 – 491]. Последние формируются в процессе горения твердого топлива и осаждаются на радиационных и конвективных поверхностях теплообмена [493, 494]. Отложение золы и шлака является значимым негативным фактором работы любого котельного агрегата [495]. Высокое термическое сопротивление золовых отложений приводит к существенному снижению эффективности передачи теплоты от топочной среды к воде в экономайзерах или пару в пароперегревателях [496, 497]. Немаловажным фактором является то, что шлакование приводит и к увеличению аэродинамического сопротивления трактов котельных агрегатов [498]. Также стоит отметить, что налипание золы, как правило происходит неравномерно по поверхности теплообмена. В результате трубная поверхность прогревается неравномерно, и возникает сильная коррозия [499].

Проведено [500] моделирование процессов осаждения шлака на трубных поверхностях теплообмена. В частности в [500], довольно подробно изучены различные механизмы налипания золы на поверхностях теплообмена. Однако стоит отметить, что при этом проблемам теплопередачи в условиях загрязнения труб котельных агрегатов золой и шлаком уделено пока мало внимание. Известны результаты [501] анализа теплопередачи от высокотемпературной газовой среды теплоносителю в топках котельных агрегатов в условиях загрязнения теплообменных поверхностей шлаком. Однако большинство работ [502 – 505] по этой тематике посвящены изучению теплофизических свойств (плотность (ρ), теплопроводность (λ) и теплоемкость (C)) шлака. Такие исследования проводятся при постоянной толщине шлакового слоя золы. В тоже время известно, что в процессе осаждения золы на поверхность теплообмена толщина слоя шлака постоянно растет. Соответственно характеристики теплопередачи к теплоносителю также будут изменяться с течением времени. Одной из основных причин формирования золовых отложений на трубных поверхностях котельных агрегатов является то, что температура горения топлива выше температуры плавления золы [490].

К настоящему времени разработано нескольких способов [506 – 508] борьбы с шлаковыми отложениями на поверхностях теплообмена. Первый заключается в понижении

температуры в основной зоне горения. Последнее достигается применением циркулирующего кипящем слое (ЦКС) [506] или сжиганием в низкотемпературном вихре [507]. Однако эти технологические решения пока трудноприменимы вследствие высокой стоимости котельно – вспомогательного оборудования. Еще один метод базируется на технологии сжигания угля в высокотемпературном циклонном муфельном предтопке [508]. В результате сжигания в таком топочном устройстве практически вся зола спекается в жидкошлаковый расплав, который стекает в шлаковую ванну. Однако в таком случае увеличивается количество теплоты, уносимое шлаком.

Большая группа методов борьбы с отложениями базируется на применении различных методов очистки поверхностей теплообмена (водяная обмывка [509], паровая или воздушная обдувка [510]). Для очистки внутритопочных поверхностей теплообмена чаще всего используется водяная обмывка с использованием струйных обмывочных аппаратов. В таком случае разрушение шлаковых отложений происходит за счет термошока и ударно – динамического воздействия струи воды [511]. Однако высока вероятность попадания части обмывочной воды на открытые (без шлаковых отложений) поверхности. В результате резко меняются условия теплообмена (происходит испарение воды с поверхности трубы) и как следствие возможно опрокидывание циркуляции [512]. Также попадание воды на трубную поверхность приводит к высоким локальным термическим напряжениям [513]. Последнее может привести к разрушению металла и соответственно разрыву трубы.

Применение паровой или воздушной обдувки поверхностей теплообмена позволяет снизить золовой занос труб. Однако такой способ эффективен только по отношению к трубам, которые стоят в первом (во фронте) ряду трубного пучка [514]. В тоже время поверхности второго и дальних рядов труб не обдуваются потоком, и по этой причине практически не очищаются [514]. Стоит отметить, что использовать для очистки вода или водяного пара приводит и к увлажнению продуктов сгорания. Это повышает интенсивность формирования серной кислоты и как следствие к повышенной коррозии низкотемпературных поверхностей теплообмена [515]. Также увеличение влажности продуктов сгорания увеличивает адгезийные свойства летучей золы и приводит к интенсивному ее отложению во внешних газоходах котла и в дымовых трубах [516].

Установлено [517 – 521], что один из возможных перспективных вариантов «малозольного» сжигания – является применение водоугольного топлива (ВУТ). Вследствие того, что ВУТ содержит в своем составе до 60% воды температура горения такого топлива существенно ниже ($T_g \leq 1100\text{K}$), чем традиционного пылеугольного факела ($T_g \geq 1400\text{K}$) [522]. Другими словами, температура горения водоугольного топлива ниже температуры

начала шлакования T_g [239]. Массовая скорость оседания золы при таком значении T_g не велики $W_{ssg} \rightarrow 0$. Соответственно можно обоснованно предположить, что толщины золовых отложений при сгорании ВУТ будут минимальны. Также можно сказать, что зола, формирующаяся при сжигании водоугольного топлива, скорее всего не плавится. Соответственно при горении ВУТ образуются не твердые монолитные золовые отложения (как в случае сжигания угля), а рыхлый слой шлака. Последний разрушается под воздействием собственного веса. Также немаловажным фактором является, то что степень сгорания частиц ВУТ достигает 99,6% [522], соответственно меньше формируется и золы остатка. Известно [523], что в процессе горения капля водоугольного топлива (в отличие от угольной пыли) существенно увеличивается в размере (можно сказать «разбухает»), такие частицы обладают значительно меньшей массой и плотностью. Соответственно они относительно легко могут быть удалены из топочного пространства. Обобщая все вышеизложенное можно предположить, что характеристики теплопередачи через трубную стенку и золовой слой при сжигании водоугольного топлива и угля могут существенно отличаться.

На настоящее время практически не проведено исследований по сравнительному анализу механизмов осаждения золы, образующейся при сжигании угля и водоугольного топлива. Можно отметить технический отчет научно – исследовательской лаборатории строительной техники США за 1992 год [524]. Последний подтверждает ранее высказанные тезисы о механизмах осаждения золы. В [524] утверждается, что при горении водоугольного топлива температура внутрикамерной среды существенно ниже чем при окислении угля. Последнее удерживает золу от агломерации. При этом в [524] говорится, что технология ВУТ позволяет проводить выщелачивание солей в процессе термической подготовки топлива к сжиганию. Однако в тоже время в отчете показано, что при сжигании водоугольного топлива образуются золовые частицы большого размера, которые легко осаждаются на поверхность теплообмена и формируют обширные слои шлака. Это обусловлено существенным влиянием сил адгезии. Последнее объясняется наличием несгоревшего углерода в золовой частице золы. Это возможно только в двух случаях: если неправильно организован режим горения топлива или котел работает в нерасчетном режиме. Соответственно, при правильной организации режима сжигания ВУТ можно снизить влияние сил адгезии и когезии при формировании слоя шлака на поверхностях нагрева. К последнему стоит добавить, что как уже указывалось в [524] (этот тезис подтверждается в [525]) при сжигании водоугольных частиц образуются крупные золовые пористые ценосферы. Последние обладают малой массой и большим диаметром (соответственно и высоким аэродинамическим сопротивлением). В этом случае, можно обоснованно предположить, что при правильной

организации аэродинамического режима топки котельного агрегата (например, в циклонном предтопке) возможно удаление золовых частиц водоугольного топлива из внутритопочного пространства, без их осаждения на поверхность нагрева.

Но до настоящего времени не проводилось сравнительного анализа теплопередачи через стенку трубы (в условиях золовых отложений) при сжигании угольного и водоугольного топлив. Поэтому цель этого параграфа диссертации – моделирование процессов теплопередачи через слой золовых натрубных отложений в условиях формирования, соответствующих сжиганию угольного и водоугольных топлив.

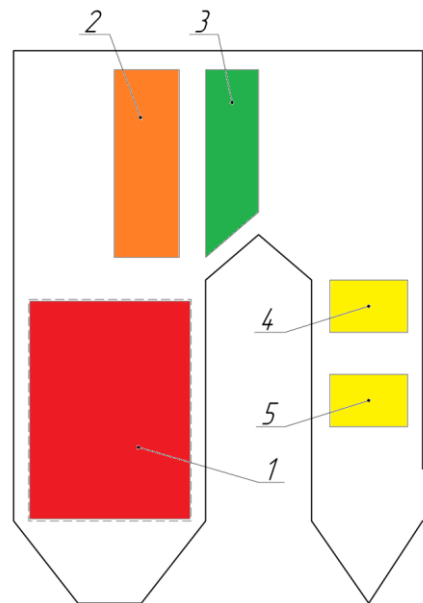


Рисунок 7.1 – Зоны образования золы в котельной [168]:

1 – поверхности дисплея (высокотемпературная зона, в которой образуются твердые отложения железа); 2 – крышка пароперегревателя (высокотемпературная зона); 3 – конвективный пароперегреватель (низкотемпературный диапазон, в котором угол атаки потока $\alpha = 90^\circ$); 4 – экономайзер (низкотемпературная зона с рыхлыми отложениями) 5 – воздухонагреватель (низкотемпературная зона)

Интенсивность формирования отложений на поверхности нагрева существенно зависит места локализации процесса осаждения в топочном пространстве [524]. Это обусловлено сочетанием группы факторов (температура золы и внешней среды, скорость и угол атаки обдува дымовыми газами, состав золы). По этой причине величина скорости роста золовых отложений в разных местах топочного пространства отличается (Рисунок 7.1) [525]. Так на экранных поверхностях (наиболее энергонапряженное место) формирование слоя золы протекает посредством налипания частиц, содержащих железистые композиты

(Fe – FeS – SiO₂, FeO – FeS, расплавы перозетина FeS и пирита FeS₂). Последние при температурах (более 1110 К) обладают высокими адгезионными свойствами и формируют прочные отложения.

Наиболее сильно подвержены загрязнению конвективные поверхности пароперегревателей [525]. Температура дымовых газов при их обтекании уменьшается примерно до $T_g \approx 1000\text{К}$. Несмотря на падения температуры продуктов сгорания характер процесса формирования отложений такой же, как и на экранных поверхностях теплообмена. Однако в отличие от последних угол атаки потока $\alpha \approx 90^\circ$ [525]. При этом толщина отложений может достигать 200мм через 2 часа работы котельного агрегата.

В экономайзерной части котельного агрегата температура продуктов сгорания уменьшается до $T_g \approx 800\text{К}$. По этой причине на трубах водяных экономайзеров формируются, условно говоря, менее монолитные «рыхлые» отложения [525]. На основании известных [525] закономерностей формирования золовых отложений сформулирована следующая постановка задачи. Предполагается, что в начальный момент времени ($t = 0\text{с}$) трубная поверхность теплообмена пароперегревателя нагревается за счет конвекции и излучения топочных газов (Рисунок 7.2). С момента времени $\tau = t_{\text{ssa}}$ начинается процесс формирования золовых и шлаковых отложений. При этом на поверхности трубы формируется слой золы с низкими коэффициентами теплопроводности. Предполагается, что температура золы, оседающей на трубу равна температуре потока. Для определения эффективности теплопередачи в системе «внутритрубная среда – стенка трубы – слой золы – внешняя среда» решалась задача теплопроводности.

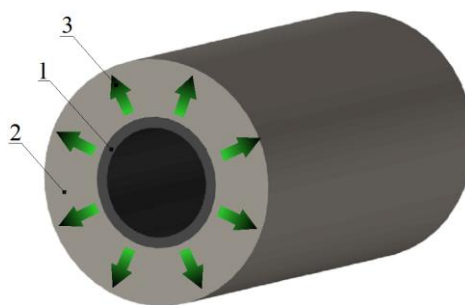


Рисунок 7.2 – Схема области решения проблемы [168]:

1 – стенка стальной трубы; 2 – слой золы; 3 – условное обозначение движения границы раздела системы «слой золы – внутрикамерная среда»

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

– металлическая труба

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda_1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \lambda_1 \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (7.1)$$

– слой золы отложений

$$c_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda_2}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_2}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \lambda_2 \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (7.2)$$

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

$$r_{oda} = \int_0^{\tau} V_{rs} d\tau \quad (7.3)$$

где $V_{rs} = W_{rs}/\rho_s$ – линейная скорость образования отложений, $W_{rs} = f(T)$ – массовая скорость образования золы $\text{кг/м}^2\text{с}$ ([239] для ВУТ, [525] при сжигании угля).

Система уравнений решалась при следующих краевых условиях.

Начальные условия:

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

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

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

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

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{id}} = \alpha \cdot [T_w - T(r_{id}, \varphi, z, \tau)] \quad (7.4)$$

На границе раздела системы «трубная поверхность – топочная среда» при $t = 0$ задавался закон теплообмена:

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_t} = \alpha_t \cdot [T_g - T(r_t, \varphi, z, \tau)] + \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot [T_g^4 - T^4(r_t, \varphi, z, \tau)] \quad (7.5)$$

Аналогичные условия сформулированы и на границе системы «золы отложения – газовая среда» при $t > t_{ssa}$:

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_t} = \alpha_t \cdot [T_g - T(r_t, \varphi, z, \tau)] + \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot [T_g^4 - T^4(r_t, \varphi, z, \tau)] + Q_m \rho_{slag} \frac{d\xi_{mf}}{dt}; \quad (7.6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} = 0 \quad (7.7)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}^{z=L_z} = 0 ; \quad (7.8)$$

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

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} ; \quad (7.9)$$

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

Задача, решалась в три этапа. На первом, рассчитывался теплообмен в системе «дымовые газы – трубная поверхность – теплоноситель». В момент времени $t = t_{ssa}$ начинался расчет процесса осаждения шлака на поверхности нагрева. Учитывался процесс, формирования слоя золы с высоким термическим сопротивлением. При этом температура золы принималось равной температуре начала шлакования [525]. В дальнейшем тепло от газовой среды к теплоносителю передается через трубную стенку и постоянно увеличивающийся слой золовых отложений. При решении задачи предполагалось, что процесс отложений заканчивается, когда температура поверхности золовых отложений становится равной T_{liquid} ($T_{liquid} = 1375K$ – температура плавления золы [525]). Последнее обуславливается тем, что в жидком состоянии слой отложений перестает расти и жидкая зола стекает в холодную воронку котла. Тепловой баланс системы «дымовые газы – трубная поверхность – зола – теплоноситель» рассчитывался по следующей схеме. Для анализа эффективности теплопередачи через золовые отложения рассчитывалась теплота, отведенная за счет теплообмена от внутренней поверхности трубы:

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

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

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

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

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

Теплота кристаллизации шлакового расплава:

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

Тепло, накопленное в материале стенок трубы за счет теплоемкости:

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

Тепло, аккумулированное в шлаковом слое за счет теплоемкости:

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

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

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

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

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

Сформулированная краевая задача математической физики решена методом конечных разностей аналогично [526]. Аппроксимация уравнений проводилась с использованием неявного четырех точечного разностного шаблона (Рисунок 7.3). Задача формирования золовых отложений решалась методом накопления шага по времени [151]. Дискретизацию трехмерных уравнений проводили с применением локально – одномерного метода Самарского А.А. [527]. Например, уравнение (7.1) аппроксимируется следующим образом:

$$\begin{aligned} C_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \frac{\lambda_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \right] + \frac{\lambda_1}{r^2} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \theta^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \Rightarrow \\ \Rightarrow C_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{i,j,k}^n}{\tau} &= \frac{\lambda_1}{r_i} \cdot \frac{1}{h_r^2} \left[r_{i+\frac{1}{2}} \cdot \left(T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} \right) - r_{i-\frac{1}{2}} \cdot \left(T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right] \Rightarrow \\ \Rightarrow C_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{T_{i,j}^{n+\frac{2}{3}} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{3}}}{\tau} &= \frac{\lambda_1}{r_i^2} \cdot \frac{T_{i,j+1,k}^{n+\frac{2}{3}} - 2 \cdot T_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} + T_{i,j-1,k}^{n+\frac{2}{3}}}{h_\theta^2} \Rightarrow \\ \Rightarrow C_1 \rho_1 \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+\frac{2}{3}}}{\tau} &= \lambda_1 \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - 2 \cdot T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1}}{h_z^2} \end{aligned}$$

$$\text{где } r_{i+\frac{1}{2}} = \frac{r_i+r_{i+1}}{2}, r_{i-\frac{1}{2}} = \frac{r_i+r_{i-1}}{2}.$$

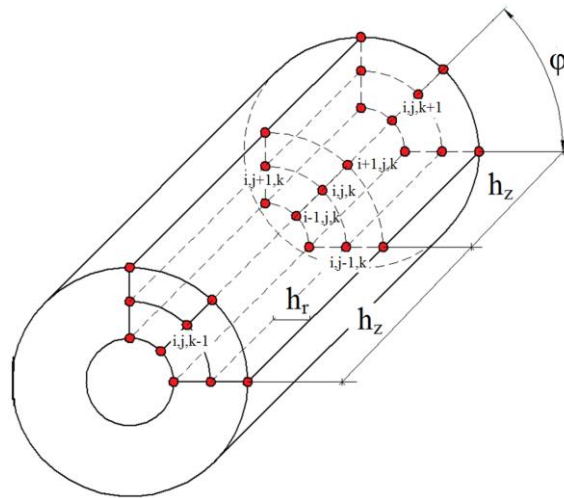


Рисунок 7.3 – Схема аппроксимации [168]

Исходные данные для расчета приведены в приложении А. Методы решения задачи подробно изложены в приложении В. Условные обозначения приведены в приложении Г. На Рисунке 7.4 представлены результаты расчета теплового баланса для системы «трубопроводная среда – стенка трубы – зольные отложения – продукты горения». Можно отметить, что максимальное значение Δ расчетов составляет не более 4%. Также с целью дополнительной проверки численного решения было проведено сравнение Δ для расчетов теплового баланса для различных параметров разностной сетки. Трехмерная разностная сетка варьировалась от $10 \times 10 \times 10$ до $100 \times 100 \times 100$.

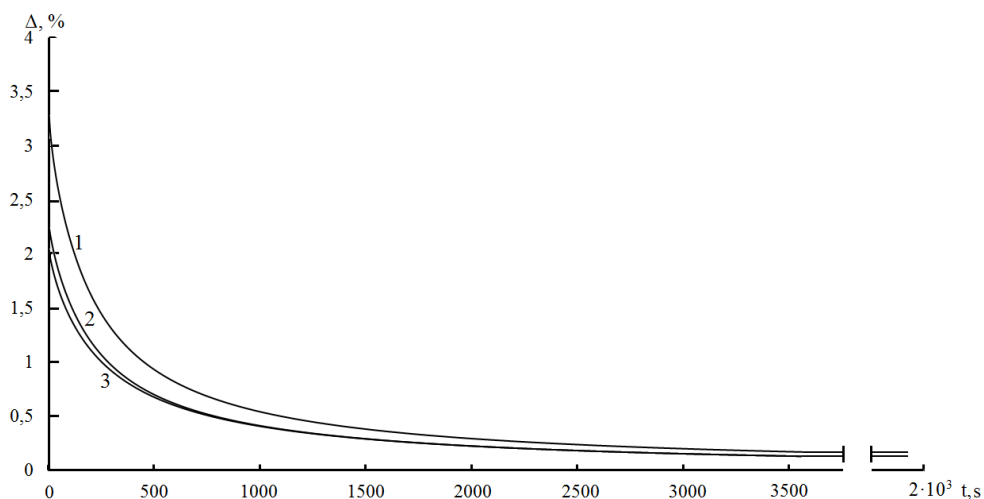


Рисунок 7.4 – Зависимость погрешности расчета теплового баланса от времени для различных параметров сети: разностная сетка размером:

1 – $10 \times 10 \times 10$; 2 – $50 \times 50 \times 50$; 3 – $100 \times 100 \times 100$ [168]

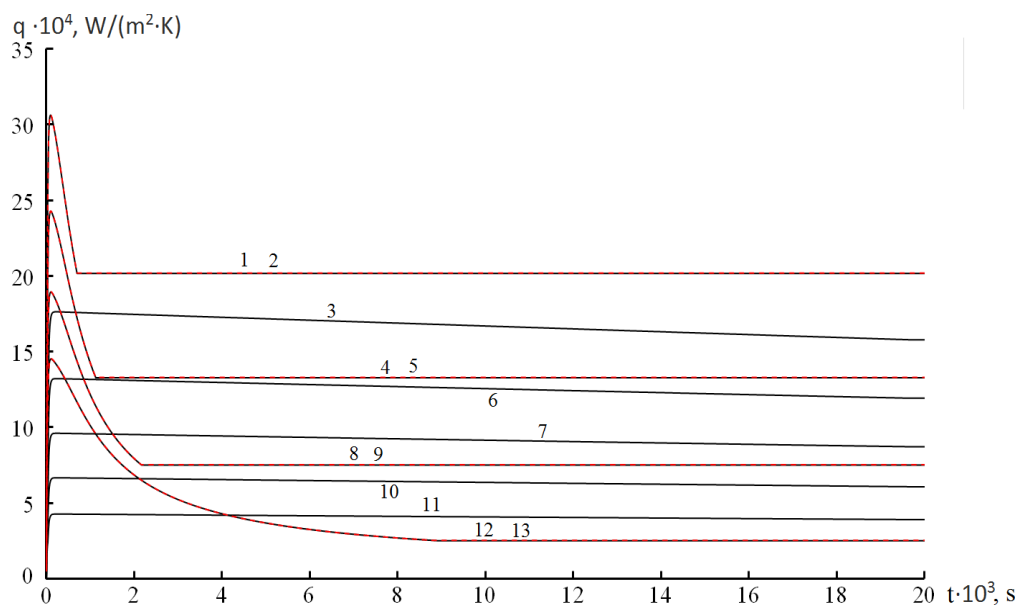


Рисунок 7.5 – Зависимость значений теплового потока от внутренней стенки трубы к теплоносителю от времени работы котельного агрегата при температуре окружающей среды [168]:

1, 2 – $T_g = 1700\text{K}$; 3 – $T_g = 1200\text{K}$; 4, 5 – $T_g = 1600\text{K}$; 6 – $T_g = 1100\text{K}$; 7 – $T_g = 1000\text{K}$;
8, 9 – $T_g = 1500\text{K}$; 10 – $T_g = 900\text{K}$; 11 – $T_g = 800\text{K}$; 12, 13 – $T_g = 1400\text{K}$

На Рисунке 7.5 приведены зависимости величины теплового потока ($q(t)$ Вт/(м²К)) от внутренней стенки трубы к теплоносителю (пар) в условиях формирования отложений золы на поверхностях теплообмена. Температура топочной среды в случае сжигания угля варьировалась в диапазоне $1400 \div 1700\text{K}$, при горении ВУТ $T = 800 \div 1200\text{K}$. Анализ кривых показывает, что в период времени до $t \approx 5 \cdot 10^3\text{c}$ сжигание угля более эффективно по сравнению с водоугольным топливом. Это обусловлено тем, что температура факела угля намного выше, чем у ВУТ. Однако при формировании золовых отложений на трубной поверхности интенсивность теплопередачи при сжигании угля снижается. Последнее объясняется тем, что при налипании золы образуется слой шлака, обладающий высоким термическим сопротивлением. В результате, по истечению периода времени $\tau \approx 5 \cdot 10^3\text{c}$ тепловой поток при сжигании водоугольного топлива превышает значение $q(t)$ в пылеугольной топке. В том случае если температура факела ВУТ меньше T_g угля, хотя бы на 500K , то эффективность передачи теплоты у пылеугольной топки будет выше, чем у водоугольной.

Анализ влияния процессов кристаллизации шлакового расплава при его осаждении на поверхности нагрева показал, что им можно пренебречь при расчете характеристик теплообмена. Это объясняется малой величиной теплового эффекта фазового перехода ($\leq 100\text{кДж / кг}$).

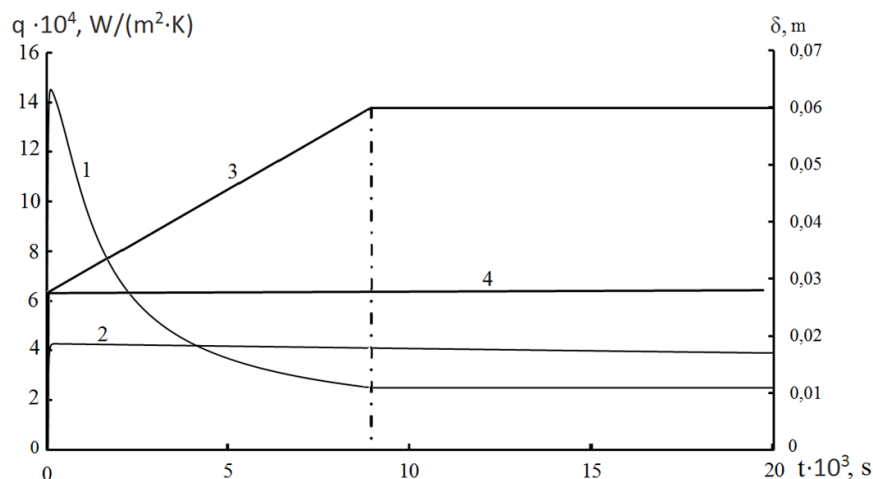


Рисунок 7.6 – Зависимость теплового потока на внутренней стенке трубы к внутренней трубе к теплоносителю и толщине золы от времени при горении ВУТ и угля [168]. Температура продуктов сгорания $T_g = 1400\text{K}$ (горение угля) и $T_g = 1200\text{K}$ (горение ВУТ): 1, 2 – тепловой поток; 3, 4 – толщина золовых отложений; 1, 3 – сжигание угля; 2, 4 – сжигание ВУТ

На Рисунке 7.6 приведены зависимости тепловых потоков от внутренней стенки трубы к теплоносителю (пар) и толщин золовых отложений от времени в условиях сжигания угля и ВУТ. Анализ кривых показывает, что в начальный период работы котельного агрегата угольные топki более выгодны, по сравнению с водоугольными. Но при больших временах работы эффективность последних существенно повышается. Необходимо отметить, что при сжигании ВУТ температура факела ($T_g \leq 1300\text{K}$) намного ниже чем у чисто угольного ($T_g \leq 1700\text{K}$). Другими словами, ниже температуры начала шлакования. По этой причине при сжигании ВУТ массовая скорость оседания золы на поверхность трубы намного (примерно в 100 раз) меньше чем при сжигании угля. Также стоит сказать, что при сжигании водоугольного топлива (как правило) формируются рыхлые (не монолитные) отложения золы. Последние легко саморазрушаются под собственным весом, соответственно толщины таких отложений как правило не велики.

На Рисунке 7.7 приведены распределения температур в системе «стенка трубы – отложения золы» в случае сжигания угля и ВУТ. Сравнивая кривые можно отметить, что в период времени до начала шлакования температурные градиенты (как в случае сжигания угля, так и при горении ВУТ) в стенке трубы не высоки (ΔT не более 20K). После формирования золовых отложений $\text{grad}(T)$ в системе «трубная стенка – слой золы» существенно меняется. При этом наибольший перепад температур в слое золы. Стоит отметить, что в случае сжигания угля, не смотря на более высокие температуры окружающей среды, температура

на внутренней поверхности трубы уменьшается. Соответственно, можно обоснованно предположить, что снижается и тепловой поток от топочной среды к теплоносителю.

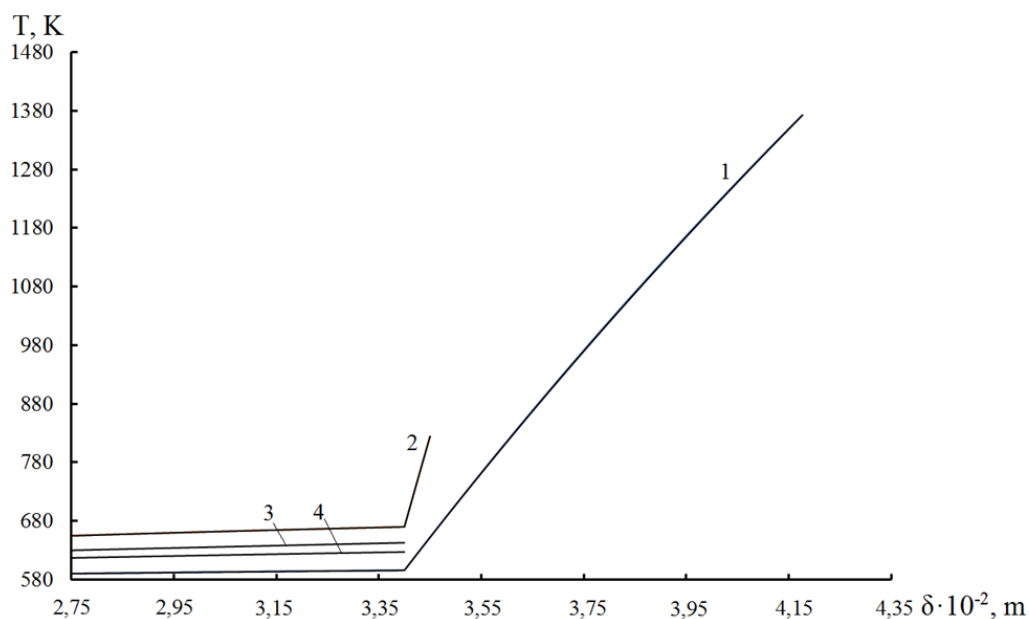


Рисунок 7.7 – Распределение температур в системе «трубная стенка – слой отложений» при сжигании угля и ВУТ при температурах окружающей среды $T_g = 1400\text{K}$ (в случае сжигания угля) и $T_g = 1200\text{K}$ (при сжигании ВУТ) [168]:

1, 2 – момент времени $t = 20 \cdot 10^3 \text{ с}$; 3, 4 – начало образования золы; 2, 4 – сжигание ВУТ; 1, 2 – при сжигании угля.

На Рисунке 7.8 приведены зависимости температуры поверхности трубы (с учетом формирования золовых отложений) от времени. Анализ кривых показывает, что процесс теплопередачи можно условно разделить на три стадии. На первой происходит теплопередача через условно «чистую» трубную поверхность ($t \leq 30 \text{ с}$). За тем начинается процесс формирования натрубных золовых отложений, при этом температура поверхности постепенно растет до значения T_{liquid} . На третьем этапе температура поверхности золового слоя остаётся постоянной. Последнее свидетельствует о том, что режим теплообмена стационарный. Анализ кривых показывает, что в случае сжигания водоугольного топлива температура поверхности шлакового слоя намного ниже, чем при сжигания угольного топлива ($T_{\text{sur}} \approx 1360$ – уголь, $T_{\text{sur}} \approx 760$ – ВУТ). Последнее свидетельствует о том, что скорее всего тепловой поток от газовой (топочной) среды к трубной стенке при сжигании водоугольного топлива будет намного выше чем при горении угля.

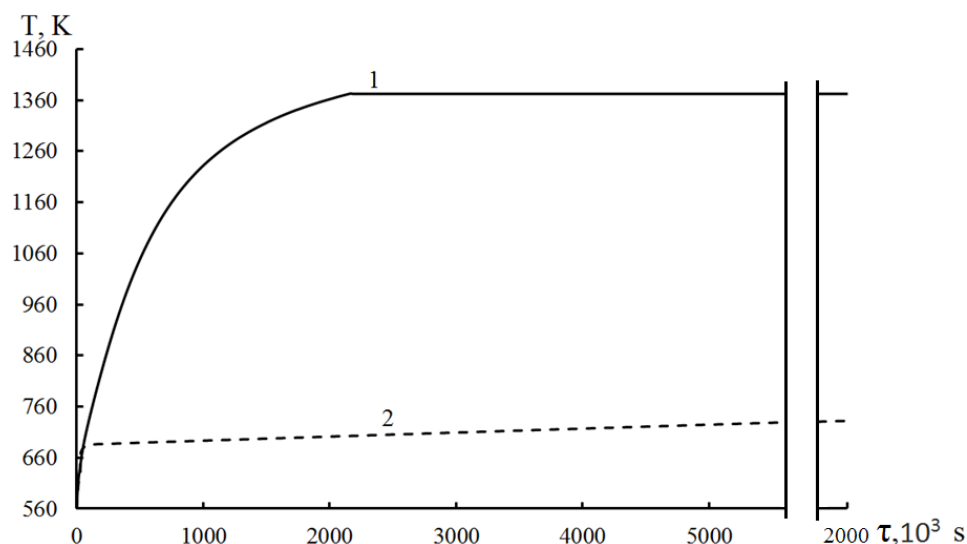


Рисунок 7.8 – Зависимость температуры поверхности трубы (включая отложения золы) от времени: 1 – при сжигании угля ($T_g = 1500\text{K}$); 2 – при сжигании ВУТ ($T_g = 1000\text{K}$)

Выводы по седьмой главе

По результатам математического моделирования были получены зависимости тепловых потоков внешней среды от времени при сжигании двух видов топлива (пылеугольного и водоугольного топлива). Установлено, что в начальный период времени работы котельного агрегата сжигание угольного (в пылевидном состоянии) топлива более эффективно, чем водоугольного. Последнее обусловлено более высокой температурой топочной среды. Однако при работе котла более долгий период времени коэффициент использования теплоты сгорания у водоугольных котлов выше чем в пылеугольных котельных агрегатах. Это обусловлено тем, что при сжигании угольного топлива на поверхности труб паропегревателей формируются прочные золовые отложения, существенно ухудшающие условия теплопередачи. В случае сжигания ВУТ таких отложений образуется намного меньше. Другими словами, можно сказать, что водоугольные котельные агрегаты могут быть намного эффективнее пылеугольных, даже более низких температурах топочной среды. При этом стоит отметить, что котлы, сжигающие ВУТ, имеют не только более высокий термический, но и эксергетический коэффициент полезного действия.

Основные результаты главы 7 опубликованы в [168].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе решена очень важная научно – практическая проблема современной энергетики – разработка теоретических основ прогнозирования значений интегральных характеристик процессов термической подготовки и зажигания существенно неоднородных энергоэффективных и экологоперспективных композиционных топлив на основе угля: водоугольного, био – водоугольного, органо – водоугольного топлив, а также сухих топливных смесей уголь/биомасса.

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

2. По результатам диссертационного исследования разработан полностью автономный инженерный прогностический аппарат, отличающийся от известных моделей детальным описанием в рамках моделей механики сплошной среды процессов зажигания и горения частиц существенно неоднородных композиционных топлив на основе угля, в условиях интенсивного радиационно–конвективного нагрева в типичном для современной котельной техники температурном диапазоне внешней среды от 800 К до 1500 К. Разработанные модели комплексно описывают процессы радиационно–конвективно–кондуктивного теплопереноса, фильтрацию газообразных продуктов пиролиза и водяных паров сквозь пористую структуру топлива, фазовые переходы (испарение воды и жидкого горючего), термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы (в условиях сложноразветвлённой кинетики), диффузию летучих в малой окрестности топливных частиц, газофазное воспламенение парогазовой смеси (с учетом сложности кинетической схемы реагирования), гетерогенное окисление углерода кокса, протекающих при воспламенении и горении частиц композиционных топлив на основе угля.

3. Разработаны автономные программные комплексы, для проведения инженерных расчетов характеристик и условий процессов зажигания и горения частиц многокомпонентных, существенно неоднородных и высокообводненных композиционных топлив в

условиях, советующих (по температуре внешней среды $800 < T_g < 1500\text{K}$) камерам сгорания типичных котельных агрегатов ТЭС.

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

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

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

7. Приведено фундаментальное обоснование экономических преимуществ сжигания водоугольного топлива в топочных устройствах котельных агрегатов ТЭС по сравнению с однородным углем. По результатам моделирования процессов теплопередачи от внутритопочной среды к теплоносителю (водяной пар или вода) установлено, что инте-

гральный коэффициент использования теплоты сгорания у водоугольных котельных агрегатов по крайней мере не ниже аналогичных коэффициентов пылеугольных котлов. Показано, что при сжигании водоугольных топлив при температуре внешней среды $T_g=1200\text{K}$ и однородного угля при $T_g=1400\text{K}$ эффективность сжигания ВУТ в 2 раза выше по сравнению со сжиганием однородного угля.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stracher G.B., Anupma P., Sokol E.V. Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Elsevier Science. 2010. P. 63 – 81.
2. Stracher G.B. Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Elsevier Science. 2019. P. 542
3. Эштон Т.С., Сайкс Дж. Угольная промышленность восемнадцатого века. 1929 г.
4. Бакстон, Н.К. Экономическое развитие британской угольной промышленности: от промышленной революции до наших дней. 1979 г.
5. Longwell J.P. Coal: energy for the future/Longwell J.P., Rubint E.S., Wilso J.//Progress in Energy and Combustion Science. – 1995. – V. 21. – pp. 269 – 360
6. Wang R.Q. Energy saving technologies and mass – thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review/ Wang R.Q., Jiang L., Wang Y.D., Roskilly A.P// Journal of Cleaner Production. – 2020. – V.274. – pp. 122997
7. North L. Methods of coke quality prediction: A review./ North L., Blackmore K., Nesbitt K., Mahoney M.R.//Fuel. – 2018. – №219. – pp. 426–445
8. Miller B.G. Clean Coal Engineering Technology. Elsevier Science. 2017. P. 856.
9. Нигматулин Б.И. Прогноз мирового электропроизводства на аэс на 2015 – 2050 годы/ Нигматулин Б.И.//Энергетическая политика. – 2017. – №3. – С.78 – 89.
10. Chen H. International crude oil price, regulation and asymmetric response of China's gasoline price/Chen H., Sun Z.// Energy Economics. – 2021. №94. P.105049.
11. Ederington L.H. The relation between petroleum product prices and crude oil prices./ Ederington L.H., Fernando C.S., Lee T.K., Linn S.C., Zhang H.//Energy Economics. – 2021. – №94. p.105079
12. Richardson M. Hydrocarbon viability prediction of some selected reservoirs in Osland Oil and gas field, Offshore Niger Delta, Nigeria/Richardson M. Abraham A. Taioli F.//Marine and Petroleum Geology. – 2019. – № 100. – p.195–203
13. Safari H.O. A transpressional model for deformation patterns in northern part of dezful Embayment's oil fields in Zagros (Iran), using geo – information technologies./ Safari H.O. Bagas L.// Marine and Petroleum Geology 123 (2021) 104736
14. Leder F. This time it's different An inevitable decline in world petroleum production will keep oil product prices high, causing military conflicts and shifting wealth and power from democracies to authoritarian regimes/ Leder F., Shapiro J.N.// Energy Policy. – 2008. – №36. – p. 2850 – 2852
15. Brémond V. Does OPEC still exist as a cartel? An empirical investigation/Brémond V., Hache E., Mignon V. // Energy Economics. – 2012. – №34. – p.125 – 131

16. Bouoiyour J. The nexus between oil price and Russia's real exchange rate: Better paths via unconditional vs conditional analysis/Bouoiyour J., Selmi R., Tiwari A.K., Shahbaz M// *Energy Economics*. – 2015. – №51. – p.54 – 66.
17. Cai T. Effects of fuel composition and wall thermal conductivity on thermal and NO_x emission performances of an ammonia/hydrogen – oxygen micro – power system/Cai T., Zhao D.// *Fuel Processing Technology*. – 2020. – №209. – p. 106527
18. Yang G. Prediction of the NO_x emissions from thermal power plant using long – short term memory neural network./Yang G., Wang Y., Li X.// *Energy*. – 2020. – №192. – p.116597
19. Nakagawa K. Potential of Large Output Power, High Thermal Efficiency, Near – zero NO_x Emission, Supercharged, Lean – burn, Hydrogen – fuelled, Direct Injection Engines./ Nakagawa K., Yamane K., Ohira T.// *Energy Procedia* – 2012. – №29 – p.455 – 462
20. Stupar G. Assessing the impact of primary measures for NO_x reduction on the thermal power plant steam boiler/ Stupar G., Tucakovi D., Zivanovi T., Belo sevi S.// *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – №78. – p.397 – 409.
21. Hossain K. IECP — an approach for integrated environmental and cost evaluation of process design alternatives and its application to evaluate different NO_x prevention technologies in a 125 MW thermal power plant/Hossain K., Khan F., Hawboldt K. // *Energy for Sustainable Development*. – 2011. – №15. – p.61 – 68
22. Li K. Estimation of nox emissions in thermal power plants using eng – genes neural networks/ Li K., Peng J., Irwin G.W., Piroddi L., Spinelli W. // 16 – th Triennial World Congress, Prague, Czech Republic.
23. Miller J. A. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion/ Miller J. A., Bowman C. T. // *Progress in Energy and Combustion Science*. — Elsevier, 1989. — Vol. 15, no. 4. — P. 287–338.
24. Wüning J.A. Flameless oxidation to reduce thermal NO – formation / Wüning J. A., Wüning J. G. // *Progress in Energy and Combustion Science*. — Elsevier, 1997. — Vol. 23, no. 1. — P. 83—94.
25. Smoot L. D. NO_x control through reburning / Smoot L. D., Hill S. C., Xu H. // *Progress in Energy and Combustion Science*. — Elsevier, 1998. — Vol. 24, no. 5. — P. 385–408.
26. Adams D. Prediction of SO_x – NO_x emission from a coal – fired CFB power plant with machine learning: Plant data learned by deep neural network and least square support vector machine./Adams D., Dong – Hoon Oh, Dong – Won Kim, Chang – Ha Lee, Min Oh.// *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – №270 – p. 122310.

27. Kouravand S. Clean power production by simultaneous reduction of NO_x and SO_x contaminants using Mazut Nano – Emulsion and wet flue gas desulfurization/ Kouravand S., Kermani A.M.// Journal of Cleaner Production. – 201. – №201. – p. 229 – 235.
28. Deng J. A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels. / Deng J., Wang X., Wei Z., Wang L., Wang C., Chen Z.// Science of the Total Environment. – 2021. – №766. – p.144319.
29. Zinla D. Characterization of rice, coffee and cocoa crops residues as fuel of thermal power plant in C^ote d'Ivoire/Zinla D., Gbaha P., Koffi P.M.E., Koua B.K.// Fuel. – 2021 – №283 – p.119250.
30. Seddiek I.S. Eco – friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SO_x and NO_x emissions/Seddiek I.S., Elgohary M.M.//Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. – 2014. – № 6. – p.737 – 748.
31. Rahmaninejad F. Dry regenerable CuO/ – Al₂O₃ catalyst for simultaneous removal of SO_x and NO_x from flue gas/Rahmaninejad F., Gavaskar V.S., Abbasian J.// Applied Catalysis B: Environmental. – 2012. – №119 – 120. – p.297 – 303
32. Mathieu Y. Adsorption of SO_x by oxide materials: A review/ Mathieu Y., Tzanis L., Soulard M., Patarin J., Vierling M., Molière M.// Fuel Processing Technology. – 2013. – №114. – p. 81–100.
33. Zheng C. Formation, transformation, measurement, and control of SO₃ in coal – fired power plants/ Zheng C., Wang Y., Liu Y., Yang Z., Qu R., Ye D., Liang C., Liu S., Gao X.// Fuel. – 2019. – №241. – p. 327 – 346.
34. Williams C.A.C. Post – translational modification of SOX family proteins: Key biochemical targets in cancer? /Williams C.A.C., Soufi A., Pollard S.M. // Seminars in Cancer Biology. – 2020. – №67. – p.30 – 38.
35. Zhang H. A review on adsorbent/catalyst application for mercury removal in flue gas: Effect of sulphur oxides (SO₂,SO₃)/Zhang H., Wang T., Zhang Y., Wang J., Sun B., Wei – Ping Pan.// Journal of Cleaner Production. – 2020. – №276. – p.124220.
36. Канаев А.А. Взаимодействие энергетики и окружающей среды/ Канаев А.А., Копп И.З. // Л.: Знание, 1980. 33 с.
37. Экологические проблемы энергетики / Отв. ред. А.А. Папина. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1989. 322 с.
38. Hamza A. CO₂ enhanced gas recovery and sequestration in depleted gas reservoirs: A review./ Hamza A., Hussein I.A., Al – Marri M.J., Mahmoud M., Shawabkeh R., Aparicio S.// Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – №196. – p.107685.

39. Liu Q. Co – firing of coal and biomass in oxy – fuel fluidized bed for CO₂ capture: A review of recent advances./Liu Q., Shi Y., Zhong W., Yu A.// Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2019. – №27. – p.2261 – 2272.
40. Bainsa P. CO₂ capture from the industry sector./Bainsa P., Psarrasa P., Wilcox J.// Progress in Energy and Combustion Science. – 2017. – №63. – p.146 – 172.
41. Скалкин Ф.В. Энергетика и окружающая среда/ Скалкин Ф.В., Канаев А.А., Копп И.З. // – Л.:Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1981. 280 с.
42. Жабо В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС/Жабо В.В.// – М.: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
43. Bachmann T.M. Considering environmental costs of greenhouse gas emissions for setting a CO₂ tax: A review/ Bachmann T.M.//Science of the Total Environment. – 2020. – №720. – p. 137524.
44. Jiang X. The combustion mitigation of methane as a non – CO₂ greenhouse gas./ Jiang X., Mira D., Cluff D.L.// Progress in Energy and Combustion Science. – 2018. – №66. 176 – 199.
45. Lahijani P. Conversion of the greenhouse gas CO₂ to the fuel gas CO via the Boudouard reaction: A review/ Lahijani P., Zainal Z.A., Mohammadi M., Mohamed A.R.// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – №41. – 615 – 632
46. Chang J. Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands / Chang J., Ciais P., Gasser T., Smith P., Herrero M., Havlík P., Obersteiner M., Guenet B., Goll D.S., Li W., Naipal V., Peng S., Qiu C., Tian H., Viovy N., Yue C. Zhu D.// Nature Commun. – 2021. – №12. – p.118.
47. Reilly J. Multi – gas assessment of the Kyoto Protocol./ Reilly J., Prinn R., Harnisch J., Fitzmaurice J., Jacoby H., Kicklighter D., Melillo J., Stone P., Sokolov A., Wang C.// Nature. – 1999. – №401. –p. 549–555
48. Lee Z.H. An overview on global warming in Southeast Asia: CO₂ emission status, efforts done, and barriers./Lee Z.H., Sethupathi S., Lee K.T., Bhatia S., Mohamed A.R.// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – №28. – p.71 – 81.
49. Kiesgen de_R.R. Fighting global warming by photocatalytic reduction of CO₂ using giant photocatalytic reactors/ Kiesgen de_Richter R., Ming T., Caillol S.//Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – №19. – p.82 – 106.
50. Visser P.M. How rising CO₂ and global warming may stimulate harmful cyanobacterial blooms/Visser P.M., Verspagen J.M.H., Sandrini G., Stal L.J., Matthijs H.C.P., Davis T.W., Paerl H.W., Huisman J.// Harmful Algae. – 2016. – №54. – p.145 – 159.

51. Koornneef J. Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost./ Koornneef J., Junginger M., Faaij A.//Progress in Energy and Combustion Science. – 2007. – №33. – p.19–55.
52. Chen J. Progress of petroleum coke combusting in circulating fluidized bed boilers—A review and future perspectives./Chen J., Lu X.// Resources, Conservation and Recycling. – 2007. – №49. – p.203–216.
53. Seddighi S. Scale – up challenges and opportunities for carbon capture by oxy – fuel circulating fluidized beds./ Seddighi S., Clough P.T., Anthony E.J., Hughes R.W., Lu P.// Applied Energy. – 2018. – №232. – p.527 – 542.
54. Sheikh K.E. Advances in reduction ofNO_x and N₂O₁ emission formation in an oxy – fired fluidized bed boiler./ Sheikh K.E., Khan M.J.H., Hamid M.D., Shresth S. Ali B.Si, Ryabov G.A., Dolgushin L.A., Hussain M.A., Bukharkina T.V., Gorelova E.A.// Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2019. – №27. – p.426 – 443.
55. Pallare` s D. Macroscopic modelling of fluid dynamics in large – scale circulating fluidized beds/Pallare` s D., Johnsson F.//Progress in Energy and Combustion Science. – 2006. – №32. – p.539–569.
56. Рябов Г.А. Исследование систем улавливания и возврата на установках с циркулирующим кипящим слоем/ Рябов Г.А., Фоломеев О.М., Шапошник Д.А.// Теплоэнергетика – 2002. – №8. – с.18 – 24.
57. Рябов Г.А. Научное обоснование и методика расчета топчного контура котлов с циркулирующим кипящим слоем/ Рябов Г.А., Фоломеев О.М.// Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2010. – №3. – с.57 – 63.
58. Красинский Д.В. Численное моделирование азротермохимических процессов при факельном сжигании угля в вихревой топке с двойным верхнерасположенным дутьем/ Красинский Д.В.//Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №11. – с. 388 – 396.
59. Alekseenko S.V. Study of 3d flow structure and heat transfer in a vortex furnace/ Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Glavniy V.G., Krasinsky D.V., Rakhmanov V.V., Salomatov V.V., Shadrin E.Y.//Heat Transfer Research. – 2016. – Т.47. – №7. – с.653 – 667.
60. Ануфриев И.С. Аэродинамика перспективной конструкции вихревой топки/ Ануфриев И.С., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В.//Письма в ЖТФ. – 2015. –Т. 41 – №15. – с.25 – 32.
61. Рундыгин Ю.А. Низкотемпературное сжигание сланцев/ Рундыгин Ю.А.// — Л.: Энергоатомиздат. 1987. — 104 с.

62. Котлер В.Р. Специальные топки энергетических котлов/ Котлер В.Р. // — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 104 с.
63. Щуренко В.П. Моделирование и разработка низкотемпературных вихревых топочных устройств/ Щуренко В.П., Пузырев Е.М., Сеначин П.К. //Ползуновский вестник. 2004. №1. — с. 152–156.
64. Ma J. Pyrolysis of pulverized coal to acetylene in magnetically rotating hydrogen plasma reactor./ Ma J., Su B., Wen G., Yang Q., Ren Q., Yang Y., Xing H.// Fuel Processing Technology. – 2017. – №167. – p.721–729.
65. Ibrahimoglu B. Numerical modeling of a downdraft plasma coal gasifier with plasma reactions./ Ibrahimoglu B., Yilmazoglu M.Z.//International journal of hydrogen energy. – 2020. – №45. – p. 3532 – 3548.
66. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Plasma coal conversion including mineral mass utilization/Messerle V.E., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A.//Fuel. – 2017. – №203. – p.877–883
67. Gorokhovski M. Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory/Gorokhovski M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G., Ustimenko A.B.//Journal of the Energy Institute. – 2005. – V.78. – N4. – P.157 – 171.
68. Диденко А.Н. СВЧ энергетика: теория и практика. – М.: Наука, 2003. – 446 с.
69. Саломатов В.В. Угольные технологии с использованием СВЧ излучения/Вл.В. Саломатов, С.О. Сладков, С.Э. Пащенко, Вас.В. Саломатов // Горение и плазмохимия. – 2014. – Т. 12. – № 2. – С. 77–96.
70. Feng Yu. Microwave heating motivated performance promotion and kinetic study of iron oxide sorbent for coal gas desulfurization/Feng Yu., Wang J., Huc Y., Lu J., Zhang M. Mi J.//Fuel. – 2020. – №267 – p. 117215.
71. Yu L.Y. Thermogravimetric analysis of coal and sludge co – combustion with microwave radiation dehydration/ Yu L.Y., Li P.S.// Journal of the Energy Institute. – 2014. – №87. P. 220–226.
72. Xiao G. Analysis on cold state test of 300MW circulating fluidized bed boiler./Xiao G., Xi Y.//Energy Reports. – 2020. – №6. – p.1184–1191
73. Jeon J.H. Combustion and heat transfer characteristics in a square internally circulating fluidized bed combustor with draft tube./Jeon J.H., Kim S.D., Kim S.J., Kang Y.//Fuel. – 2008. – №87. – p.3710–3713.
74. Ludwig W. Particle electrification in an apparatus with a draft tube operating in a fast circulating dilute spout – fluid bed regime/ Ludwig W. // Particuology. – 2019. – №42. –p.146–153.

75. Jiang X. Entrainment of particles and gas induced by draft fan over the particles bed/Jiang X., Xu Y., Geng Y., Wang C., Hassan M., Meng L., Lu H.//Advanced Powder Technology – 2020. – №31. –p.198–210.
76. Surov A.V. Multi – gas AC plasma torches for gasification of organic substances/Surov A.V., Popov S.D., Popov V.E., Subbotin D.I., Serba E.O., Spodobin V.A., Nakonechny Gh.V., Pavlov A.V.//Fuel. – 2017. – №203. –p.1007–1014.
77. Alexeev H.F. Getting powerful vibrations of magnetrons in centimeter wavelength range/ Alexeev H.F., Malyarov D.E.//Magazine of Technical Physics. – 1940. – Vol. 10. – №. 15. – P. 1297—1300.
78. Аньшаков А.С. Энергетические характеристики пароводяного плазмотрона мощностью до 100 кВт / Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Радько С.И., Урбах Э.К., Фалеев В.А.// Наноматериалы и технологии. / Сб. тр. 4 – й Всеросс. научной конф. с межд. участием. 28 – 30 августа 2012 г., г. Улан – Удэ. – Улан – Удэ : Изд – во БГУ, 2012. – С. 35 – 73.
79. Баранова М.П. Возможность использования вторичных ресурсов в технологии получения топливных водоугольных суспензий/ Баранова М.П., Екатеринчев В.М // Ползуновский вестник. – 2011. – N 2, ч.1. – С.235 – 238
80. Белых Б.Н. Состояние и перспективы использования водоугольного топлива/ Белых Б.Н., Кондратьев А.С., Петраков А.П // Энергетич. стр – во. – 1992. – N 5.
81. Макарова К.В. Водоугольное топливо на основе антрацита / Макарова К.В., Савицкий Д.П., Макаров А.С., Егурнов А.И. // Энерготехнол. и ресурсосбережение. – 2010. – N 5. – С.3 – 5.
82. Горлов Е.Г. Газификация ультратонких водоугольных суспензий/ Горлов Е.Г., Андриенко В.Г., Шпирт М.Я.// Химия твердого топлива. – 2019. – N 6. – С.29 – 34.
83. Давыдова И.В. Установка с автоматическим регулированием качества водоугольной суспензии в промышленных условиях / Давыдова И.В. // Горение дисперсных топливных систем. – М.: Наука, 1969. – С.81 – 84.
84. Делягин Г.Н. О применении топливных суспензий в процессах газификации угля/ Делягин Г.Н. // ХТТ. – 1978. – N 5. – С.82 – 83.
85. Карпов Е.Г. Вариант использования водоугольного топлива на действующих ТЭС/ Карпов Е.Г., Каменев И.П.// Горение твердого топлива: тез. докл. VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13 – 16 нояб. 2012. – Новосибирск: Изд – во Ин – та теплофизики СО РАН, 2012. – С.64 – 65.

86. Архипов В.А. Исследование физико – химических и энергетических характеристик органо-водоугольных топлив/ Архипов В.А., Сидор А.М., Сурков В.Г. // Техн. теплофиз. та промисл. теплоенерг. – 2013. – N 5. – С.39 – 47.
87. Баранова М.П. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма / Баранова М.П. // Тр. КГТУ. – 2006. – N 2/3. – С.143 – 147.
88. Белов А.А. Гидротранспортирование высококонцентрированных водоугольных суспензий/ Белов А.А. // Тр. ВНИИГидроугля и горн. фак – та Сиб. металлург. ин – та. – 1965.
89. Dincşer H. The effect of chemicals on the viscosity and stability of coal water slurries/ Dincşer H., Boylu F., Sirkeci A.A., Atesbok G.// Int. J. Miner. Process. – 2003. – №70. –p. 41–51.
90. Ishibashi H. Gas holdup in slurry bubble column reactors of a 150 t/d coal liquefaction pilot plant process/Ishibashi H., Onozaki M., Kobayashi M., Hayashi J. – i., Itoh H., Chiba T.// Fuel. – 2001. – №80. –p.655 – 664.
91. Yavuz R. Combustion characteristics of lignite – water slurries/Yavuz R., Kucukbayarak S. Williams A.//Fuel. – 1998. – Vol. 77. – №11. – pp. 1229 – 1235.
92. Sharma S.K. Radiative transfer characteristics of clouds of atomised coal water slurry drops in a furnace/Sharma S.K., Jones A.R.// Fuel. – 2002. – №81. – p.59 – 63.
93. Бурдуков А.П. Водомазутоугольные суспензии в энергетике Новосибирской области/ Бурдуков А.П., Попов В.И., Федосенко В.Д. // Проблемы энергосбережения и рационального использования энергоресурсов в Сибирском регионе: сб. докл. Сес.1, Новосибирск, 29 – 31 окт. 1997 г. Ч.2. – Новосибирск, 1999. – С.46 – 53.
94. Бутовский М.Э. Водо – топливные эмульсии из нефтесодержащих отходов/Бутовский М.Э., Бурдочкин Ю.С. // Железнодорожн. транспорт. – 1998. – N 1. – С.22 – 25.
95. Горлов Е.Г. Композиционные водосодержащие топлива из углей и нефтепродуктов/ Горлов Е.Г. // Химия твердого топлива. – 2004. – N 6. – С.50 – 61
96. Захаревич Ю.С. Техничо – экономические предпосылки применения органоугольных топлив в большой энергетике/ Захаревич Ю.С., Стрижак П.А.// Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2017. – N 6. – С.43 – 48.
97. Вафин А.Р. Исследование основных свойств мазутоугольных топлив/ Вафин А.Р., Мингалеева Г.Р. // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2015. – N 5 – 6. – С.8 – 15.
98. Вафин А.Р. Исследование реологических свойств мазутоугольных топлив/ Вафин А.Р., Мингалеева Г.Р. // IX семинар вузов по теплофизике и энергетике: сб. материалов докладов междунар. конф., Казань, 21 – 24 октября 2015. В 4 т. Т.2. – Казань: КГЭУ, 2015. – С.203 – 208.

99. Gaber C. Experimental investigation and demonstration of pilot – scale combustion of oil – water emulsions and coal – water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen./ Gaber C., Wachter P., Demuth M., Hochenauer C. // *Fuel*. – 2020. – №282. –p.118692.
100. Svoboda K. Fluidized bed gasification of coal–oil and coal–water–oil slurries by oxygen–steam and oxygen–CO₂ mixtures/Svoboda K., Pohořelý M., Jeremiáš M., Kameníková P., Hartman M., Skoblja S., Šyc M.// *Fuel Processing Technology*. – 2012. – V95. –p.16–26
101. Majumder S.K. Studies on flow characteristics of coal–oil–water slurry system /Majumder S.K., Chandna K., De D.S., Kundu G.//*Int. J. Miner. Process.* – 2006. – №79. –p.217–224
102. Zhang K. A novel route to utilize waste engine oil by blending it with water and coal/ Zhang K., Cao Q., Jin L., Li P., Zhang X. //*Journal of Hazardous Materials*. – 2017. – №332. – P.51–58.
103. Dong – hong G. Rheological behaviour of oil – based heavy oil, coal and water multiphase slurries/ Dong – hong Guo, Xing – chang Li, Jin – suo Yuan, Long Jiang// *Fuel* – 1998. – Vol. 77. – №3. – pp.209 – 210.
104. Tabata T. Life cycle assessment for co – firing semi – carbonized fuel manufactured using woody biomass with coal: A case study in the central area of Wakayama, Japan./ Tabata T., Torikai H., Tsurumaki M., Genchi Y., Ukegawa K.//*Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – №15. – p.2772– 2778.
105. Tabet F. Review on CFD based models for co – firing coal and biomass/Tabet F. Gökalp I.// *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – №51. –p.1101–1114
106. Liu Q. Co – firing of coal and biomass in oxy – fuel fluidized bed for CO₂ capture: A review of recent advances/Liu Q., Shi Y., Zhong W., Yu A.//*Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2019. – №27. –p.2261–2272.
107. Williams A. Combustion of pulverised coal and biomass/ Williams A., Pourkashanian M., Jones J.M.//*Progress in Energy and Combustion Science*. – 2001. – №27 –p.587 – 610.
108. Yin C. Grate – firing of biomass for heat and power production/ Yin C., Rosendahl L.A., Kær S.K.//*Progress in Energy and Combustion Science*. – 2008. – №34 –p.725–754
109. Kleinhans U. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior/Kleinhans U., Wieland C., Frandsen F.J., Spliethof H.//*Progress in Energy and Combustion Science*. – 2018. – №68 –p.65 – 168
110. Plyatsuk L. Modelling and development of technological processes for low rank coal bio – utilization on the example of brown coal/ Plyatsuk L., Chernysh Y., Ablicieva I., Bataltsev Y., Vaskin R., Roy I., Yakhnenko E., Roubík H.//*Fuel*. – 2020. – №267. –p.117298

111. Feng C. Synergy on particulate matter emission during the combustion of bio – oil/biochar slurry (bioslurry)/Feng C., Wu H//Fuel. – 2018. – №214. –p.546–553.
112. Routray A. Additives the panacea of coal water slurry./Routray A.//Materials Today: Proceedings – 2021. – №41. –p.307 – 311.
113. Feng P. Entrained flow gasification of coal/bio – oil slurries/ Feng P., Lin P., Jensen P.A., Song W., Hao L., Raffelt K., K. Dam – Johansen.//Energy. – 2016. – №111. – P.793 – 802.
114. Feng P. Rheological behavior of coal bio – oil slurries./ Feng P., Hao L., Huo C., Wang Z., Lin W., Song W.//Energy. – 2014. – №66. –p.744 – 749.
115. Sui H. Rheological Behavior and Steam Gasification of Bio – slurry./ Sui H., Wang X., Chen H.//Energy Procedia. – 2015. – №75. –p. 220 – 225.
116. Валиуллин, Т. Р. Особенности зажигания витающих капель органоводоугольных топлив, приготовленных из типичных отходов угле – и нефтепереработки / Т. Р. Валиуллин, К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, С. А. Шевырев// Кокс и химия. – 2017. – № 5. – С. 40–48.
117. Валиуллин, Т. Р. Термодинамическая эффективность использования органоводоугольного топлива / С. А. Шевырёв, Т. Р. Валиуллин, К. Ю. Вершинина// Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130 – летию со дня рождения профессора М. И. Кучина, Томск, 3 – 7 апреля 2017 г.: в 2 т. — Томск : Изд – во ТПУ, 2017. — Т. 2. — С. 215 – 217.
118. Tsepенок A.I. Calculating analysis of firing different composition artificial coal liquid fuels (ACLF) in the cyclone primary furnace /A.I. Tsepенок, Yu.V. Ovchinnikov, F.A. Serant// Proceedings 7th International Symposium on Coal Combustion: Harbin, China, July 17 – 20. – 2011. – p. 507 – 511.
119. Зайденварг В.Е. Производство и использование водоугольного топлива/Зайденварг В.Е., Трубецкой К.Н., Мурко В.И., Нехороший И.Х.// – М.: Издательство Академии горных наук, 2001. – 176 с.
120. Salinasa C.T. Experiments for combustion temperature measurements in a sugarcane bagasse large – scale boiler furnace./Salinasa C.T., Puc Y., Louc C., B. dos Santos D.//Applied Thermal Engineering. – 2020. – №175. –p.115433.
121. Milićević A. Mathematical modelling and optimisation of lignite and wheat straw co – combustion in 350 MWe boiler furnace./ Milićević A., Belošević S., Crnomarković N., Tomanović I., Tucaković D.//Applied Energy. – 2020. – №260. –p.114206

122. Redko A. Aerodynamic processes and heat exchange in the furnace of a steam boiler with a secondary emitter/Redko A., Dzhyoiev R., Davidenko A., Pavlovskaya A., Pavlovskiy S., Redko I., Kulikova N., Redko O.//Alexandria Engineering Journal. – 2019. – №58. –p.89–101
123. Soares C. Gas Turbines/Soares C. // Elseiver. 2008
124. Овчинников Ю.В. Исследование воспламеняемости твердых топлив и ИКЖТ /Овчинников Ю.В., Цепенюк А.И., Шихотинов А.В., Татарникова Е.В.//Докл. АН ВШ РФ. – 2011. – N 1(16). – С.117 – 126.
125. Salomatov V.V. Concentration organic components in the hydrocarbon fuel particles conditions and characteristic of ignition/Salomatov V.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu.// EPJ Web of Conferences. – 2014. – №76. –p. 01018
126. Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара/ Ривкин С.Л., Александров А.А.// М.: Энергия, 1980. – 424 с.
127. Hertz H. Ann. Phys. (Leipzig). – 1882. – V.17. №.177.
128. Хащенко А.А. Исследование температурной зависимости скорости испарения жидкостей со свободной поверхности и скорости кипения жидкости на твердой поверхности нагрева/Хащенко А.А., Вечер О.В., Дискаева Е.И.//Известия алтайского государственного университета. – 2016. – №1. –p.84 – 87.
129. Саломатов В.В. Электромагнитная сушка влажных материалов с малой глубиной проникновения СВЧ – излучения в условиях теплосброса радиацией и конвекцией. III. стадия падающей скорости сушки/Саломатов В.В., Карелин В.А., Саломатов В.В.//Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т.331. – №4. – с. 139–147
130. Karelin V. Microwave drying modeling of wet materials with two nonstationary – mobile boundaries of phase transformations/Karelin V., Salomatov V.//Interfacial phenomena and heat transfer. – 2018. –Т.6. – №2. – p.155 – 167.
131. Саломатов В.В. Теоретический анализ многостадийного процесса сжигания частицы из угля/ Саломатов В.В., Саломатов В.В.//Горение и плазмохимия. – 2016. – Т.14. – №1. – с. 35 – 44
132. Семенов Н.Н. Горение и взрыв/ Семенов Н.Н. // – Л.: Детгиз, 1945. — 35 с.
133. Франк – Каменецкий Д. А. Распределение температур в реакционном сосуде и стационарная теория теплового взрыва/ Франк – Каменецкий Д. А. // Журнал физической химии. — 1939. — Т. 13. — № 6. — С. 738 – 755.
134. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации газов/ Зельдович Я.Б. //Академия наук СССР – ИХФ – 1944 – с.70.

135. FU Wei – Biao. A study of the evaporation and ignition of a single coal – water slurry (CWS) droplet/FU Wei – Biao, Wei Jing – Bin, Han Hong – Qiao, Zhang Yan – Ping// Combustion science and technology. – 1985. – №43. –p.67 – 83.
136. Kolb T. The contribution of radiation to the ignition of a confined turbulent coal–water slurry diffusion flame./ Kolb T., Farmayan W.F., Walsh P.M., Beer J.M.//Combustion science and technology. – 1988. – №58. –p. 77 – 95.
137. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива // Горение и плазмохимия: – ч. 1, 2007, вып. 3, с. 178 – 188; – ч. II, 2007, вып. 3, с. 187 – 197; – ч. III, 2008, вып. 1, с. 56 – 59; – ч.IV,
138. Самарский А.А. Методы решения сеточных уравнений/ Самарский А.А., Николаев Е.С. // — М.: Наука, 1978. — 592
139. Калиткин Н.Н. Численные методы/ Калиткин Н.Н.// —М. «Наука», 1978.
140. Тихонов А.Н. О представлении линейных функционалов в классе разрывных функций/Тихонов А.Н., Самарский А.А.//Докл. АН СССР. – 1958. – Т.122. – №2. С.188–191
141. Тихонов А.Н. Об однородных разностных схемах высокого порядка точности/Тихонов А.Н., Самарский А.А.//Докл. АН СССР. – 1960. – Т. 131. – №3. 514–517
142. Самарский А. А. Локально – одномерные разностные схемы на неравномерных сетках/Самарский А. А.// Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1963. – Т3. – №3. –p.431 466
143. Яненко Н.Н. Об экономичных неявных схемах (метод дробных шагов)/ Яненко Н.Н.//Докл. АН СССР. – 1960. – Т.134. – №5.
144. Четверушкин Б.Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа/ Четверушкин Б.Н.// — М., Наука, 1985.
145. Самарский А. А. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана/А. А. Самарский, Б. Д. Моисеенко// Ж. вычисл. матем. и матем. физ. — 1965. — 5. — с. 816–827
146. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка/ Эфрос А.Л.// — М.: Наука, 1982. — 176 с
147. Соболев И.М. Метод Монте – Карло/ Соболев И. М. // — М.: Наука 1968. — 64 с
148. Hoshen J. Percolation and cluster distribution. I. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm/Hoshen J., Kopelman R.//Phys. Rev. B – 1976. – V. 14. – №8. –p. 3438 – 3445.
149. Саломатов В.В. Методы расчета нелинейных процессов теплового переноса Ч.1/Саломатов В.В. Томск : Изд – во Томского университета, 1978. – 183 с.
150. Саломатов В.В. Методы расчета нелинейных процессов теплового переноса Ч.2/Саломатов В.В. Томск : Изд – во Томского университета, 1978. – 183 с.

151. 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/Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Zhakharevich A.V., Gutareva N.Y., Salomatov V.V.// *Combustion and Flame* – 2017. – №180. – p. 196–206
152. Syrodoy S. Effect of high – temperature gas flow on ignition of the water – coal fuel particles/Salomatov V., Kuznetsov G., Salomatov V., Gutareva N.// *Combustion and Flame*. – 2019. – №203. – p. 375–385
153. Kuznetsov G.V. The ignition of the bio water – coal fuel particles based on coals of different degree metamorphism/Kuznetsov G.V., Malyshev D.Yu, Kostoreva Zh.A., Syrodoy S.V., Gutareva N. Yu.//*Energy* – 2020. – №201. – 117701
154. Syrodoy S.V. Ignition of bio – water – coal fuel drops./ Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Purin M.V.//*Energy* – 2020. – №203. – 117808
155. G.V. Kuznetsov. Mathematical model simulating the ignition of a droplet of coal water slurry containing petrochemicals/ G.V. Kuznetsov, D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, S.V. Syrodoy// *Energy* – 2018. – №150. – 262 – 275.
156. Syrodoy S.V. Justification of the use of forest waste in the power industry as one of the components OF BIO – coal – water suspension fuel/ G.V. Kuznetsov, D. Yu Malyshev, S.V. Syrodoy, N. Yu Gutareva, M.V. Purin, Zh. A. Kostoreva//*Energy* – 2022. – №239. – 121677.
157. Syrodoy S.V. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near – surface fragmentation of the fuel layer/ Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y., Kostoreva A.A., Kostoreva Zh.A.// *Fuel* – 2019. – №252. –p. 19–36
158. Kuznetsov G.V. Effect of concentration and relative position of wood and coal particles on the characteristics of the mixture ignition process/ Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Kostoreva A.A., Kostoreva Zh.A., Nigay N.A.// *Fuel* – 2020. – №274. – p. 117843.
159. Salomatov V.V. Ignition of coal – water fuel particles under the conditions of intense heat/Salomatov V.V., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y.//*Applied Thermal Engineering* – 2016. – №106. –p.561–569
160. Syrodoy S.V. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio – water – coal suspensions. Ignition stage/ Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Malyshev D.Yu., Gutareva N.Yu., Nigay N.A.//*Applied Thermal Engineering*. – 2020. – №170. –p.115034
161. Syrodoy S.V. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high – temperature medium/Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y.// *Renewable Energy*. – 2020. – № 145. –p.1474 – 1486.

162. Syrodoy S.V. Mathematical modeling of the thermochemical processes of sequestration of SO_x when burning the particles of the coal and wood mixture/ G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N. Yu Gutareva, N.A. Nigay (Ivanova)//Renewable Energy. – 2022. – V.185. – p.1392 – 1409.
163. Syrodoy S.V. Ignition of promising coal – water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects / Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zhakharevich A.V., Strizhak P.A.//Fuel Processing Technology. – 2016. – №148. –p. 224–235.
164. Syrodoy S.V. Justification of the possibility of car tires recycling as part of coal – water composites/ Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Purin M.V., Zenkov A.V., Gvozdyakov D.V., Larionov K.B. // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – №9. –p. 104741
165. Salomatov V. Mathematical and physical modeling of the coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface/Salomatov V., Kuznetsov G., Syrodoy S., Gutareva N.//Energy Reports. – 2020. – №6. –p. 628–643
166. Syrodoy S.V. Characteristics and conditions for ignition of bio – coal mixtures based on coal and forest combustible material/Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Kostoreva Zh.A., Kostoreva A.A., Nigay N.A.// Journal of the Energy Institute. – 2020. – 93. –p. 1978 – 1992
167. Syrodoy S.V. Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces/Syrodoy S.V., Kostoreva J.A., Kostoreva A.A., Asadullina L.I.// Journal of the Energy Institute. – 2020. – №93. – p. 443 – 449
168. Syrodoy S.V. The efficiency of heat transfer through the ash deposits on the heat exchange surfaces by burning coal and coal – water fuels/ Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Salomatov V.V.// Journal of the Energy Institute. – 2018. – №91. –p.1091 – 1101
169. Syrodoy S.V. The effect of the distance between wood and coal particles on the characteristics of their joint ignition under conditions of hightemperature radiation – convective heating/ G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, ZhA. Kostoreva, D.V. Malyshev, N. Yu Gutareva// Journal of the Energy Institute. – 2021. – №97. – p.13 – 26
170. Syrodoy S.V. Mathematical modeling of the thermochemical processes of nitrogen oxides sequestration during combustion of wood – coal mixture particles/G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N. Yu Gutareva, N.A. Nigay// Journal of the Energy Institute. – 2021. – №96. – p.280 – 293
171. Syrodoy S.V. Choice of the Kinetic Scheme of Oxidation Reactions of the Gaseous Products of Coal Pyrolysis during Induction Period at Ignition of the Water–Coal Fuel Particles /Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Salomatov V.V., Gutareva N.Yu.//Energy & Fuels. – 2019. –V. 33. – №11. –p. 11617 – 11629

172. Syrodoy S.V. A Mathematical Model for Processes in Coal–Water Slurries Containing Petrochemicals under Heating/Syrodoy S.V. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.//Energy & Fuels. – 2018. –V.32 – №8. –p. 8789 – 8802.
173. Syrodoy S.V. Conditions of the Water–Coal Fuel Drop Dispersion at Their Ignition in the Conditions of High – Temperature Heating./ Salomatov V.V., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V. Gutareva N.Y.//Combustion Science and Technology. – 2019. – V.191. – №12. –p. 2162 – 2184.
174. Syrodoy S.V. The Conditions and Characteristics of Wood Particles Ignition in the Stream of the High Temperature Gases./ Syrodoy S.V. Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Bugaeva K.A. Taburchinov R.I.//Combustion Science and Technology. – 2018. – V. 190 – №4. –p. 663 – 686.
175. Syrodoy S.V. Ignition of bio – water – coal fuels based on coal and charcoal. / Kuznetsov G.V., Malyshev D.Yu., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu., Purin M.V. Kostoreva Zh.//Combustion Science and Technology. – 2020 (In Press). <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1799203>
176. Syrodoy S.V. Influence of Forest Combustible Material on the Characteristics and Conditions of Ignition of Bio – coal Water Fuels/ Kuznetsov G.V., Malyshev D.Yu., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu., Kostoreva Zh.// Combustion Science and Technology – 2021 AHEAD – OF – PRINT, 1 – 21 <https://doi.org/10.1080/00102202.2021.1968384>
177. Syrodoy S.V. Ignition of a group of the woody biomass particles/S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, Zh.A. Kostoreva, I.K. Zabrodina, D.Yu. Malyshev//Thermal Science and Engineering Progress. – 2021. – №25 – p.101017
178. Сыродой С.В. Численное моделирование зажигания частиц водоугольного топлива/ Сыродой С.В. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В. // Физика горения и взрыва, – 2015. – Т.51. – №4. –с.12 – 18.
179. Сыродой С.В. Инициирование горения покрытых водяной пленкой частиц угля в потоке высокотемпературного воздуха/Захаревич А.В., Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Саломатов В.В., Стрижак П.А.// Физика горения и взрыва. – 2016. – Т.52. – №5. – с. 62 – 74.
180. Сыродой С.В. Влияние диффузии продуктов пиролиза угля на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива/Сыродой С.В. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В.// Физика горения и взрыва. – 2018. – Т.54. – №6. – с. 30 – 40.
181. Сыродой С.В. Воспламенение частиц влажной древесной биомассы в условиях конвективной диффузии водяных паров в пристенной области/Сыродой С.В. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В.// Физика горения и взрыва. – 2018. – Т.54. – №3. – с. 82 – 95.
182. Сыродой С.В. Влияние кинетической схемы пиролиза на прогностические оценки характеристик процесса воспламенения частицы древесной биомассы/ Кузнецов Г.В., Сыродой С.В.//Физика горения и взрыва. – 2019. – Т.55. – №2. –с. 82 – 96.

183. Сыродой С.В. Эволюция во времени температуры капли композиционного жидкого топлива при взаимодействии с потоком нагретого воздуха/Глушков Д.О., А.В. Захаревич, Стрижак П.А., Сыродой С.В.//Теплофизика и Аэромеханика. – 2016. – Т.23. – №6. –с. 923 – 934.
184. Сыродой С.В. Тепломассоперенос в частице водоугольного топлива на стадии "термической" подготовки/Сыродой С.В. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В.// Теплофизика и Аэромеханика. – 2016. – Т.23. – №4. –с. 627 – 636.
185. Сыродой С.В. Влияние степени метаморфизма угля на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива/ Сыродой С.В. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В.//Теплофизика и Аэромеханика. – 2018. – Т.25. – №5. –с. 805 – 820.
186. Сыродой С.В. Влияние радиационно – конвективного теплопереноса на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива/Сыродой С.В.//Теплофизика и Аэромеханика. – 2018. – Т.25. – №3. –с. 447 – 462.
187. Сыродой С.В. Влияние фильтрационного теплопереноса на характеристики и условия воспламенения частиц водоугольного топлива/Сыродой С.В., Саломатов В.В. // Теплофизика и Аэромеханика. – 2019. – Т.26. – №5. –с. 795 – 812.
188. Сыродой С.В. Влияние форм частиц на характеристики воспламенения водоугольного топлива/Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Саломатов В.В.//Химия твердого топлива. – 2015. – №6. – с. 28–34.
189. Сыродой С.В. Зажигание капель водоугольного топлива в потоке воздуха/Захаревич А.В., Саломатов В.В., Стрижак П.А., Сыродой С.В.// Химия твердого топлива. – 2016. – №3. – с. 25 – 29.
190. Сыродой С.В. Влияние теплофизических свойств водоугольного топлива на условия его воспламенения/Сыродой С.В., Кузнецова Г.В., Захаревича А.В., Саломатов В.В.//Химия твердого топлива. – 2017. – №3. – с.31–37.
191. Сыродой С.В. Влияние условий теплообмена на характеристики зажигания частиц водоугольного топлива./Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Саломатов В.В.//Теплоэнергетика. – 2016. – №10. – с.16.
192. Miller B.G. Clean Coal Engineering Technology: Second Edition. Second Edition 20. /Miller B.G.// October 2016, P.1 – 838
193. Briones – Hidrovo A. Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion/Briones – Hidrovo A., Copa J., Tarelho L.A.C., Gonçalves C., Pacheco da Costa T., Dias A.C.//Journal of Cleaner Production. – 2021. – №289. –p.125680

194. Rahib Y. Combustion and pollutant emission characteristics of argan nut shell (ANS) biomass/Rahib Y., Boushaki T., Sarh B., Chaouf J.//Fuel Processing Technology. – 2021. – №213. –p.106665
195. Агафонов С.А. Исследование процесса горения ВУТ от времени помола/Агафонов С.А., Филипповских С.В., Ларионов К.Б.//Энергетика, эффективность, надежность, безопасность: материалы тр. XXI всерос. науч. – техн. конф., Томск, 2 – 4 дек. 2015. в 2 т. Т.1. – Томск: СКАН, 2015. – С.361 – 363.
196. Баранова М.П. Горение водоугольного топлива из бурых углей/ Баранова М.П., Кулагин В.А., Лебедев С.В. //Горение твердого топлива: сб. докл. VII всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 10 – 13 нояб. 2009. В 3 ч. Ч.1. – Новосибирск: Ин – т теплофизики СО РАН, 2009. – С.174 – 178.
197. Бутылькова Т.Н. Зола и шлак при сжигании водоугольных суспензий/Бутылькова Т.Н., Делягин Г.Н.// Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1969. – С.58 – 64.
198. Miller S.F. The effect of co – firing coal – water from waste coal fines with pulverized slurry fuel for – coal on NO, emissions/Miller S.F.// Suppl. Coal Fines: Unclimmed Fuel, Pup. Int. Tech. Conf Coal Util. Fuel Syst., Zlst. – 1996. –p.25 – 36.
199. Miccio F. Formation rates of characteristic carbon phases during coal – water slurry injection in a hot fluidized bed/ Miccio, F. //Powder Technol. – 1997. – V.91. – №3. –p. 237 – 251.
200. Цепенюк А.И. Исследование процессов горения искусственного композитного жидкого топлива в циклонном предтопке/Цепенюк А.И., Овчинников Ю.В., Стрижко Ю.В., Луценко С.В.// Энергетик. – 2011. – N 7. – С.45 – 47.
201. Strizhak P. Coal and petroleum – derived components for high – moisture fuel slurries/ Vershinina K., Shevryev S., Strizhak P.//Energy. – 2021. – №219. –p.119606
202. Anufriev I.S. Review of water/steam addition in liquid – fuel combustion systems for NO_x reduction: Waste – to – energy trends. / Anufriev I.S.// Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2021. – №138. –p.110665
203. Zhao R. Experimental study on co – combustion of low rank coal semicoke and oil sludge by TG – FTIR/ Zhao R., Qin J., Chen T., Wang L., Wu J.//Waste Management – 2020. – №116. – p.91–99
204. Yi S. The influence of water content in rice husk bio – oil on the rheological properties of coal bio – oil slurries/Yi S., Hao L., Li S., Song W.// Energy – 2019. – №189. –p.116307
205. Liu Q. Three – dimensional simulation of the co – firing of coal and biomass in an oxy – fuel fluidized bed/Liu Q., Zhong W., Gu J., Yu A.// Powder Technology. – 2020. – №373. –p. 522–534.

206. Raza M.Y. Coal and economic development in Pakistan: A necessity of energy source/Lin B., Raza M.Y.// Energy – 2020. – №207. – №118244
207. Zhang H. An experimental study of using coal to liquid (CTL) and diesel as pilot fuels for gasoline dual – fuel combustion/Zhang H., Sun W., Guo L., Yan Y., Li J., Lin S., Wang Q., Sun Y.// Fuel. – 2021. – №289. –p. 119962
208. Osintsev K.V. Combined environmentally friendly technology for recycling of coal – water slurries in coal mining/Osintsev K.V.//IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 579 012110
209. Jimenez N.J.P. Coupling the heating and power sectors: The role of centralised combined heat and power plants and district heat in a European decarbonised power system/ Jimenez N.J.P., Kavvadias K., Filippidou F., Pavičević M., Quoilin S.//Applied Energy – 2020. – №270. – p.115134
210. Dhillona A.S. State – wise Efficiency Assessment of Coal – Fired Thermal Power Plants Using Malmquist Index Approach/ Dhillona A.S., Vachharajani H.//Proceedings. – 2018. – №5. –p. 25285–25294
211. Xie J. Efficiency evaluation of thermal power plants in China based on the weighted Russell directional distance method/ Xie J., Liang Z., Zhang X., Zhu L.// Journal of Cleaner Production – 2019. – №222. – P.573 – 583.
212. Nazari S. Experimental determination and analysis of CO₂,SO₂ and NO_x emission factors in Iran’s thermal power plants/ Nazari S., Shahhoseini O., Sohrabi – Kashani A., Davari S., Paydar R., Delavar – Moghadam Z.//Energy – 2010. – №35. –p. 2992 – 2998.
213. Кустов В.Ф. Применение углемазутных смесей в печных установках/ Кустов В.Ф. // матер. конф. – курсов по тепловому хозяйству пром. предприятий. – Л., 1939. – 14 с
214. Кустов В.Ф. Топливные суспензии/Кустов В.Ф.// – Л.: Изд – во АН СССР, 1942. – 182 с.
215. Делягин Г.Н. Исследование процесса воспламенения капли водоугольной суспензии/ Делягин Г.Н., Сметанников Б.Н.//Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1965. – С.84 – 90.
216. Делягин Г.Н. Экспериментальное исследование процесса горения капли водоугольной суспензии из бурого и газового углей/ Делягин Г.Н., Кулинич А.И., Кирсанов В.И. //Горение дисперсных топливных систем. – М.: Наука, 1969. – С.55 – 68. – Библиогр.: 5 назв.
217. Делягин Г.Н. Сжигание крупнодисперсных водоугольных суспензий в циклонных топках/ Делягин Г.Н., Сметанников Б.Н.//Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С.112 – 122.

218. Бабий В.И. Воспламенение и горение капель водоугольной суспензии / Бабий В.И., Барбараш В.М., Хидиятов А.М., Степашкина В.А. // Проблемы горения и взрыва: матер. IX Всесоюз. симп. по горению и взрыву, 19 – 24 нояб. 1989 г. – Черногловка, 1989. – С.56 – 59.
219. Делягин Г.Н. Взаимодействие угля с водой при горении в слое водоугольной суспензии/ Делягин Г.Н., Смирнова З.В. // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1965. – С.126 – 130. – Библиогр.: 8 назв.
220. Делягин Г.Н. Роль воды при горении высокообводненного твердого топлива/ Делягин Г.Н., Смирнова З.В. // Горение твердого топлива: тр. 2 – ой всесоюз. конф. по горению твердого топлива, 19 – 23 нояб. 1965. – Новосибирск: Сиб. отд. изд – ва "Наука", 1969. – С.282 – 289. – Библиогр.: 10 назв
221. Делягин Г.Н. Особенности сжигания антрацитового штыба в виде водоугольных суспензий в топке парового/ Делягин Г.Н., Кирсанов В.И., Онищенко А.Г. // Горение дисперсных топливных систем. – М.: Наука, 1969. – С.33 – 39. – Библиогр.: 2 назв.
222. Chen J. Experiment and analysis of coal – water mixture flow propertie/ Chen J. Huang Z., Wei X. Kou T., Chen J., Wu J.X.// Proceedings – Sixth International Symposium on Coal Slurry Combustion and Technology.; Kissimmee, FL, USA. – 1984 – pp. 881 – 898.
223. Burdukov E.I. Experimental study of the combustion dynamics of coal – water suspension drops/Karpenko V.I., Popov V.N., Razvalyayev V.D.//Combustion, Explosion, and Shock Waves. – V.32. No. 4, 1996
224. Burdukov A.P. The rheodynamics and combustion of coal – water mixtures/Burdukov A.P., Popov V.I., Tomilov V.G., Fedosenko V.D.// Fuel. – 2002. – №81. –p. 927 – 933.
225. Burdukov A.P. An Investigation of the Rheology and Dynamics of Combustion of Composite Coal – Water Slurries/Burdukov A.P., Emel'yanov A.A., Popov V.I., Tarasenko S.N.//Thermal Engineering. – 1997. – V.44. – №6. – pp. 492 – 497
226. Burdukov A.P. Dynamics of combustion of coal – water suspension drops/Burdukov A.P., Karpenko E.I., Popov V.I., Razvalgaev V.N., Fedosenko V.D.//Fizika Goreniya i Vzryva. – 1996. – V.32 – №4. – pp. 62 – 66.
227. Делягин Г.Н. Радиационный теплообмен в топке парового котла при сжигании водоугольных суспензий/ Делягин Г.Н., Онищенко А.Г. // Горение дисперсных топливных систем. – М.: Наука, 1969. – С.40 – 47.
228. Делягин Г.Н. Сжигание твердого топлива в виде водоугольных суспензий/ Делягин Г.Н., Давыдова И.В. // – М., 1969. – 48 с.

229. Делягин Г.Н. Опыт сжигания водоугольных суспензий в топках паровых котлов/ Делягин Г.Н. // – М., 1966. – 88 с.
230. Schobert H.H. Effect of the Occurrence and Modes of Incorporation of Alkalis, Alkaline Earth Elements, and Sulfur on Ash Formation in Pilot – Scale Combustion of Beulah Pulverized Coal and Coal–Water Slurry Fuel/ Miller, S.F., Schobert, H.H.//Energy and Fuels. – 1994. – V.8. – №6. – pp.1208 – 1216.
231. Schobert, H.H. Effect of Fuel Particle and Droplet Size Distribution on Particle Size Distribution of Char and Ash during Pilot – Scale Combustion of Pulverized Coal and Coal – Water Slurry Fuels. / Miller, S.F., Schobert, H.H.//Energy and Fuels – 1993. –V.7. – №4. – pp. 520 – 531
232. Делягин Г.Н. Результаты испытаний топочных устройств на водоугольных суспензиях./Бубушян С.А., Делягин Г.Н., Каленков А.Б.//Химия твердого топлива. – 1977. – N4. – С.121 – 122.
233. Давыдова, И.В. Экспериментальное исследование процесса горения водоугольной суспензии / И.В. Давыдова, Г.Н. Делягин, Б.В. Канторович и др. // Тепло – и массоперенос. – «Наука и техника». – Т. 4. – Минск. – 1966.
234. Matthews K.J. Effect of coal composition on coal water slurry combustion and ash deposition characteristics/ Matthews K.J., Jones A.R. // (1986) pp. 388 – 407. Proceedings – Eighth International Symposium on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. Orlando, FL, USA.
235. Matthews K.J. Combustion histories of various coal – water fuels/Matthews K.J., Street P.J.//1984 pp. 109 – 126 Proceedings – Sixth International Symposium on Coal Slurry Combustion and Technology. Kissimmee, FL, USA.
236. Miller S.F. Effect of the Occurrence and Modes of Incorporation of Alkalis, Alkaline Earth Elements, and Sulfur on Ash Formation in Pilot – Scale Combustion of Beulah Pulverized Coal and Coal–Water Slurry Fuel/ Miller, S.F., Schobert, H.H.//Energy and Fuels – 1994. – V.8. – №6, – pp. 1208 – 1216.
237. Schobert H.H. Effect of Fuel Particle and Droplet Size Distribution on Particle Size Distribution of Char and Ash during Pilot – Scale Combustion of Pulverized Coal and Coal – Water Slurry Fuels/Miller, S.F., Schobert, H.H. //Energy and Fuels. – 1993. – V.7. – №4. – pp. 520 – 531.
238. Özer M. The combustion properties of different structural Turkish coals in coal – water slurries technology/Boylu, F., Ateşok, G., Özer, M.//Yerbilimleri/ Earth Sciences. – 2005. – V.26 – №1. – pp. 15 – 23.
239. Jianzhong L. Pilot – scale investigation on slurrifying, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid/Jianzhong L., Ruikun W., Jianfei X., Junhu Z., Kefa C.//Applied Energy – 2014. – №115. – P.309–319.

240. Alekseenko S.V. Analysis of Combustion of Coal – Water Fuel in Low – Power Hot – Water Boiler via Numerical Modeling and Experiments/Alekseenko S.V., Kuznetsov V.A., Mal'tsev L.I., Dekterev A.A., Chernetskii M.Yu.//Journal of Engineering Thermophysics. – 2019. – V.28. – №2. – pp. 177–189.
241. Alekseenko S.V. Results of pilot – operating combustion of coal – water fuel in a low – capacity hot water boiler/Alekseenko S.V. Maltsev L.I., Bogomolov A.R., Chernetskiy M.Yu. Kravchenko I.V. Kravchenko A.I. Lapin D.A. Shevyrev S.A. Lyrshchikov S.Yu.// Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2017. – V.328. – I.12. – P.16 – 28.
242. Накоряков В.Е. Инициирование горения капли органоводоугольного топлива в вихревой камере сгорания/Накоряков В.Е., Глушков Д.О., Стрижак П.А., Сыродой С.В.//ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК. – 2017. – Т.473. – №6. – с.646–649.
243. Костовецкий С.П. Некоторые результаты исследований процессов приготовления, транспортирования и прямого сжигания водоугольной суспензии/Костовецкий С.П., Мурко В.И., Олофинский Е.П.//Вопросы определения технологических параметров линейной части гидротранспортных систем: сб. науч. тр. – М.: НПО "Гидротрубопровод", 1989. – С.4 – 10.
244. Мурко В.И. Вихревая технология сжигания суспензионного водоугольного топлива. Экологические аспекты/Журавлева Н.В., Мурко В.И., Федяев В.И.// Экология и пром – сть России. – 2009. – Янв. – С.6 – 9. – Библиогр.: 5 назв.
245. Huang Z. Theoretical analysis on CWM drop combustion history // Proc. 8 – th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Part 1.1986. p. 343 – 358.
246. Matthews K.J. The effect of coal composition on coal – water slurry combustion and ash deposition characteristics/ Matthews K.J., Jones A.R. //Proc. 8 – th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Part 1. 1986. p. 388 – 407.
247. Muto M. Numerical simulation of ignition in pulverized coal combustion with detailed chemical reaction mechanism/Muto M., Yuasa K., Kurose R.//Fuel. – 2017. – 190. – p. 136–144.
248. Salomatov V.V. Modelling of heat and mass transfer to solve the problem of particle ignition water – coal fuel/ Salomatov V.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. //IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V.66. №012040.
249. Франк – Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике/ Франк – Каменецкий Д.А. // М.: Изд – во АН СССР. 1947. 502 с.
250. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения/ Сполдинг Д.Б. // М.: Государственное энергетическое издательство. 1959. 320 с.
251. Kook Y.A. Investigation of a Coal – Water Slurry Droplet Exposed to Hot Gas Stream/ Kook Y.A., Seung W.B., Chang E.C. //Combust. Sci. and Techn. – 2007. – V.97. №4. – p. 429.

252. I. Langmuir, *Phys. Rev.* 8, 149 (1916).
253. Щинников П.А. Кинетическая модель процесса горения тонкодисперсного водоугольного топлива в котлах с циклонным предтопком/ Щинников П.А., Овчинников Ю.В., Францева А.А., Бойко Е.Е. // *Энергетика и Теплотехника: сб. науч. трудов (под редакцией П.А. Щинникова)*. – Новосибирск: Изд – во НГТУ, 2019. Вып. 22. – С. 106 – 116.
254. Бабий В.И., *Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела/ Бабий В.И.* // М.: Энергоатомиздат. 1986, 208 с.
255. Fatehi H. Numerical simulation of ignition mode and ignition delay time of pulverized biomass particles/Fatehi H., Weng W., Costa M., Li Z., Rabaçal M., Aldén M., Xue – Song Bai.//*Combustion and Flame* – 2019. – №206. – p. 400–410.
256. Cutz L. Microstructural degradation during the storage of biomass pellets/Cutz L., Tiringier U., Gilvari H.// *Communications Materials* – 2021. – №2.
257. Sami M. Co – firing of coal and biomass fuel blends./ Sami M., Annamalai K., Wooldridge M.//*Progress in Energy and Combustion Science* – 2001. – №27. –p.171–214.
258. Johnson E. Goodbye to carbon neutral: Getting biomass footprints right./Johnson E.// *Environmental Impact Assessment Review* – 2009. – 29. –p. 165–168
259. Rokni E. Emissions of SO₂,NO_x,CO₂, and HCl from Co – firing of coals with raw and torrefied biomass fuels/Rokni E., Renb X., Panahia A., Levendis Y.A.//*Fuel* – 2018. – №211. –p. 363–374.
260. Hansson J. Co – firing biomass with coal for electricity generation—An assessment of the potential in EU27/ Hansson J., Berndes G., Johnsson F., Kjarstad J.//*Energy Policy*. – 2009. – №37. – p. 1444–1455.
261. Liu Q. Co – firing of coal and biomass in oxy – fuel fluidized bed for CO₂ capture: A review of recent advances/ Liu Q., Shi Y., Zhong W., Yu A.// *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2019. – №27. –p.2261–2272.
262. Liu B. Life – cycle energy and climate benefits of energy recovery from wastes and biomass residues in the United States./ Liu B., Rajagopal D.//*Nature Energy*. – 2019. – №4. –p. 700–708
263. Luo S.Y. Experimental study on oxygen – enriched combustion of biomass micro fuel/Luo S.Y., Xiao B., Hu Z.Q., Liu S.M., Guan Y.W.//*Energy* – 2009. – №34. –p.1880–1884
264. Flower M. A radiant heating wire mesh single – particle biomass combustion apparatus/Flower M., Gibbins J.//*Fuel* – 2009. – №88. –p.2418–2427
265. Yuan H. Ignition and Emission Characteristics of Ignition – assisting Agents for Densified Corn Stover Briquette Fuel/Yuan H., Pang Y., Wang K., Liu Y., Zuo X., Ma S., Li X.//*Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2010. – V.18. – №4. –p.687 – 694.

266. Khor A. Straw combustion in a fixed bed combustor/Khor A., Ryu C., Yao – bin Yang, Sharifi V.N., Swithenbank J.// *Fuel* – 2007. – №86. –p. 152–160
267. Ryu C. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size/Ryu C., Yao – Bin Yang, Khor A., Yates N.E., Sharifi V.N., Swithenbank J.//*Fuel* – 2006. – №85. –p. 1039–1046
268. Mason P.E. Single particle flame – combustion studies on solid biomass fuels/Mason P.E., Darvell L.I., Jones J.M., Pourkashanian M., Williams A.//*Fuel* – 2015. – №151. –p.21–30.
269. Jones J.C. On the thermal ignition of wood waste/Jones J.C., Puignou A.// *Trans IChemE*. – 1998. – V.76. – Part B.
270. Grotkjær T. An experimental study of biomass ignition/Grotkjær T., Dam – Johansen K., Jensen A.D., Glarborg P.//*Fuel* – 2003. –№82. –p.825–833.
271. Levendis Y.A. Combustion details of raw and torrefied biomass fuel particles with individually – observed size, shape and mass/Levendis Y.A. Panahi A., Vorobiev N., Schiemann M., Tarakcioglu M., Delichatsios M.//*Combustion and Flame* – 2019. – №207. –p.327–341.
272. Levendis Y.A. On the minimum oxygen requirements for oxy – combustion of single particles of torrefied biomass/Y.A. Levendis Panahi A., Toole N., Wang X.// *Combustion and Flame* – 2020. – 213. –p.426–440
273. Wang S. Effects of hemicellulose, cellulose and lignin on the ignition behaviors of biomass in a drop tube furnace/ Wang S., Zou C., Lou C., Yang H., Mei M., Jing H., Cheng S.// *Bioresource Technology* – 2020. – №310. –p. 123456
274. Shan F. An experimental study of ignition and combustion of single biomass pellets in air and oxy – fuel/Shan F., Lin Q., Zhou K., Wu Y., Fu W., Zhang P., Song L., Shao C., Yi B.//*Fuel* – 2017. – №188. –p. 277–284.
275. Jones J.M. Low temperature ignition of biomass/Jones J.M. Saddawi A., Dooley B., Mitchell E.J.S., Werner J., Waldron D.J. Weatherstone S., Williams A.// *Fuel Processing Technology* – 2015. – №134. –p.372–377.
276. Alobaid F. Experimental measurements for torrefied biomass Co – combustion in a 1 MWth pulverized coal – fired furnace./ Alobaid F., Jan – Peter Busch, Stroh A., Strohle J., Epple B.// *Journal of the Energy Institute*. – V.93. – №3. –p. 833 – 846.
277. Lu D. Emissions from co – firing lignite and biomass in an oxy – fired CFBC/Varol M., Symonds R., Anthony E.J., Lu D., Jia L., Tan Y.//*Fuel Processing Technology* – 2018. –V.173. –p.126–133
278. Rokni E. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co – firing of coals with raw and torrefied biomass fuels./ Rokni E., Ren X., Panahi A., Y.A. Levendis.//*Fuel* – 2018. – №211. –p. 363 – 373.

279. Álvarez L. Biomass co – firing under oxy – fuel conditions: A computational fluid dynamics modelling study and experimental validation/Álvarez L., Yin C., Riaza J., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F.// *Fuel Processing Technology* – 2014. – 120. –p. 22–33
280. Zhou H. Experimental investigation of ignition and combustion characteristics of single coal and biomass particles in O₂/N₂ and O₂/H₂O/ Zhou H., Li Y., Li N., Cen K.// *Journal of the Energy Institute* – 2019. – №92. –p. 502 – 511
281. Guo F. Thermogravimetric analysis on the co – combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal/Guo F., He Y., Hassanpour A., Gardy J., Zhong Z.//*Energy* – 2020. – №197. – p. 117147
282. Isemin R. Torrefaction and combustion of pellets made of a mixture of coal sludge and straw/ Isemin R., Mikhalev A., Klimov D., Grammelis P., Margaritis N., Dimitrios – Sotirios Kourkoumpas, Zaichenko V.// *Fuel* – 2017. – №210. –p. 859–865
283. Cao W. Study on the ignition behavior and kinetics of combustion of biomass/Cao W., Li J., Lue L.//*Energy Procedia*. – 2017. –V.142. –p. 136–141
284. УЭНДЛАНД У. Термические методы анализа/ Уэндланд У. // — М.: Мир, 1978. — 526 с.
285. Liu Q. Co – firing of coal and biomass in oxy – fuel fluidized bed for CO₂ capture: A review of recent advances/Liu Q., Shi Y., Zhong W., Yu A.//*Chinese Journal of Chemical Engineering* – 2019. –V.27. – p. 2261–2272.
286. Yao X. Qingwei Xu. Systematic study on ash transformation behaviour and thermal kinetic characteristics during co – firing of biomass with high ratios of bituminous coal./ Yao X., Zhou H., Xu K., Chen S., Ge J.//*Renewable Energy* – 2020. –V. 147 –p.1453 – 1468.
287. Liu Q. Co – firing of coal and biomass in oxy – fuel fluidized bed for CO₂ capture: A review of recent advances/ Liu Q., Shi Y., Zhong W., Yu A.//*Chinese Journal of Chemical Engineering* – 2019. –V.27. –p. 2261–2272.
288. Gungor A. Two – dimensional biomass combustion modeling of CFB./ Gungor A.//*Fuel*. – 2008. – V.87. –p.1453–1468
289. Gungor A. Prediction of SO₂ and NO_x emissions for low – grade Turkish lignites in CFB combustors./Gungor A.//*Chemical Engineering Journal* – 2009. – V.146. –p. 388–400.
290. Bhuiyan A.A. CFD modelling of co – firing of biomass with coal under oxy – fuel combustion in a large scale power plant/Bhuiyan A.A., Naser J.//*Fuel* – 2015. – V. 159. –p.150–168
291. Kastanaki E. A comparative reactivity and kinetic study on the combustion of coal–biomass char blends/ Kastanaki E., Vamvuka D.//*Fuel*. – 2006. – V.85. –p. 1186–1193

292. Peña B. Analysis of thermal resistance evolution of ash deposits during co – firing of coal with biomass and coal mine waste residues/Peña B., Bartolomé C., Gil A.//Fuel. – 2017. – V.194. – p. 357–367
293. Frolov S.M. Hydrogen fueled detonation ramjet: Conceptual design and test fires at Mach 1.5 and 2.0/Ivanov V.S., Frolov S.M., Zangiev A.E., Zvegintsev V.I., Shamshin I.O.//Aerospace Science and Technology – 2021. –V.109. –p. 106459.
294. Frolov S.M. Continuous detonation combustion of ternary “hydrogenliquid propaneair” mixture in annular combustor/Frolov S.M., Aksenov V.S., Ivanov V.S., Shamshin I.O.//International journal of hydrogen energy – 2017. –V.42. –p.16808 – 16820
295. Li Y. Effect of microwave pretreatment on the combustion behavior of lignite/solid waste briquettes/Li Y., Chen M.Q., Li Q.H., Huang Y.W.//Energy – 2018. – 149. –p. 730 – 740.
296. Massa L. Plasma – combustion coupling in a dielectric – barrier discharge actuated fuel jet/Massa L., Freund J.B.//Combustion and Flame – 2017. – №184. –p. 208–232.
297. Feng P. Entrained flow gasification of coal/bio – oil slurries./ Feng P., Lin W., Jensen P.A., Song W., Hao L., Raffelt K., Dam – Johansen K.//Energy – 2016. –V.111. –p. 793 – 802.
298. Chen R. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels./ Chen R., Wilson M., Leong Y.K., Bryant P., Yang H., Zhang D.K.//Fuel – 2011. –V.90. –p. 1689–1695.
299. Eriksson A. Evaluation of delivery strategies for forest fuels applying a model for Weather – driven Analysis of Forest Fuel Systems (WAFFS)/Eriksson A., Eliasson L., Sikanen L., Per – Anders Hansson, Jirjis R.//Applied Energy. – 2017. – V. 188. – P.420 – 430
300. Kuznetsov G.V. Sawdust as ignition intensifier of coal water slurries containing petrochemicals./Vershina K.Yu, Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.//Energy – 2017. – V. 140. – p. 69 – 77.
301. Вершинина К.Ю. Энергетический и экономический потенциал совместной утилизации промышленных отходов при суспензионном и гранулированном сжигании/ Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С. // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: тез. докл. XXIII школы – семинара молодых ученых и специалистов. В 2 т. Т.1. – М., 2019. – С.171 – 172.
302. Вершинина К.Ю. Влияние технологии приготовления органоводоугольных топлив на характеристики их зажигания/ Вершинина К.Ю., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.//Кокс и химия. – 2016. – N4. – С.16 – 25.
303. Кузнецов Г.В. Характеристики зажигания мазута водоугольных топлив для котельных установок/Вершинина К.Ю., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Химия твердого топлива. – 2017. – N 2. – С.30 – 35.

304. Most D. Renewable energy sources in European energy supply and interactions with emission trading/Most D., Fichtner W.//Energy Policy – 2010. –V.38. –p. 2898–2910
305. Ferroni F. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation/Ferroni F., Hopkirk R.J.//Energy Policy – 2016. – V.94. –p.336–344
306. Ferroni F. Further considerations to: Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation/Ferroni F., Guekos A., Hopkirk R.J.//Energy Policy – 2017. – p. 498–505
307. Ruth L.A. Energy from municipal solid waste: a comparison with coal combustion technology/Ruth L.A.//Progress in Energy and Combustion Science. – 1998. – V.24. – pp. 545 – 564.
308. Choudhury P.R. Slurry fuels./Choudhury P.R.//Progress in Energy and Combustion Science – 1992. – V.18. – I.5. – P.409 – 427.
309. Li C. Enhancement of fluidity and slurry – phase hydrogenation reactivity of coal – oil slurry by preheating treatment/ Li C., Wang X., Yang T., Deng W.//Fuel (In Press). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119806>
310. Wu H. Synergy on particulate matter emission during the combustion of bio – oil/ biochar slurry (bioslurry)/ Feng C., Wu H.//Fuel – 2018. – V214. –p. 546–553
311. Стрижак П.А. Характеристики зажигания водоугольной суспензии при использовании воды разного качества/ Вершинина К.Ю., Стрижак П.А. // Кокс и химия. – 2016. – N 11. – С.45 – 49.
312. Li D. Study on coal water slurries prepared from coal chemical wastewater and their industrial application/Li D., Liu J., Wang S., Cheng J.//Applied Energy – 2020. – 268. –p.114976
313. Делягин Г.Н. Закономерности процесса горения распыленной водоугольной суспензии в потоке воздуха/Делягин Г.Н.//Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. – М.: Наука,
314. Student. The probable error of a mean. /Student.// Biometrika. – 1908. – №6. – P.1 – 25.
315. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ/ Вилюнов В.Н. // Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1984.
316. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва/Хитрин Л.Н.// — М.: Издательство Московского университета, 1957. — 452с
317. Sutherland J.C. A comparison of various models in predicting ignition delay in single – particle coal combustion/Goshayeshi B., Sutherland J.C.//Combustion and Flame. – 2014. – V.161. – I.7. – P.1900 – 1910

318. Haseli Y. Analytical solutions for prediction of the ignition time of wood particles based on a time and space integral method/Y. Haseli, J.A. van Oijen, L.P.H. de Goey//*Thermochimica Acta.* – 2012. – V.548. – P. 65 – 75
319. Zakharevicha A.V. The experimental investigation of the ignition petrol mechanism at high temperature metal single particles/Zakharevicha A.V. Osotova D.S.// *EPJ Web of Conferences.* – 2015. –V.82. –p. 01043
320. Zakharevich A.V. Experimental research of heat transfer conditions influence on the distillate fuels ignition characteristics/Zakharevich A.V. Belkov N.S.//*EPJ Web of Conferences.* – 2014. – V.76. – p. 01010
321. Чейлытко А. А. Исследование влияния пор на теплопроводность материалов/Чейлытко А. А.//*Технологический аудит и резервы производства.* – 2013. – Т.2. – №2. С.14 – 17
322. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство/ Казанцев Е. И. // –*Металлургия.* – 1975.
323. Zhong H. Numerical simulation of pitch–water slurry gasification in both downdraft single – nozzle and opposed multi – nozzle entrained – flow gasifiers: A comparative study/Zhong H., Lan X., Gao J.//*Journal of Industrial and Engineering Chemistry* – 2015. –V.27. – p. 182–191
324. Померанцев В.В. Основы практической теории горения/ Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. // – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
325. Maxwell J.C. A treatise on electricity and magnetism/Maxwell J.C.// – 3rd Edition, UK, Oxford: Clarendon Press 1904.
326. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем/Оделевский В.И.//*ЖТФ.* – 1951. – Т.21.
327. К. Torkar, Oster. *Chem. Zt.* К. Torkar. 53 (1952) 160.
328. Бернштейн Р.С. Исследование процессов горения натурального топлива/Р.С. Бернштейн/. – М.: Госэнергоиздат, 1948.
329. Старостин, Д. Ф. Отопление и вентиляция /Д. Ф. Старостин//. – № 3. – 1935.
330. Russel H.W. *Journal of the American Chemical Society*/Russel H.W.// – 1935 – V.18. –p. 1 – 5.
331. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов/ Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. // Ленинград: Энергия, 1974. – 264 с.
332. Burger H.C. *Physikalische Zeiteschrift*/ Burger H.C. // – 1919. – V.20. –p. 73 —75.
333. Сенчулова Ю.А. Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками/Сенчулова Ю.А., Мурко В.И., Федяев В.И., Дзюба Д.А., Пузырев

- Е.М.//Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т.312. – №4. – с.37 – 40.
334. Prithiviraj M. Structure of coal water slurry sprays/Prithiviraj M. Andrews M. J.//J. Propul. Power. – 1995. – V.11. –I.1. – p.153 – 160.
335. Высокоморная О.В. Оценка параметров надежности работы автономных устройств энерго-снабжения удаленных линейных объектов магистральных газопроводов восточной сибир и дальнего востока/Высокоморная О.В., Высокоморный В.С., Стрижак П.А.//Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т.323. – №4. – с.59 – 65.
336. Хаппель Дж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. Перевод с англ./ Хаппель Дж., Бреннер Г. // – М.: Мир, 1976. – 630 с.
337. Ковеня В.М. Некоторые проблемы и тенденции развития математического моделирования./ Ковеня В.М.//Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т.43. – №3. – С.3 – 14.
338. Потапкин А.В. Расчет параметров ударных волн на больших расстояниях от места их возникновения с помощью комбинированных численно – аналитических методов./Потапкин А.В., Москвичев Д.Ю.//Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т.52. – №2. – С.15 – 26
339. Гольданский В.И. Явление квантового низкотемпературного предела скорости химических реакций/Гольданский В.И.//Усп.хим. – 1975. – Т.44. – №12. – с 2121–2149
340. Делягин, Г.Н. Общие закономерности горения угольных частиц/Г.Н.Делягин//Физика горения и взрыва. – 1983. – № 4. – С.110 – 113.
341. Кузнецов Н.В. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)/ Кузнецов Н.В., Митор В.В. – М.: Энергия,1973г. – 296с.
342. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов/Г.Н. Абрамович. – 2 – е изд., доп. – Москва ; Ленинград : изд – во и тип. Госэнергоиздата, 1948.
343. Hu C. An experimental study on the spectroscopic characteristics in coal – water slurry diffusion flames based on hot – oxygen burner technology/ Hu C., Gong Y., Guo Q., Song X., Yu G.// Fuel Processing Technology – 2016. – V.154. –p.168–177
344. Salinasa C.T. Experiments for combustion temperature measurements in a sugarcane bagasse large – scale boiler furnace/Пус Y., Louc C., B. dos Santos D// Applied Thermal Engineering – 2020. – V.175. –p. 115433
345. Knoll M. Influences of turbulence modeling on particle – wall contacts in numerical simulations of industrial furnaces for thermal particle treatment/Knoll M., Gerhardter H., Hochenauer C., Tomazic P.// Powder Technology – 2020. –V.373. –p.497–509.

346. Зигель Р. Теплообмен излучением: Пер. с англ./Р.Зигель, Дж.Хауэлл Под ред. д – ра техн. наук Б. А. Хрусталева. – Москва: Мир, 1975. – 934 с.
347. Рубцов Н.А. Теплообмен излучением: Теплообмен в излучающих системах с диатерм. средой./ Рубцов Н.А. // – Новосибирск: НГУ, 1977. – 86 с.
348. Оцисик М.Н. Сложный теплообмен: Пер. с англ. /М.Н. Оцисик; Под ред. д – ра техн. наук Н.А. Анфимова. – Москва: Мир, 1976. – 616
349. Planck M. The Theory of heat radiation/ Planck M. // N.Y.: Dover Publications, 1959. 224 p.
350. Chen Y. A study to investigate pyrolysis of wood particles of various shapes and sizes/Chen Y., Aanjaneya K., Atreya A.// Fire Saf. J. – 2017. – V. 91. – p. 820–827,
351. Stokes G.G. On the effect of internal friction of fluids on the motion of pendulums./Stokes G.G.//Transactions of the Cambridge Philosophical Society. – 1851. –V.9. – Part II, – p.8–106.
352. Strakhov V.L. Mathematical simulation of thermophysical and thermo chemical processes during combustion of intumescent fire – protective coatings/Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P.//Combust. Explos. Shock Waves – 2001. – V.37. –p. 178–186.
353. Wilke C.R. A viscosity equation for gas mixture/Wilke C.R. //J. Chem. Phys. – 1950. – V.18. – №4. – P.517–522.
354. Slezak A. CFD simulation of entrained – flow coal gasification: Coal particle density/size fraction effects/Slezak A., Kuhlman J.M., Shadle L.J., Spenik J., Shi S.// Powder Technology – 2010. – V.203. –p.98 – 108.
355. Xu J. Modeling of multiphase reaction and slag flow in single – burner coal water slurry gasifier/Xu J., Dai Z., Liu H., Guo L., Sun F.// Chemical Engineering Science – 2017. –V.162. –p.41–52.
356. Кузнецов Г.В. Экспериментальная оценка прочности кокса обугливающегося резиноподобного теплозащитного материала/Кузнецов Г.В.// Физика горения и взрыва. – 1996. – Т.32. – №5. – С.143 – 150.
357. Кузнецов Г.В. Высокотемпературное разрушение резиноподобных теплозащитных материалов в условиях высоких давлений / Кузнецов Г.В.// Теплофизика высоких температур. – 1996. – Т.34. – №6. – С. 919– 923.
358. Формалев В.Ф. Моделирование нелинейной неизотермической фильтрации в условиях пленочного охлаждения анизотропных тел/ Формалев В.Ф. // Теплофизика высоких температур. – 1997. – Т.35. – № 2. – С.286.
359. Формалев В.Ф. Тепломассоперенос в анизотропных телах/ Формалев В.Ф. // Теплофизика высоких температур. – 2001. – Т.39. – №5. – С.810–832.

360. Салганский Е.А. Модель паровоздушной газификации в фильтрационном режиме/Салганский Е. А., Фурсов В.П., Глазов С.В., Салганская М.В., Манелис Г.Б.//Физика горения и взрыва. – 2006. – Т.42, – №1. – С.65 – 72.
361. Strizhak P.A. Differences in the Ignition Characteristics of Coal–Water Slurries and Composite Liquid Fuel/ Vershinina K.Yu., Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.//Solid Fuel Chemistry. – 2016. – V.50. – I.2, – pp. 88–101
362. Порязов В.А. Математическое моделирование эрозионного горения металлизированных твердых топлив/ В.А. Порязов, Д.А. Крайнов//Вестник томского государственного университета. – 2019. – Т58. – С.119 – 127.
363. Wang F. Coal char particle secondary fragmentation in an entrained – flow coal – water slurry gasifier./ Guo Q., Zhang Z., Xue Z., Gong Y., Yu G., Wang F. // J. Energy Institute – 2019. – V.92. – p. 578 – 586.
364. Николаевский В.Н. Механика насыщенных пористых сред/ В.Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов, Г. А. Зотов. – Москва: Недра, 1970. – 355 с.
365. Liu Y. Experimental and numerical investigation on premixed H₂/Air combustion./ Liu Y., Zhang Y., Liu X., Liu Z., Che D.//International Journal of Hydrogen Energy – 2016. –V.41 –p. 10496 – 10506.
366. Semenov N.N. Spontaneous ignition and chain reactions./Semenov N.N.// Russian Chemical Reviews. – 1967, – V.36
367. Lewis B. Combustion, Explosions and Flame in Gases./ Lewis B., Elbe G.V.// New York, London.: Acad. Press, 1987, 566 P.
368. Basevich V.Ya. Detailed Kinetic Mechanism of the Combustion of Homogeneous Gaseous Mixtures with Participation of Oxygen – containing Oxidants./ Basevich V.Ya.// Russian Chemical Reviews – 1987. –V.56, – I.5. –p.411
369. Shi L. A new in – situ pyrolytic time – of – flight mass spectrometer instrument for study on coal pyrolysis/Shi L., Wang X., Zhang S., Wu X., Yuan L., Tang Z.//Journal of Analytical and Applied Pyrolysis – 2016. –V.117. –p.347–353.
370. Passaner A. J. phys. Chemie. – 1932. – V.161. 299.
371. Зельдович Я.Б. ЖЭТФ/ Зельдович Я.Б., Семенов Н.Н. // – 1940. – Т.10. – с.1116 – 1427
372. Семенов Н.Н. О некоторой проблеме химической кинетики и реакционной способности/ Семенов Н.Н. // М.: Изд – в А СССР, 1958
373. Налбандян А.Б. Современное состояние проблем газофазного окисления органических соединений/ Налбандян А.Б., Варданян И.А.// Ереван: Изд – в А АрмССР, 1986.

374. Кармилова Л.В. Журн. физ. Химии/ Кармилова Л. В., Ениколопов Н. С, Налбандян А. Б.// – 1957. – Т.31, – с. 851
375. Козубкова М. Экспериментальное исследование и численное моделирование горения метана в областях со сложной геометрией/ Козубкова М., Крутиль Я., Неврлий В.// Физика горения и взрыва, 2014, т. 50, №4
376. Silva A.G.P. Design, modelling and experimental analysis of a piezoelectric wind energy generator for low – power applications/Silva A.G.P., Sobrinho J.M.B., Souto C.da Rocha, Riesc A., de Castro A.C.//Sensors and Actuators A – 2021. –V.317 –p.112462
377. Lundheim S.H. From vague interest to strong intentions to install solar panels on private homes in the North e An analysis of psychological drivers / Lundheim S.H., Vesely S., Nayum A., Klockner C.A.//Renewable Energy – 2021. – V.165. – p. 455 – 463.
378. Beagle E. Comparative life cycle assessment of biomass utilization for electricity generation in the European Union and the United States /Beagle E., Belmont E.// Energy Policy – 2019. –V.128. – p. 267–275
379. Banja M. Biomass for energy in the EU – The support framework/ Banja M., Sikkema R., Jégard M., Motola V., Jean – François Dallemand.// Energy Policy – 2019. –V.131. –p. 215–228
380. Liang J. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: Critical role of zeolite catalysts/Liang J., Shan G., Sun Y.// Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2021. –V.139. –p. 110707
381. Kan T. Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass: A review of variations in process factors and system structure/Kan T., Strezov V., Evans T., He J., Kumar R., Lu Q.// Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2020. –V.134. –p. 110305
382. Zhu Y. Water use of a biomass direct – combustion power generation system in China: A combination of life cycle assessment and water footprint analysis/ Zhu Y., Liang J., Yang Q., Zhou H., Peng K.//Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2019. –V.115. –p. 109396
383. Biomass combustion science, technology and engineering. Woodhead Publishing. – 2013. – p. 320
384. Шершнева А.А. Пневматические топки ЦКТИ системы Шершнева для котлов малой мощности/А.А. Шершнева. – Москва; Ленинград: Машгиз. 1954
385. Mehrabian R. A CFD model for thermal conversion of thermally thick biomass particles/Mehrabian R., Zahirovic S., Scharler R., Obernberger I., Kleditzsch S., Wirtz S., Scherer V., Lu H., Baxter L.L.// Fuel Processing Technology – 2012. – V.95. –p.96–108
386. Lu H. Effects of particle shape and size on devolatilization of biomass particle/Lu H., Ip E., Scott J., Foster P., Vickers M., Baxter L.L.// Fuel – 2010. –V. 89. – p. 1156–1168

387. Riaza J. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass/Riaza J., Gibbins J., Chalmers H.//*Fuel* – 2017. – V.202. – p. 650–655.
388. Blasi C.D. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis/ Blasi C.D.//*Progress in Energy and Combustion Science* – 2008. – V.34. –p. 47–90
389. Дольд А. Лекции по алгебраической топологии /А. Дольд; Пер. с англ. Ю. Б. Рудяка и А. Ф. Харшиладзе; Под ред. Д. Б. Фукса. – Москва: Мир, 1976. – 463 с.
390. Никитин В.М. Химия древесины и целлюлозы/ Никитин В.М. // – М.: Лесная промышленность, 1978.
391. Branca C. A summative model for the pyrolysis reaction heats of beech wood/ Branca C., Blasi C. Di//*Thermochemica Acta*. – 2016. – V. 638. – p. 10–16
392. Thurner F. Kinetic investigation of wood pyrolysis/Thurner F., Mann U.// *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.* – 1981 – V. 20. – p.482 – 488.
393. Gorton W.C. Oil from biomass by entrained – flow pyrolysis/ Gorton W.C., Knight J.A.//*Biotechnol Bioeng Symp.* – 1984. – V.14. – p.15 – 20.
394. Nunn T.R. Product composition and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood/ Nunn T.R., Howard J.B., Longwell J.P., Peters W.A.//*Ind. Eng. Proc. Des. Dev.* – 1985. – V.24. – p. 836 – 844.
395. Moreno A.I. Pyrolysis of furniture wood waste: Decomposition and gases evolved/ Moreno A.I., Font R.//*Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2015. – V. 113. – p. 464–473.
396. Scott D.S. The flash pyrolysis of aspen – poplar wood/Scott D.S., Piskorz J.//*Can. J. Chem. Eng.* – 1982. – V. 60. – p.666 – 674.
397. Scott D.S. The continuous flash pyrolysis of biomass/Scott D.S., Piskorz J.//*Can. J. Chem. Eng.* – 1984. – V. 62. – p. 404–412.
398. Horne P.A. Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass/ Horne P.A., Williams P.T.//*Fuel*. – 1996. – V. 75. – p. 51–59.
399. Zanzi R. Rapid high – temperature pyrolysis of biomass in a free – fall reactor/Zanzi R., Sjoström K., Bjornbom E.//*Fuel*. – 1996. – V.75. – p.545–550.
400. Piskorz J. Fast pyrolysis of sweet sorghum and sweet sorghum bagasse/ Piskorz J., Majerski P., Radlein D., Scott D.S., Bridgwater A.V.//*J. Anal. Appl. Pyrol.* – 1998. – V. 46. – p. 15–29.
401. Evans R.J. Molecular characterization of the pyrolysis of biomass. 1. Fundamentals / Evans R.J., Milne T.A.//*Energy Fuels*. – 1987. – V.1 – p.123–137.
402. Evans R.J. Molecular characterization of the pyrolysis of biomass. 2. Applications/ Evans R.J., Milne T.A.//*Energy Fuels*. – 1987. – V.1. – p. 311–320.

403. Antal M.J. Effects of reactor severity on the gas – phase pyrolysis of cellulose – and kraft lignin – derived volatile matter//Antal M.J.//Ind. Eng. Prod. Res. Dev. – 1983. V. 22. – p. 366–75
404. Overend R.P. editors. Fundamentals of biomass thermochemical conversion/ Overend R.P., Milne T.A., Mudge L.K. – London.: Elsevier, 1985.
405. Гришин А.М. Сравнительный анализ термокинетических постоянных сушки и пиролиза лесных горючих материалов/ Гришин А.М., Сеницын С.П., Акимов И.В.//ФГВ – 1991. – Т.27, №6 – с.17 – 23
406. Natale G. Modeling particle population balances in fluidized bed wood gasifiers/Natale G., Galgano A., Blasi C.Di.//Biomass and bioenergy. – 2014. – V. 62. – p. 123 – 137
407. Ciacci T. Numerical simulation of the electromagnetic field and the heat and mass transfer processes during microwave – induced pyrolysis of a wood block/Ciacci T., Galgano A., Blasi C.Di.//Chemical Engineering. – 2010. – V. 65. – p. 4117 – 4133
408. Shafizadeh F. Thermal deterioration of wood/Shafizadeh F., Chin P.P.S.// – ACS. Symp. Ser. 1977.
409. Boer K.W. Advances in solar energy/Boer K.W., Duffie J.A.// – American Solar Energy., 1982.
410. Evans R.J. Molecular characterization of the pyrolysis of biomass. 1. Fundamentals/Evans R.J., Milne T.A.//Energy Fuels. – 1987. – V.1. – p.123–137
411. Antal M.J. Effects of reactor severity on the gas – phase pyrolysis of cellulose – and kraft lignin – derived volatile matter//Ind. Eng. Prod. Res. Dev. – 1983. – V. 22. – p.366–375.
412. Miller R.S. A generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics/ Miller R.S., Bellan J.//Combust Sci. Technol. – 1996. – V.126. – p. 97–137.
413. Саломатов В.В. Нелинейный тепломассоперенос – основа современных энергосберегающих технологий комплекса «сталь – прокат»/Саломатов В.В. Монография – Новосибирск: Изд – во НГТУ. 2005.
414. Foltz R.B. An evaluation of three wood shred blends for post – fire erosion control using indoor simulated rain events on small plots/ Foltz R.B., Wagenbrenner N.S.// Catena – 2010. –V. 80. –p. 86–94.
415. Wegener J.K. Wood chipping with conical helical blades e Theoretical deliberations and practical experiments concerning the adjustment of chip length with a set pitch of the blade/ Wegener J.K., Wegene T.// Biomass and Bioenergy – 2014. –V.66 –p. 151 – 158
416. Simpson W.T. Specific gravity, moisture content, and density relationship for wood/Simpson W.T.// – Gen. Tech. Rep. FPL – GTR – 76. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service, Forest Products Laboratory. – 1993. 13 p.

417. Darcy H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau/ Darcy H. // — Paris: V. Dalmont, 1856. — VII – 647 с.
418. Sheremet M.A. Natural convection in an inclined cavity with time – periodic temperature boundary conditions using nanofluids: Application in solar collectors / Sheremet M.A., Pop I., Mahian O.//International Journal of Heat and Mass Transfer – 2018. – V.116 – p.751–761.
419. Sheremet M.A. Natural convection heat transfer combined with melting process in a cubical cavity under the effects of uniform inclined magnetic field and local heat source/Bondareva N.S., Sheremet M.A.// International Journal of Heat and Mass Transfer – 2017. –V. 108 –p. 1057–1067
420. Egorov R.I. Intensity dependent features of the light – induced gasification of the waste – derived coal – water compositions/Egorov R.I., Zaitsev A.S., Li H., Gao X., Strizhak P.A.// Renewable Energy – 2020. – V. 146 –p.1667 – 1675.
421. Kuznetsov G.V. Mechanism of Sulfur and Nitrogen Oxides Suppression in Combustion Products of Mixed Fuels Based on Coal and Wood./ Kuznetsov G.V., Jankovsky S.A., Tolokolnikov A.A. Zenkov A.V. // Combustion Science and Technology – 2019. – V.191. –I. 11. –p. 2071 – 2081.
422. Somerville M. The effect of heating rate, particle size and gas flow on the yield of charcoal during the pyrolysis of radiata pine wood/Somerville M., Deev A.//Renewable Energy – 2020. – V.151. – p.419 – 425
423. Hou J. Transformation of sulfur and nitrogen during Shenmu coal pyrolysis/Hou J., Ma Y., Li S., Shi J., He L., Li J.//Fuel – 2018. –V.231 –p. 134–144
424. Glushkov D.O. Minimum temperatures for sustainable ignition of coal water slurry containing petrochemicals/Glushkov D.O., Strizhak P.A., Vershinina K.Yu.// Applied Thermal Engineering – 2016. –V.96. –p.534–546
425. Yi S. The influence of water content in rice husk bio – oil on the rheological properties of coal bio – oil slurries /Yi S., Hao L., Li S., Song W.//Energy – 2019. –V.189 –p. 116307
426. Jianxin D. Erosion wear mechanisms of coal–water–slurry (CWS) ceramic nozzles in industry boilers/Jianxin D., Zeliang D., Dongling Y.//Materials Science and Engineering A – 2006. – V. 417. –p. 1–7
427. Mazhukin V.I. Analysis of laser – induced evaporation of Al target under conditions of vapour plasma formation/Mazhukin V.I., Nossov V.V., Smurov I.//Thin Solid Films – 2004. – V.453–454. – p. 353–361.
428. Скрыпник Н.Н. Объемная подача насоса для высококонцентрированной водоугольной суспензии/Ашуров Ф.М., Скрыпник Н.Н.// Проблемы аксиоматики в гидро – газодинамике. Вып.8. – М.: Прометей, 2000. – С.14 – 23.

429. Ртищева А.С. Внедрение нового экологически чистого топлива и особенности его распыления/Жаринов Ю.Б., Ртищева А.С.// Управление качеством образования, продукции и окружающей среды: материалы 5 всерос. науч. – практ. конф., Бийск, 29 сент. – 1 окт. 2011.
430. Кузнецов В.А. Анализ сжигания водоугольного топлива в котле малой мощности с использованием численного моделирования/Кузнецов В.А., Мальцев Л.И., Дектерев А.А., Чернецкий М.Ю. // 7 Российская нац. конф. по теплообмену, Москва, 22 – 26 окт. 2018: РНКТ – 7: труды в 3 т. Т.1. – М.: МЭИ, 2018. – С.410
431. Minakov A.V. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals/Minakov A.V., Shebeleva A.A., Strizhak P.A., Chernetskiy M.Yu., Volkov R.S.//Fuel – 2019. –V.254 – p.115606.
432. Вахрушева Г.Д. Результаты приготовления суспензионного угольного топлива на основе фильтр – кеков оф "междуреченская"/ Вахрушева Г.Д., Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И., Мاستихина В.И., Дзюба Д.А.// Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2012. – Т93 – №5
433. Вершинина, К. Ю. Характеристики зажигания частиц угля и капель суспензионного топлива при кондуктивном нагреве / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 10. – С. 21–29.
434. Williams A. Combustion of droplets of liquid fuels: a review/Williams A.//Combustion and Flame – 1973. –V.21. – I.1. – P.1 – 31.
435. Zhang K. Evaluation of modified used engine oil acting as a dispersant for concentrated coal–water slurry/Zhang K., Jin L., Cao Q.// Fuel – 2016. –V.175. – p. 202–209.
436. Dryer F.L. Simplified reaction mechanism for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames/ Westbrook C.K. Dryer F.L.//Combustion Science and Technology. – 1981. – V.27, – p.31–43.
437. Агроскин А.А. Теплофизика твердого топлива/А.А. Агроскин, В. Б. Глейбман// – М.: Недра, 1980. – 256 с.
438. Domelski E.S. Selected Values of Heats of Combustion and Heats of Formation of Organic Compounds Containing the Elements C, H, N, O, P, and S./Domelski E.S.//Journal of Physical and Chemical Reference Data – 1972. – V.1. –p. 221.
439. Chris W. The Wilcoxon Rank – Sum Test/Chris W.// Chance encounters: A First Course in Data Analysis and Inference. John Wiley & Sons, New York – 1999.
440. Morrison D.K. Coal – water slurry reburning for NO, emissions control/Morrison D. K.// Proc. Inr. Tech. Conf. Coal Fuel Syst. – 1995. – V.20. – p.47 – 58.
441. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами/ Рапопорт Э.Я. – М.: Высш. шк., 2009.

442. Sheremet M.A. Numerical analysis of nonsteady – state conjugate natural convection between two concentric spheres/Sheremet M.A.//J.Eng. Thermophys. – 2011. –V. 20 –p. 1–12
443. Kleinhans U. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior/Kleinhans U., Wieland C., Frandsen F.J., Spliethoff H.//Progress in Energy and Combustion Science – 2018. –V.68. –p. 65 – 168.
444. Yin C. Grate – firing of biomass for heat and power production/Yin C., Rosendahl L.A., Kær S.K.//Progress in Energy and Combustion Science – 2008. – 34. P. – 725–754
445. Degereji M.U. Predicting the slagging potential of co – fired coal with sewage sludge and wood biomass/Degereji M.U., Gubba S.R., Ingham D.B., Ma L., Pourkashanian M., Williams A., Williamson J.// Fuel – 2013. –V.108. – p. 550–556
446. Zhang J. Investigation of the slagging characteristics during co – combustion of Shenhua coal and corn stalk: Effect of deposition surface/Zhang J., Zhou H.//Fuel – 2019. –V.256. – p. 115939
447. Yao B. H₂-rich gas production from leaves/Yao B., Xiao T., Jie X., Gonzalez – Cortes S., Edwards P.P.//Catalysis Today – 2018. –V.317 – p. 43–49
448. Bhuiyan A.A. CFD modelling of co – firing of biomass with coal under oxy – fuel combustion in a large scale power plant/Bhuiyan A.A., Naser J.//Fuel – 2015. –V.159. –p. 150–168.
449. Ghenai C. CFD analysis of the effects of co – firing biomass with coal. / Ghenai C., Janajreh I.// Energy Conversion and Management – 2010. – V.51. –p. 1694–1701
450. Knudsen M., Ann. Phys. (Leipzig)/ Knudsen M.// – 1917. – V.52 – I.105
451. Kanematsu Y. Designing the scale of a woody biomass CHP considering local forestry reformation: A case study of Tanegashima, Japan/Kanematsu Y., Oosawa K., Okubo T., Kikuchi Y.//Applied Energy – 2017. – V.198. – p. 160–172
452. Chang J. CFD modeling of hydrodynamics, combustion and NO_x emission in a tangentially fired pulverized – coal boiler at low load operating conditions/ Chang J., Wang X., Zhou Z., Chen H., Ni Y.//Advanced Powder Technology. – 2021. – V.32 – I.2 – p.290 – 303
453. Feng X. Particle – induced oxidative damage by indoor size – segregated particulate matter from coal – burning homes in the Xuanwei lung cancer epidemic area, Yunnan Province, China/ Feng X., Shao L., Xi C., Jones T., Zhang D., Berube K.//Chemosphere – 2020. –V.256. –p.127058
454. Nunes L.J.R. Biomass waste co – firing with coal applied to the Sines Thermal Power Plant in Portugal/Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S.//Fuel – 2014. –V.132. –p.153–157.
455. Hodz'ic' N. Influence of multiple air staging and reburning on NO_x emissions during co – firing of low rank brown coal with woody biomass and natural gas/Hodz'ic' N., Kazagic' A., Smajevic I.//Applied Energy – 2016. –V.168. –p.38–47.

456. Rokni E. Curtailing the generation of sulfur dioxide and nitrogen oxide emissions by blending and oxy – combustion of coals/Rokni E., Panahi A., Ren X., Levendis Y.A.//Fuel – 2016. –V.181. – p.772–784.
457. Rokni E. Formation of acid gases from co – firing of coal with raw and torrefied biomasses. 0 – th U.S./Rokni, E., Panahi, A., Levendis, Y.A.// National Combustion Meeting Volume 2017 – April, 2017 10th U.S. National Combustion Meeting; College Park Marriott Hotel and Conference Center College Park; United States; 23 April 2017 до 26 April 2017
458. Johnson G.R. Influence of Bravo fungicide applications on wood density and moisture content of Swiss needle cast affected Douglas – fir trees/ Johnson G.R., Gartner B.L., Maguire D., Kanaskie A.//Forest Ecology and Management – 2003. – V.186. –p. 339–348.
459. Zhang M. Effects of dehumidification drying parameters on physical and chemical properties of biomass brick/Zhang M., Zhang S., Wang M., Lu Z., Jia W.//Construction and Building Materials. – 2019. –V.215. –p.696 – 708.
460. Dieulafait M. Comt. Rend/Dieulafait M// – 1885. –V.100. –p. 284 – 286
461. Muhlert F. Der Kohlenschwefel/ Muhlert F. // Knapp. Halle. – 1930 – V.1.
462. Wheeler R.V. Chemistry & Industry/ Wheeler R.V.// – 1926. – p. 335 – 344.
463. Leitch R.D. U.S. Ber. Mines. / Leitch R.D.//Rept. Investigation. – 1932 – V.15 – p.3146
464. Gerasimov G.Y. Modeling of the Transformation of Sulfur Compounds in Oxygen Gasification of Coal Dust/Gerasimov G.Y., Bogacheva T.M.//Combustion, Explosion, and Shock Waves – 2001. – V.37. –p.406–412
465. Ma W. Kinetic modeling and experimental validation on the effect of KCl and SO₂ concentration on corrosion of pure Fe under simulated municipal solid waste combustion/Ma W. Weng T. Chen G.//Energy Procedia – 2018. –V.152. –p. 1302–1309
466. Романков П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи)/П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк, М.И. Курочкина// – Л. : Химия, 1993. – 496 с
467. Шипилов В.М. Пример расчета теплообменника: методические указания / В.М. Шипилов, В.В. Бухмиров// – Иваново: ИЭИ, 1988. – 32 с.
468. Кичигин М.А. Теплообменные аппараты и выпарные установки / М.А. Кичигин, Г.Н. Костенко// – М.– Л. : Госэнергоиздат, 1955. – 392 с.
469. Maksimov V. Convection influence on ice formation process on the evaporator heat pump pipes/ Maksimov V., Saloum A.//MATEC Web of Conferences. – 2017. –V.141. –p. 01001

470. Sung Y. Synergistic effect of co – firing woody biomass with coal on NO_x reduction and burnout during air – staged combustion/ Sung Y., Lee S., Kim C., Jun D., Moon C., Choi G., Kim D.//*Exper. Therm. Fluid Sci.* – 2016. –V.71. –p.114–125.
471. Zhou A. Numerical investigation of biomass co – combustion with methane for NO_x reduction/Zhou A., Xu H., Xu M., Yu W., Li Z., Yang W.//*Energy* – 2020. –V.194. –p.116868
472. Nigay N.A. Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers/Nigay N.A., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu.//*Ener. Sourc. Part A: Recov., Utiliza. Environ. Effects.* – 2019. –V.42. –I.16. –p.1997 – 2005.
473. Starchenko A.V. Mathematical modeling of the formation of nitrogen oxides during combustion of pulverized coal/ Starchenko A.V.//*Combust. Explos. Shock Wav.* – 1998. –V.34. – p.3 – 13.
474. Зельдович Я.Б. Окисление азота при горении/ Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк – Каменецкий Д.А. – Москва – Ленинград, Издательство АН СССР, 1947. – 150 с.
475. Roslyakov P.V. Calculation of the formation of fuel oxides of nitrogen when burning nitrogen – containing fuels./Roslyakov P.V.//*Therm. Engin.* – 1986. –V.1. –p.37 – 41.
476. Mitchell J.W. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion/ Mitchell J.W., Tarbell J.M.//*AIChE Journal.* – 1982. –V.28. –p. 302 – 311.
477. De Michelle G. Clean combustion in power generation systems/De Michelle G.// *Proc. of eu- rotherm seminar 37 Heat Transfer in Radiating and Combusting Systems 2.* 1994.
478. Семёнов Н.Н. Цепные реакции/ Семёнов Н.Н. // — М.: Госхимтехиздат, 1934.
479. Guo Z. Characteristics of biomass biomass/coal briquettes and pollutant emission reduction for sulfur and nitrogen during combustion/ Guo Z., Wu J., Zhang Y., Wang F., Guo Y., Chen K., Liu H.//*Fuel.* – 2020. –V.272 –p. 117632
480. Price – Allison A. Emissions performance of high moisture wood fuels burned in a residential stove/Price – Allison A, Lea – Langton A.R., Mitchell E.J.S, Gudka B., Jones J.M., Mason P.E., Williams A.//*Fuel.* – 2019. – V.1. – p.1038 – 1045.
481. Carson W.R. Cofiring coal – water slurry in cyclone boilers: some combustion issues and consid- erations/Carson W.R. Tillman D.//*Proc. Int. Tech. Conf. Coal Util. Fuel Syst.* – 1997. –V.22. – p.627 – 638.
482. Wang Y. Numerical optimization of the influence of multiple deep air – staged combustion on the NO_x emission in an opposed firing utility boiler using lean coal/Wang Y., Zhou Y.// *Fuel* – 2020. –V.269. –p.116996

483. Miller S.F. The effect of cofiring coal – water slurry fuel for – mulated from waste coal fines with pulverized coal on NO_x, emissions/Miller S.F.//Suppl. Coal Fines: Unclaimed Fuel, Pap. Inr. Tech. Coaf Coal Ufil. Fuel Sysf. 21st. – 1996. –p.25 – 36.
484. Kurgankina M.A. Advantages of switching coal – burning power plants to coal – water slurries containing petrochemicals/Kurgankina M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A.//Applied Thermal Engineering. – 2019. –V.147. – p.998 – 1008.
485. Dmitrienko M.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals/Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A.// J. of Hazardous Materials. – 2017. – V.338. – pp. 148 – 159.
486. Kapetaki Z. Detailed Process Simulation of Pre – combustion IGCC Plants Using Coal – slurry and Dry Coal Gasifiers/ Kapetaki Z., Ahn H., Brandani S.//Energy Procedia. – 2013. – V.37. – p.2196 – 2203
487. Кондратьев В.Н. Кинетика и механизм газофазных реакций/Кондратьев В.Н., НИКИТИН Е.Е.// – М., Наука. 1974. – 558 с.
488. Zhang Y. Flow behavior of high – temperature flue gas in the heat transferchamber of a pilot – scale coal – water slurry combustion furnace/Zhang Y., Bo Y., Wu Y., Wu X., Huang Z., Zhou J., Cen K.//Particuology – 2014. –V.17 – p. 114–124
489. Si T. Simultaneous removal of SO₂ and NO_x by a new combined spray – and scattered – bubble technology based on preozonation: From lab scale to pilot scale/Si T., Wang Ch., Yan X., Zhang Y., Ren Y., Hu J., Anthony E.J.//Applied Energy. – 2019. –V.242 – p.1528 – 1538.
490. Zbogar A. Shedding of ash deposits/Zbogar A., Frandsen F., Jensen P.A., Glarborg P.// Progress in Energy and Combustion Science – 2009. –V.35. – p. 31–56
491. Harb H. Modeling of ash deposition in large – scale combustion facilities burning pulverized coal/Harb H.//Progress in Energy and Combustion Science. – 1997. – V.23. – I.3 – pp. 267 – 282.
492. Lee F.C.C. Modelling ash deposition in pulverized coal – fired applications/Lee F.C.C., Lockwood F.C.//Progress in Energy and Combustion Science. – 1999. – V.25 – I.2, – pp. 117 – 132.
493. Wang X. The ash deposition mechanism in boilers burning Zhundong coal with high contents of sodium and calcium: A study from ash evaporating to condensing/Wang X., Xu Z., Wei B., Zhang L., Tan H., Yang T., Mikulcic H., Duic N.//Applied Thermal Engineering – 2015. – V.80 150 – 159.
494. Harbin Boiler L. Co. Investigation on the Combustion Characteristics of Zhundong Coal and the Feasibility Study on the Design of Furnace Fully Burning Zhundong Coal, — 2012.

495. Paist A. Probes for measuring heat transfer parameters and fouling intensity in boilers. Paist A., Poobus A., Tiikma T.//*Fuel* – 2002. – V.81
496. Rezaeia H.R. Thermal conductivity of coal ash and slags and models used/Rezaeia H.R., Gupta R.P., Bryanta G.W., Harta J.T., Liua G.S., Bailey C.W., Walla T.F., Siyamaeb K., Makinob Y., Endob//*Fuel*. – 2000. – V.79, — I.13 — pp. 1697 — 1710.
497. Maloneya D.J. Heat capacity and thermal conductivity considerations for coal particles during the early stages of rapid heating/Maloneya D.J., Sampath R., ZondlocJohn W.//*Combustion and Flame*. – 1999. – V.116 — I. 1–2 — pp. 94 —104.
498. Kæra S.K. Towards a CFD – based mechanistic deposit formation model for straw – fired boilers/ Kæra S.K., Rosendahla L.A., Baxterb L.L. // *Fuel* – 2006. – V.85. – p. 833 — 848
499. Cutler A.J.B. External corrosion in coal – fired boilers: Assessment from laboratory data/Cutler A.J.B., Raask E//*Corrosion Science*. – 1981. – V.21. — I.11. — pp. 789 — 800.
500. Luan C. An experimental investigation into the characteristics and deposition mechanism of high – viscosity coal ash/Luan C., You C., Zhang D.//*Fuel* – 2014. – V.119. 14 — 20
501. Zbogar A. Heat transfer in ash deposits: A modelling tool – box/Zbogar A., Frandsen F. J., Peter A.J., Peter G.//*Progress in Energy and Combustion Science*. – 2005. – V.31. — I. 5 — pp. 371— 421.
502. Wain S.E. Inorganic transformation and ash deposition during combustion/ Wain S.E., Livingston W.R., Sanyal A., Williamson J. Benson S.A.//*Engineering Foundation* – 1991, – p. 459.
503. Wall T.F. The character of ash deposits and the thermal performance of furnac-es/Wall T.F., Bhattacharya S.P., Baxter L.L., Richards G., Harb J.N. //*Fuel Processin Technology*. – 1995. – V.44 — I.1 – 3 — pp.143 — 153.
504. Baxter L.L. Influence of ash deposit chemistry and structure on physical and transport properties/Baxter L.L.//*Fuel Processing Technology*. – 1998. – V.56. – I.1–2 – pp. 81 – 88.
505. Feng J. Development of porous fly ash – based geopolymer with low thermal conductivity/ Feng J., Zhang , Lunlun R.G., Ye L., Wei C., Xudong C.//*Materials and Design* – 2015. – V.65. – p. 529 — 533
506. Joris K. Development of fluidized bed combustion— an overview of trends, performance and cost/ Joris K., Martin J., Andre´ F.//*Progress in Energy and Combustion Science* – 2007. – V.33. – p. 19 — 55.
507. Shestakov S.M. Calculation of the burning – out process of crushed fuel particles in furnace with low – temperature eddy at PK – 24 boiler/ Shestakov S.M., Paramonov A.P.//*Thermal engendering*. —1993. – V3. — pp.39 — 40.

508. Salomatov V.V. Retrofitting the operating coal – fired TP – 87 and BKZ – 320 boilers for vortex fuel combustion technology/Salomatov V.V.//Thermal engendering.— 2013. – V.60, — I.6. — pp. 381— 389
509. Jameel M.I. Sootblower optimization — part 1: fundamental hydrodynamics of sootblower nozzle and jet/ Jameel M.I. Cormack D.E. Tran H. Moskal T.E.//Tappi Journal —1994. – V. 77. – I.5. — pp.135 —142
510. Nelson J.E. In service cleaning of fire – side boiler tube surface with water lancing. / Nelson J.E., Desiderio A.J., Buckley W.E.// Proc. Amer. Power Conf., Chicago. —1971. – V.33. — pp. 584 — 593
511. Hasselmann D.P.H. Unified theory of shock fracture initiation and crack propagation in brittle ceramics/Hasselmann D.P.H.//J. Am Ceram Soc. – 1969. – V.52. – p. 600 — 60
512. Linzer W. Flow reversal in natural circulation systems /Linzer W., Walter H.// Applied Thermal Engineering. – 2003. – V.23. — I.18. — pp. 2363 —2372.
513. Zhang B. Analysis of a boiler pipe rupture. / Zhang B., Lai Z., Cui Y., Fan X. // Engineering Failure Analysis – 2006. – V. 13. – p. 75 — 79.
514. Kaliazine A. Sootbloweroptimisation II: deposit and sootblower interaction./ Kaliazine A., Cormack D.E., Piroozmand, Tran H.//Tappi Journal — 1997. – V.80. – p. 201—207.
515. Kwangkook J. Levy. Theoretical prediction of sulfuric acid condensation rates in boiler flue gas/ Kwangkook J., Edward K.// International Journal of Heat and Mass Transfer – 2012. – V. 55. – p. 8010–8019.
516. Рихтер Л.А. Газовоздушные тракты тепловых электростанций/Рихтер Л.А.// – 2 – е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 263 с.
517. Ateşok G. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal–water slurries/Boylu F., Dinçer H., Ateşok G.//Fuel Process. Technol. – 2004. – V.85. – I.4. P.241 – 250.
518. Miller B.G. Coal–water slurry fuel utilization in utility and industrial boilers/Miller B.G. // Chem. Eng. Prog. 1989. V. 85. Issue 3. P. 29 – – 38.
519. Papachristodoulou G. Coal slurry fuel technology/ Papachristodoulou G., Trass O.//Can. J. Chem. Eng. – 1987. – V.65. – I.2. – P.177 – 201.
520. Thompson T. The physio – chemical characteristics of condensed naphthalene sulfonates and how they are adjusted to optimize their value in coal–water slurries. Fourteenth International Conference on Coal & Slurry Technology, ClearwaterCoal & Slurry Technology Association, FL, 1989.

521. Zhou M. Development and evaluation of polycarboxylic acid hyper – dispersant used to prepare high – concentrated coal–water slurry/Zhou M.// Powder Technol. – 2012. – V.229. – P.185 – 190
522. Liu Y. Numerical investigation of air – staged combustion emphasizing char gasification and gas temperature deviation in a large – scale, tangentially fired pulverized – coal boiler/Liu Y., Fan W., Li Y.//Applied Energy – 2016. – V.177. – p. 323–334
523. Делягин Г.Н. Кинетика и аэродинамика процессов горения топлив/Делягин Г.Н.// – М.: Наука, 1969. С.111–127.
524. Tran H.N. Sintering of fireside deposits and its impact on plugging in kraft recovery boilers/ Tran H.N., Barham D., Reeve D.W.//Tappi Journal – 1988. – V.70. – I.4. – p.109–13
525. Алехнович А.Н. Шлакование пылеугольных энергетических котлов/Алехнович А.Н.// – М.: НТФ "Энергопрогресс", 2013. – 116 с.
526. Roache P.J. Computational Fluid Dynamics, Hermosa Publishers/Roache P.J.// – Albuquerque, 1976
527. Samarskii A.A. Local one dimensional difference schemes on non – uniform nets/Samarskii A.A.//Zh. USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics. – V.3. – I.3. – 1963. – P.572 – 619
528. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде/Л. С. Лейбензон// – Москва: Гостехиздат, 1947 – 244 с.
529. Syrodoy S.V. Initiation of ignition of highly porouse fuel particles in the flow of high temperature medium/Syrodoy S.V., Gutareva N.Y., Salomatov V.V.//EPJ Web of Conferences – 2016. – V.110. – 01023.
530. Тодес О.М. Теория теплового взрыва. I. Тепловой взрыв реакций «нулевого» порядка/ Тодес О.М.//ЖФХ. – 1939. – Т.13. – №7. – с. 868 – 879
531. Грязнов Н.С. Пиролиз углей в процессе коксования. – М.: Металлургия, 1983. – 183с.
532. Рид Р. Свойства газов и жидкостей/ Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. // – 3 – е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1982г. – 592с.
533. Кормилицын В.И. Механизм процессов поглощения оксидов азота водой из дымовых газов/Кормилицын В.И.// Энергоснабжение и водоподготовка. 2008. – Т.56. – №6. – с. 59 – 62.
534. Рамм В.М. Абсорбция газов/ Рамм В.М. // – изд. 2 – е. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
535. Герасимов Г.Я. Моделирование преобразования соединений серы при кислородной газификации угольной пыли/ Герасимов Г.Я., Богачева Т.М.// Физика горения и взрыва. 2008. – Т.37. – №4. – С.46 – 52.

Приложение А. Исходные данные для расчетов

Для математических моделей, приведенных в главе 2:

Исследовалось зажигание частиц водоугольного топлива выполненных из каменных углей и бурых углей. Теплофизические и термохимические характеристики последних приведены в Таблице А.1. Состав летучих приведен в Таблице А.2. Термохимические константы реакций пиролиза, паровой газификации и воспламенения приведены в таблице А.3.

Таблица А.1 — Теплофизические и термохимические характеристики углей [437]

| Марка угля (месторождение) | C_p Дж/(кг·К) | $Q_{тр}$ Дж/кг | λ Вт/(м·К) | ρ кг/м ³ | V^{daf} % | C^r % |
|--|--------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------|------------|
| Каменные угли Донецкого угольного бассейна | | | | | | |
| Длиннопламенный (Д) | 1150 | 176,7 | 0,116 | 1253 | 46 | 76 |
| Газовый (Г) | 1130 | 193,8 | 0,123 | 1264 | 39 | 83 |
| Жирный (Ж) | 1090 | 282,6 | 0,119 | 1260 | 26 | 86 |
| Коксовый (К) | 1070 | 287,2 | 0,128 | 1254 | 28 | 88 |
| Отощенный спекающийся (ОС) | 1050 | 296,4 | 0,134 | 1274 | 33 | 89 |
| Тощий (Т) | 1000 | 274,2 | 0,134 | 1242 | 15 | 90 |
| Полуантрацит (ПА) | 946 | 193 | 0,149 | 1307 | 9 | 91 |
| Антрацит | 928 | 187,6 | 0,149 | 1389 | 1,5 | 95 |
| Бурые угли | | | | | | |
| Березовское | 1150 | 431 | 0,151 | 1200 | 48 | 34,3 |
| Гусиноозерское | 1140 | 451 | 0,140 | 1200 | 43 | 39,4 |
| Ново – Дмитровское | 1130 | 196 | 0,151 | 1200 | 43 | 44,4 |
| Ирша – Бородинское | 1170 | 490 | 0,140 | 120 | 47 | 37 |

Таблица А.2 — Состав газообразных продуктов пиролиза [531]

| Компонент | Содержание компонента, % | |
|--------------------------------|--------------------------|----------------|
| | Бурый уголь | Каменный уголь |
| Углекислый газ CO ₂ | 15,5 | 2,3 |

| Компонент | Содержание компонента, % | |
|------------------------|--------------------------|------|
| | Моноксид углерода CO | 15,0 |
| Метан CH ₄ | 20,5 | 65,9 |
| Водород H ₂ | 25,6 | 18,6 |
| Азот N ₂ | 23,4 | 7,5 |

Таблица А.3. Константы термохимических реакций [368]

| Реакция | E_i ; Дж/(моль) | k_i (1/с) | |
|------------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| Термическое разложение | $31.0 \cdot 10^3$ | 24 | Бурый уголь |
| | $56.1 \cdot 10^3$ | 178 | Жирный уголь |
| | $56.9 \cdot 10^3$ | 131,8 | Коксовый уголь |
| | $60.6 \cdot 10^3$ | 212 | Тощий уголь |
| $H_2O + C = CO + H_2$ | $220 \cdot 10^3$ | $2.07 \cdot 10^7$ | Одностадийная кинетика |
| $CO + O_2 = CO_2$ | $200.0 \cdot 10^3$ | $2.50 \cdot 10^{12}$ | |
| $H_2 + 0.5 \cdot O_2 = H_2O$ | $105.0 \cdot 10^3$ | $1.13 \cdot 10^{17}$ | |
| $CH_4 + O_2 = CO_2 + 2 \cdot H_2O$ | $35 \cdot 10^3$ | $5.1 \cdot 10^{14}$ | |
| $H_2 + O_2 = 2OH$ | $188.37 \cdot 10^3$ | $5.6 \cdot 10^6$ | Многостадийная кинетика |
| $OH + H_2 = H_2O + H$ | $52 \cdot 10^3$ | $2,4 \cdot 10^{10}$ | |
| $H + O_2 = OH + O$ | $73.24 \cdot 10^3$ | $3,14 \cdot 10^{14}$ | |
| $O + H_2 = OH + H$ | $3.7 \cdot 10^4$ | $1,8 \cdot 10^4$ | |
| H+стенка | 0 | 0 | |
| O+стенка | 0 | 0 | |
| $OH + CO = CO_2 + H$ | $2.4 \cdot 10^4$ | $2.9 \cdot 10^4$ | |
| $2CO + O_2 = 2CO_2$ | $20.0 \cdot 10^4$ | $2.50 \cdot 10^{12}$ | |
| $CH_4 + 1,5O_2 = CO + 2H_2O$ | $3.5 \cdot 10^4$ | $2,00 \cdot 10^{15}$ | |
| $CO + 1.5O_2 = CO_2$ | $1.2 \cdot 10^4$ | $2,00 \cdot 10^9$ | |
| $CO_2 \rightarrow CO + 1.5O_2$ | $7.72 \cdot 10^4$ | $8,11 \cdot 10^9$ | |

Для математических моделей, приведенных в главе 3:

Исследовалось зажигание частиц влажной древесной биомассы выполненной из древесины лиственницы. Теплофизические приведены в таблице А.4. Состав летучих приведен в таблице А.5. Термохимические константы реакций пиролиза, приведены в таблицах А.6 –

А.8, для реакций паровой газификации и воспламенения основных компонентов летучих приняты в соответствии с данными таблицы А.3.

Таблица А.4 — Теплофизические характеристики древесины

| Температура (К) | λ Вт/(м·К) | C Дж/(кг·К) | ρ кг/м ³ | $Q_{тр}$ кДж/кг |
|--------------------|-----------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|
| 373 | 0.18 | 1246 | 499.56 | 133.2 |

Таблица А.5 — Химический состав продуктов пиролиза древесины

| Наименование | Содержание по массе, % |
|-----------------|------------------------|
| CO ₂ | 14,0 |
| CO | 39,3 |
| CH ₄ | 5,96 |
| H ₂ | 1,07 |

Таблица А.6 — Термохимические константы процесса пиролиза (модель [405])

| Реакция | Энергия активации E_i Дж/(моль) | Предэкспоненциальный множитель k_i (1/с) |
|-------------------------------|--------------------------------------|--|
| <i>Древесина</i> → газ + кокс | $30 \cdot 10^3$ | 0.416 |

Таблица А.7 — Термохимические константы процесса пиролиза (модель [408])

| Реакция | Энергия активации E_i Дж/(моль) | Предэкспоненциальный множитель k_i (1/с) |
|--------------------------|--------------------------------------|---|
| <i>Древесина</i> → газ | $88.6 \cdot 10^3$ | $1.43 \cdot 10^4$ |
| <i>Древесина</i> → кокс | $106.5 \cdot 10^3$ | $7.4 \cdot 10^6$ |
| <i>Древесина</i> → смола | $112.7 \cdot 10^3$ | $4.12 \cdot 10^6$ |

Таблица А.8 — Термохимические константы процесса пиролиза (модель [412])

| Реакция | E_i Дж/(моль) | k_i (1/с) | Компонент |
|-------------------|--------------------|----------------------|---------------|
| $C \rightarrow A$ | $242.4 \cdot 10^3$ | $2.8 \cdot 10^{19}$ | Целлюлоза |
| | $107.8 \cdot 10^3$ | $9.6 \cdot 10^8$ | Лигнин |
| | $186.7 \cdot 10^3$ | $2.10 \cdot 10^{16}$ | Гемицеллюлоза |

| Реакция | E_i Дж/(моль) | k_i (1/с) | Компонент |
|--|--------------------|----------------------|---------------|
| $A \rightarrow \text{Смола}$ | $196.5 \cdot 10^3$ | $3.28 \cdot 10^{19}$ | Целлюлоза |
| | $143.8 \cdot 10^3$ | $1.5 \cdot 10^9$ | Лигнин |
| | $202.4 \cdot 10^3$ | $8.75 \cdot 10^{16}$ | Гемицеллюлоза |
| $A \rightarrow X_c \cdot \text{Кокс} + (1 - X_c) \cdot \text{Газ}$ | $150.5 \cdot 10^3$ | $1.3 \cdot 10^{19}$ | Целлюлоза |
| | $111.4 \cdot 10^3$ | $7.7 \cdot 10^6$ | Лигнин |
| | $145.7 \cdot 10^3$ | $2.6 \cdot 10^{11}$ | Гемицеллюлоза |

Для математических моделей, приведенных в главе 4:

Составы топливных смесей приведены в таблице А.9. Основные характеристики лесного горючего материала приведены в таблице А.10. Характеристики угля приняты в соответствии с данными, приведенными в таблице А.1. Термохимические константы газофазных и гетерогенных реакций горения приведены в таблице А.11.

Таблица А.9 — Состав исследуемых образцов

| Параграфы 4.1.2, 4.1.3 | | | | | |
|------------------------|-------|---------------|------------------|---------------|------|
| Номер составов | Уголь | | Листья | | Вода |
| | Марка | Содержание, % | Вид дерева | Содержание, % | % |
| №1 | Д | 40 | Березовые листья | 10 | 50 |
| №2 | | | Сосновая хвоя | | |
| №3 | | | Еловая хвоя | | |
| №4 | | | Древесный уголь | | |
| Параграф 4.1.1 | | | | | |
| | Уголь | | Древесина | | |
| | Марка | Содержание, % | Тип | Содержание, % | — |
| №5 | Д | 30 | Сосна | 0,05 | 65 |
| №6 | | | Береза | 0,05 | 65 |
| №7 | | | Лиственница | 0,05 | 65 |

Таблица А.10 — Основные характеристики лесного горючего материала [447]

| Компонент | C_p , Дж/(кгК) | λ , Вт/(м·К) | ρ , кг/м ³ | V^{daf} , % | C^r , % | Q_p^H , Дж/кг |
|-----------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|---------------|-----------|--------------------|
| Листья березы | 1250 | 0,15 | 796 | 4,36 | 4,41 | 15,47 |
| Листья дуба | 1250 | 0,13 | 844 | 6,82 | 5,37 | 18,87 |
| Листья ивы | 1250 | 0,115 | 600 | 6,82 | 5,37 | 18,87 |
| Сосновая хвоя | 2300 | 0,115 | 600 | 6,38 | 8,21 | 19,22 |
| Еловая хвоя | 2300 | 0,11 | 290 | 9,4 | 8,42 | 22,12 |
| Древесный уголь | 950 | 0,058 | 290 | 7,61 | 0,37 | 30,312 |

Таблица А.11 — Термохимические характеристики основных реакций окисления [368]

| № | Реакции | Q МДж/кг | E кДж/моль | k 1/с |
|---|---|-------------|---------------|-----------------------|
| Зажигание водорода (H ₂) | | | | |
| 1 | H ₂ +O ₂ = 2OH | 39.8 | 85394.4 | 5.103·10 ³ |
| 2 | H+O ₂ = OH+O | 4.168 | 21533.0 | 0.27·10 ³ |
| 3 | O+H ₂ = OH+H | 0.49 | 36440.0 | 0.535·10 ³ |
| 4 | H ₂ +OH = H ₂ O+H | 3.7 | 21637.0 | 0.271·10 ³ |
| 5 | OH+ OH = 2OH | 4.186 | 24528.0 | 0.309·10 ³ |
| Зажигание окиси углерода (CO) | | | | |
| 1 | CO+2OH = CO ₂ +2H | 3.87 | 23758.0 | 0.299·10 ³ |
| 2 | 2CO+O ₂ = 2CO ₂ | 10.11 | 96800.0 | 7.05·10 ⁶ |
| 3 | CO+3H ₂ = CH ₄ +H ₂ O | 7.3 | 23758.0 | 0.299·10 ³ |
| Зажигание метана (CH ₄) | | | | |
| 1 | CH ₄ +OH = CH ₃ +H ₂ O | 4.5 | 35581.0 | 0.515·10 ³ |
| 2 | CH ₄ +O = CH ₃ +OH | 0.001 | 32510.0 | 0.447·10 ³ |
| 3 | CH ₃ +O ₂ = H ₂ CO+OH | 14.1 | 41680.0 | 0.682·10 ³ |
| 4 | H ₂ CO+OH = HCO+H ₂ O | 12.65 | 0 | 100 |
| 5 | CO+OH = CO ₂ +H | 3.9 | 23758.0 | 0.299·10 ³ |
| Гетерогенные реакции окисления углерода | | | | |
| 1 | C+O ₂ = CO ₂ | 32.8 | 134.0 | 4.78·10 ⁴ |
| 2 | 2C+O ₂ = 2CO | 18.4 | 128.7 | 3.75·10 ⁴ |

| № | Реакции | Q МДж/кг | E кДж/моль | k 1/с |
|------------------------------------|---|-------------|---------------|----------------------|
| 3 | $C+CO_2 = 2CO$ | 14.4 | 257.4 | $1.40 \cdot 10^7$ |
| 4 | $C+H_2O = CO+H_2$ | 10.8 | 187.2 | $5.54 \cdot 10^5$ |
| 5 | $C+2H_2O = CO_2+H_2$ | 10.8 | 187.2 | $5.54 \cdot 10^5$ |
| 6 | $C+2H_2 = CH_4$ | 6.24 | 287.2 | $5.55 \cdot 10^7$ |
| Зажигание бензола (C_6H_6) | | | | |
| | $C_6H_6+O = C_6H_5O+H$ | 3.52 | 18953.0 | $9.82 \cdot 10^8$ |
| | $C_6H_6+O = C_6H_5O+OH$ | 5.78 | 61504.0 | $8.92 \cdot 10^8$ |
| | $C_6H_6+OH = C_6H_5+H_2O$ | 6.79 | 6066.8 | $7.14 \cdot 10^3$ |
| | $C_6H_6+O_2 = C_6H_5+HO_2$ | 6.25 | 265265 | $2.69 \cdot 10^9$ |
| Зажигание толуола ($C_6H_5CH_3$) | | | | |
| | $C_6H_5CH_3+O_2 = C_6H_5CH_2+HO_2$ | 4.94 | 173.2 | $1.10 \cdot 10^{10}$ |
| | $H+C_6H_5CH_2 = C_6H_5CH_3$ | 0.06 | 0 | $8.0 \cdot 10^9$ |
| | $C_6H_5CH_3 = C_6H_5+CH_3$ | 3.12 | 417.6 | $6.20 \cdot 10^{11}$ |
| | $C_6H_5+C_6H_5CH_3 = C_6H_6+C_6H_5CH_2$ | 4.94 | 18.4 | $9.40 \cdot 10^7$ |

В качестве твердых горючих компонентов ОВУТ использовались угли разной степени метаморфизма и КЕК (отход углеобогащения). В таблицах А.12 – А.14 представлены наименования и основные свойства твердых горючих компонентов ОВУТ, установленные в результате выполненного технического и элементного анализа.

Таблица А.12 — Виды исследованных твердых горючих компонент ОВУТ

| Номер | Наименование, марка, название фабрики или разреза в России |
|-------|--|
| 1 | Фильтр – кек (сухой) каменного угля марки «К», обогатительная фабрика «Северная», Кемеровская область, Россия |
| 2 | Фильтр – кек «Д» (сухой) |
| 3 | Фильтр – кек (сухой) каменного угля марки «Г», обогатительная фабрика шахты им. Кирова, Кемеровская область, Россия |
| 4 | Фильтр – кек (сухой) каменного угля марки «СС», обогатительная фабрика «Черниговская – Коксовая», Кемеровская область, Россия |
| 5 | Фильтр – кек (сухой) каменного угля марки «Т», обогатительная фабрика «Калтанская – Энергетическая», Кемеровская область, Россия |

| | |
|-------|--|
| Номер | Наименование, марка, название фабрики или разреза в России |
| 6 | Фильтр – кек (сухой) каменного угля марки «Ж», обогатительная фабрика «Беловская», Кемеровская область, Россия |
| 7 | Бурый уголь марки «Б1», Таловское месторождение, Томская область, Россия |
| 8 | Бурый уголь марки «Б2», разрез «Бородинский» Красноярский край, Россия |
| 9 | Бурый уголь марки «Б3», разрез «Балахтинский» Красноярский край, Россия |
| 10 | Каменный уголь марки «К», шахта «Березовская» Кемеровская область, Россия |
| 11 | Каменный уголь марки «Д», Листвянское месторождение, Новосибирская область, Россия |
| 12 | Каменный уголь марки «Д», шахта «Грамотеинская», Кемеровская область, Россия |
| 13 | Каменный уголь марки «Г», обогатительная фабрика шахты им. Кирова, Кемеровская область, Россия |
| 14 | Каменный уголь марки «СС», разрез «Черниговец», Кемеровская область, Россия |
| 15 | Каменный уголь марки «Т», разрез «Калтанский», Кемеровская область, Россия |
| 16 | Каменный уголь марки «Ж», разрез «Беловский», Кемеровская область, Россия |
| 17 | Коксовая мелочь, ОАО «Кокс», г. Кемерово, Россия |
| 18 | Полукоксы, ООО «Завод полукоксования», г. Ленинск – Кузнецкий, Россия |

Таблица А.13 — Результаты технического анализа образцов углей и фильтр – КЕКов

| Образец | Массовая доля, % | | | Энтальпия окисления, МДж/кг |
|---------|------------------|-----------|---------|-----------------------------|
| | Влажность | Зольность | Летучие | |
| 1 | – | 26.46 | 23.08 | 24.83 |
| 2 | – | 36.99 | 41.47 | 19.24 |
| 3 | – | 33.82 | 43.11 | 22.16 |
| 4 | – | 50.89 | 30.16 | 15.23 |
| 5 | – | 21.20 | 16.09 | 26.92 |

| Образец | Массовая доля, % | | | Энтальпия окисления, МДж/кг |
|---------|------------------|-----------|---------|-----------------------------|
| | Влажность | Зольность | Летучие | |
| 6 | – | 57.67 | 45.24 | 20.9 |
| 7 | 10.15 | 22.84 | 61.47 | 17.30 |
| 8 | 14.11 | 4.12 | 47.63 | 22.91 |
| 9 | 15.52 | 3.85 | 46.62 | 23.36 |
| 10 | 2.05 | 14.65 | 27.03 | 29.76 |
| 11 | 10.09 | 8.52 | 40.19 | 24.82 |
| 12 | 5.17 | 13.9 | 41.59 | 25.79 |
| 13 | 0.76 | 17.8 | 41.36 | 27.82 |
| 14 | 2.76 | 21.68 | 27.40 | 26.23 |
| 15 | 2.89 | 18.07 | 15.07 | 27.65 |
| 16 | 8.84 | 19.51 | 39.92 | 27.98 |
| 17 | 0.13 | 14.20 | 0.53 | 28.77 |
| 18 | 4.16 | 11.67 | 11.67 | 27.32 |

Таблица А.14 — Результаты анализа элементного состава образцов углей и фильтр – КЕК

| Образец | Массовая доля компонентов в пересчете на сухой беззольный остаток, % | | | | |
|---------|--|------|------|------|-------|
| | С | Н | N | S | O |
| 1 | 87.20 | 5.09 | 2.05 | 1.02 | 4.46 |
| 2 | 73.27 | 4.90 | 0.02 | 0.22 | 21.59 |
| 3 | 75.12 | 4.64 | 0.02 | 0.22 | 19.99 |
| 4 | 87.47 | 5.04 | 2.15 | 0.44 | 4.77 |
| 5 | 90.13 | 4.26 | 2.31 | 0.44 | 2.77 |
| 6 | 73.16 | 4.99 | 2.60 | 0.65 | 18.60 |
| 7 | 64.86 | 6.90 | 0.62 | 0.38 | 27.13 |
| 8 | 73.25 | 6.52 | 0.79 | 0.44 | 18.99 |
| 9 | 74.52 | 7.20 | 0.71 | 0.30 | 17.25 |
| 10 | 79.79 | 4.49 | 1.84 | 0.87 | 12.70 |
| 11 | 77.46 | 6.25 | 2.27 | 0.35 | 13.64 |

| Образец | Массовая доля компонентов в пересчете на сухой беззольный остаток, % | | | | |
|---------|--|------|------|------|-------|
| | С | | С | | С |
| 12 | 77.11 | 5.77 | 2.62 | 0.40 | 14.11 |
| 13 | 79.31 | 5.34 | 0.01 | 0.41 | 14.93 |
| 14 | 77.30 | 4.78 | 1.93 | 0.33 | 15.32 |
| 15 | 87.97 | 4.10 | 2.23 | 0.53 | 5.03 |
| 16 | 79.71 | 4.88 | – | 0.50 | 14.91 |
| 17 | 96.21 | 1.63 | – | 0.73 | 1.42 |
| 18 | 87.74 | 2.24 | – | 0.27 | 9.74 |

Таблица А.15 — Результаты анализа характеристик образцов фильтр – КЕКа в исходном влажном состоянии

| Образец | Массовая доля сухого угля, % | Энтальпия окисления, МДж/кг |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|
| Фильтр – кек К | 56.5 | 14.03 |
| Фильтр – кек Д | 43.2 | 8.31 |
| Фильтр – кек Г | 47.0 | 10.41 |
| Фильтр – кек СС | 62.1 | 9.46 |
| Фильтр – кек Т | 60.9 | 16.42 |
| Фильтр – кек Ж | 37.9 | 12.91 |

В качестве жидких горючих компонентов использовались типичные жидкие органические промышленные отходы, мазут и другие горючие жидкости, наименования и свойства которых приведены в Таблице А.16.

Таблица А.16 — Виды исследованных жидких горючих компонентов ОБУТ

| Номер | Наименование, марка |
|-------|--|
| 1 | Моторное масло отработанное Total 9000 |
| 2 | Моторное масло исходное Total 9000 |
| 3 | Турбинное масло отработанное с механическими примесями и водой |
| 4 | Турбинное масло отработанное |
| 5 | Турбинное масло исходное |

| Номер | Наименование, марка |
|-------|---|
| 6 | Трансформаторное масло отработанное |
| 7 | Трансформаторное масло с мазутом и другими примесями |
| 8 | Мазут |
| 9 | Касторовое масло |
| 10 | Тяжелая нефть, Герасимовское месторождение, Томская область, Россия |
| 11 | Компрессорное масло |

Исходные данные для мюлли приведенной в параграфе 4.2.3.

Основные характеристики мазута и отработанного (эксплуатация в течение 1 года) турбинного масла ТП – 22с приведены в таблице А17.

Таблица А.17 — Составы ОБУТ (параграф 4.2.3)

| номер состава | Массовая доля компонента в смеси (%) | | | |
|---------------|--------------------------------------|------------------------------|-------|------|
| | КЕК | отработанное турбинное масло | мазут | вода |
| 1 | 45 (кек Т) | 10 | 0 | 45 |
| 2 | 45 (кек СС) | 10 | 0 | 45 |
| 3 | 45 (кек К) | 10 | 0 | 45 |
| 4 | 45 (кек Г) | 10 | 0 | 45 |
| 5 | 45 (кек Д) | 10 | 0 | 45 |
| 6 | 45 (кек Т) | 0 | 10 | 45 |
| 7 | 45 (кек Т) | 15 | 0 | 40 |
| 8 | 45 (кек Т) | 20 | 0 | 35 |

Таблица А.18 — Характеристики Жидких Горючих Компонентов ОБУТ

| Образец | плотность при 293 К, (кг/м ³) | влажность (%) | зольность (%) | температура (К) | | Q_s^a , МДж/кг |
|--|---|------------------|------------------|-----------------|-----------|---------------------|
| | | | | вспышки | зажигания | |
| Отработанное турбинное масло ТП – 22с | 868 | – | 0.03 | 448 | 466 | 44.9 |
| мазут | 1000 | 6.12 | 4.06 | 438 | 513 | 39.4 |

Для приготовления топливных композиций использовалось 5 разных фильтрационных КЕКов: КЕК коксующегося каменного угля (КЕК – К); КЕК длиннопламенного каменного угля (КЕК – Д); КЕК газового каменного угля (КЕК – Г); КЕК слабоспекающегося каменного угля (КЕК – СС); КЕК тощего каменного угля (КЕК – Т). Фильтрационных жмых является отходом углеобогащения и в исходном состоянии представляет смесь мелкодисперсного угля (размер частиц 50–100 мкм) с водой (массовая концентрация 40–60%). Для достоверного контроля массового содержания твердых и жидких компонентов ОБУТ все образцы КЕКа высушивали при температуре около 376 К до полного испарения влаги. Основные характеристики 5 образцов КЕКов (на сухую массу) состоянии приведены в таблицах А.19 и А.20.

Таблица А.19 — Характеристики КЕКа

| образец | A^d (%) | V^{daf} (%) | $Q_{s,v}^a (\times 10^6 \text{ Дж/кг})$ |
|---------|-----------|---------------|---|
| кек К | 26.46 | 23.08 | 24.83 |
| кек Д | 36.99 | 41.47 | 19.24 |
| кек Г | 33.82 | 43.11 | 22.16 |
| кек СС | 50.89 | 30.16 | 15.23 |
| кек Т | 21.20 | 16.09 | 26.92 |

Таблица А.20 — Элементный состав КЕКа

| образец | C^{daf} (%) | H^{daf} (%) | N^{daf} (%) | S^{daf} (%) | O^{daf} (%) |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| кек К | 87.20 | 5.09 | 2.05 | 1.02 | 4.46 |
| кек Д | 73.27 | 4.90 | 0.02 | 0.22 | 21.59 |
| кек Г | 75.12 | 4.64 | 0.02 | 0.23 | 19.99 |
| кек СС | 87.47 | 5.04 | 2.15 | 0.44 | 4.77 |
| кек Т | 90.13 | 4.26 | 2.31 | 0.44 | 2.77 |

Для математических моделей, приведенных в главе 5:

Эксперименты по исследованию характеристик и условий зажигания проведены для следующих концентраций компонент в системе «угль – ЛГМ» (Таблица А.21):

Таблица А.21 — Составы смесей угля и ЛГМ

| Номер состава | Уголь | | Биомасса | |
|---------------|-------|--------------|---------------|--------------|
| | Марка | Содержание % | Вид | Содержание % |
| Bio – С №1 | Д | 70 | Хвоя Кедра | 30 |
| | | 75 | | 25 |
| | | 80 | | 20 |
| | | 85 | | 15 |
| | | 90 | | 10 |
| | | 95 | | 5 |
| Bio – С №2 | Д | 60 | Листья Тополя | 40 |
| | | 70 | | 30 |
| | | 80 | | 20 |
| | | 90 | | 10 |
| Bio – С №3 | Д | 60 | Листья клена | 40 |
| | | 70 | | 30 |
| | | 80 | | 20 |
| | | 90 | | 10 |
| Bio – С №4 | Д | 70 | Листья березы | 30 |
| | Д | 80 | | 20 |
| | Д | 90 | | 10 |

Для математических моделей, приведенных в главе 6:

Константы термодинамических реакций, приводящих к образованию и секвестированию оксидов азота и серы приведены в таблице А.22.

Таблица А.22 — Термодинамические характеристики основных реакций [473, 533 – 535]

| № | Реакция | Е кДж/моль | k 1/с |
|--|---|--------------------|----------------------|
| Образование оксидов азота (NO _x) | | | |
| 1 | $\text{HCN} + \text{H}_2\text{O} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{NH}_3 + \text{CO}_2$ | $32.8 \cdot 10^3$ | $1.94 \cdot 10^{15}$ |
| 2 | $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$ | 418418 | $3.48 \cdot 10^{10}$ |
| 3 | $\text{N} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}$ | $318.9 \cdot 10^3$ | $2.39 \cdot 10^8$ |
| 4 | $\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{N}$ | 75490 | $3.239 \cdot 10^3$ |
| 5 | $\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$ | 61395 | $1.69 \cdot 10^3$ |
| 6 | $\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$ | 60000 | $1.69 \cdot 10^{10}$ |

| | | Е кДж/моль | к 1/с |
|--|---|--------------------|-------------------|
| Связывание оксидов азота | | | |
| 1 | $4\text{NO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{HNO}_3$ | $5.4 \cdot 10^7$ | $5.36 \cdot 10^5$ |
| 2 | $6\text{HNO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ | $94 \cdot 10^3$ | $7.58 \cdot 10^3$ |
| Образование оксидов серы (SO_x) | | | |
| 1 | $\text{H}_2\text{S} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{HS}$ | $8.49 \cdot 10^3$ | $1.5 \cdot 10^7$ |
| 2 | $\text{HS} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{H}$ | $7.15 \cdot 10^4$ | $4.58 \cdot 10^6$ |
| 3 | $\text{HS} + \text{HS} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{S}$ | $7.15 \cdot 10^4$ | $1.00 \cdot 10^7$ |
| 4 | $\text{H}_2\text{S} + \text{S} \rightarrow \text{HS} + \text{HS}$ | $2.42 \cdot 10^4$ | $9.72 \cdot 10^7$ |
| 5 | $\text{HS} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{S}$ | $2.42 \cdot 10^4$ | $1.26 \cdot 10^7$ |
| 6 | $\text{H}_2 + \text{S} \rightarrow \text{HS} + \text{H}$ | $2.43 \cdot 10^4$ | $2.08 \cdot 10^8$ |
| 7 | $\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO} + \text{O}$ | $2.22 \cdot 10^3$ | $2.91 \cdot 10^6$ |
| 8 | $\text{SO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{O}$ | $1.97 \cdot 10^4$ | $1.94 \cdot 10^6$ |
| 9 | $\text{SO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{SO} + \text{OH}$ | $2.218 \cdot 10^4$ | $2.91 \cdot 10^6$ |
| 10 | $\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3 + \text{O}$ | 70.3 | 0.011 |
| Секвестирование оксидов серы (SO_x) | | | |
| 1 | $\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}$ | 988 | 104.655 |
| 2 | $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ | $84 \cdot 10^3$ | $4.78 \cdot 10^3$ |

Для математической модели, приведенной в главе 7:

Теплофизические характеристики стенки стальной трубы и золы приведены в Таблице А.23. Принято, что при осаждении частиц золы на поверхности нагрева образуются обширные пористые слои шлака. Теплопроводность золошлаковых отложений рассчитана с учетом их пористости:

$$\lambda_1 = \Pi_3 \lambda_3 + \Pi_4 \lambda_4$$

$$C_1 = \Pi_3 C_3 + \Pi_4 C_4$$

$$\rho_1 = \Pi_3 \rho_3 + \Pi_4 \rho_4$$

Где: Π – пористость золы. Нижние индексы обозначают соответствующий компонент зольного остатка: 3 – газообразные продукты сгорания топлива; 4 – зола. В случае сжигания водоугольного топлива пористость золы составляет $\Pi \approx 0,8$, при зажигании угля $\Pi \approx 0,3$.

Таблица А.23 — Теплофизические свойства золы и стали

| Компонент | Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К) | Теплоемкость C , Дж/(кг·К) | Плотность ρ , кг/м ³ |
|-----------|--|---------------------------------|---|
| Сталь | 40 | 500 | 7800 |
| Зола | 6 | 984 | 600 |

Общие исходные данные.

Теплофизические характеристики основных компонентов газовой среды, компонент продуктов термического разложения угля и древесины, воды и водяного пара приведены в Таблице А.24. Коэффициенты диффузии компонентов газовой смеси приведены в таблице А. 25.

Таблица А.24 — Теплофизические характеристики газообразных продуктов пиролиза, воды и водяного пара [532]

| Gas | C_p , Дж/(кг·К) | λ , Вт/(м·К) | ρ , кг/м ³ |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------------|
| H ₂ O | 2352 | 0,187 | 0,202 |
| CO | 1247 | 0,081 | 0,241 |
| H ₂ | 1552 | 0,57 | 0,0187 |
| CH ₄ | 4153 | 0,144 | 0,224 |
| CO ₂ | 1301 | 0,086 | 0,4077 |
| N ₂ | 1215 | 0,072 | 0,260 |
| H ₂ O (пар) | 2135 | 0,024 | 0,598 |
| H ₂ O (жидкость) | 4190 | 0,599 | 998,2 |

Таблица А.25 — Коэффициенты бинарной диффузии для компонентов газовой смеси [532]

| Система газов | $d_{i-j} \cdot 10^{-4}$ м ² /с |
|-----------------------------|---|
| H ₂ →Окислитель | 0.63 |
| CO ₂ →Окислитель | 0.14 |
| CO→Окислитель | 0.185 |
| CH ₄ →Окислитель | 0.196 |

Продолжение таблицы А.25

| Система газов | $d_{i-j}, \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ |
|--|---|
| $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Окислитель}$ | 0.22 |
| $\text{N}_2 \rightarrow \text{Окислитель}$ | 0.19 |

Приложение Б. Вывод аналитического решения задачи зажигания частицы водоугольного топлива, покрытой водяной пленкой

Разработка аналитического решения существенно нелинейной задачи воспламенения неоднородной частицы водоугольного топлива, поверхность которой покрыта водяной пленкой, возможна при дискретизации процесса на характерные стадии (Рисунок Б.1): прогрев пленки воды, ее испарение, обезвоживание основного слоя топлива, зажигание сухого угля. Рассмотрим математические модели каждой из этих стадий.

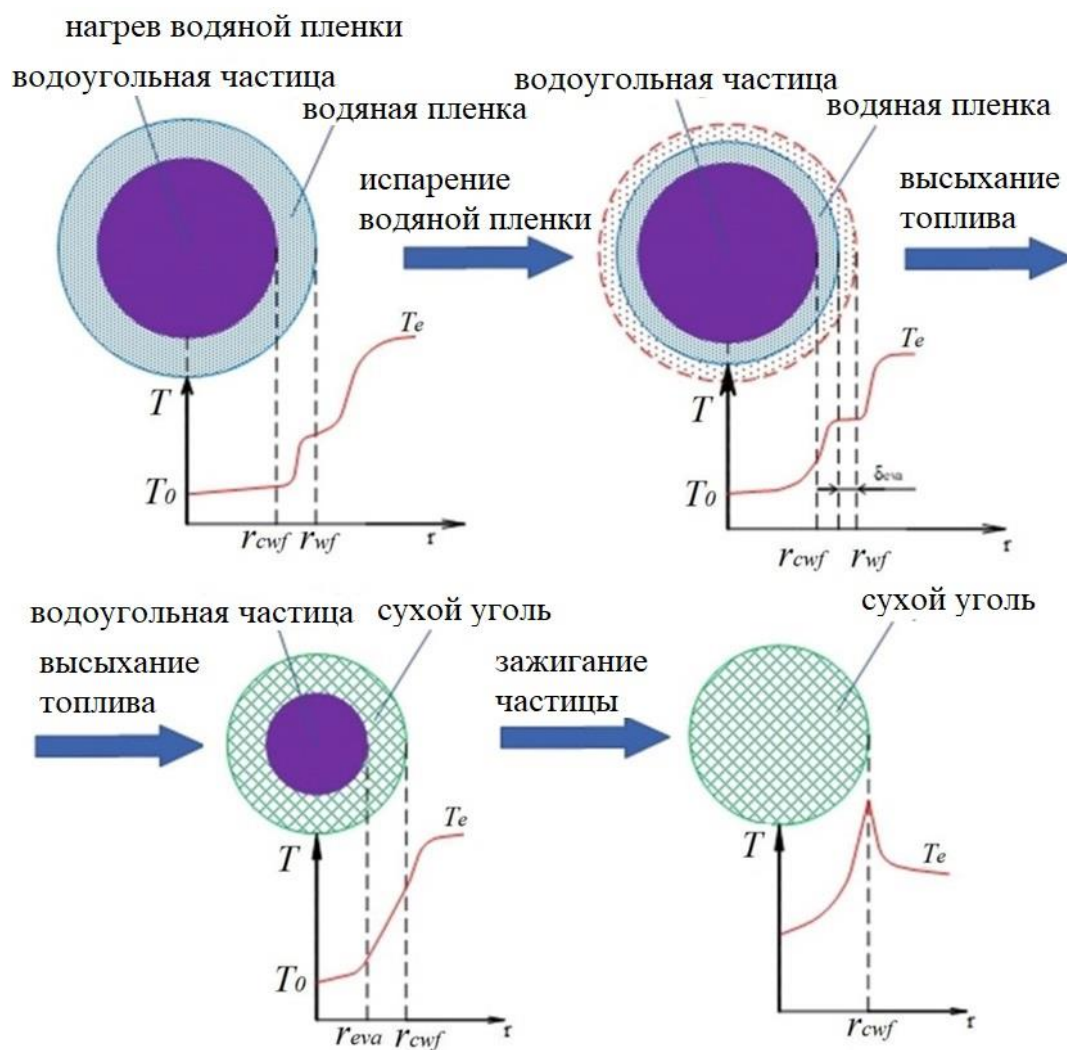


Рисунок Б.1 – Схема решения задачи зажигания.

Нагрев водяной пленки.

На первом этапе моделирования процесса воспламенения водоугольной частицы рассмотрим, нагрев приповерхностной водяной пленки. Предполагается, что при термической подготовке к зажиганию частицы ВУТ, покрытых водяной пленкой, длительность периода нагрева последней обусловлен моментом времени, при котором выполняется условие

$T_{wfs} \geq 373$ (где T_{wfs} – температура поверхности водяной пленки). При формулировании модели были приняты следующие упрощающие допущения:

- теплофизические свойства водяной пленки постоянны;
- внутренние конвективные движения воды в пленке незначительны;
- теплообмен с внешней средой происходит за счет конвекции и излучения.

При постановке задачи предполагалось, что тепловое излучение внешней среды поглощается пленкой воды на ее поверхности. Последнее можно обосновать, оценив длину свободного пробега фотона (L_f) в толще воды. Коэффициент молекулярного поглощения излучения водой $\alpha = 1 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ для спектрального диапазона волн, соответствующих условиям нагрева ($673 \leq T_e \leq 1273\text{К}$) в проведенных экспериментах. Соответственно, величина длины свободного пробега фотона в водяной пленке $L_f \approx 1/\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Учитывая, что толщина водяной пленки $\delta_{wf} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, можно сказать, что тепловое излучение поглощается на поверхности воды (или в приповерхностном слое малой толщины). Математическая постановка задачи нагрева пленки состоит из уравнения энергии для водяной пленки:

$$C_{wf} \rho_{wf} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_{wf}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (\text{Б.1})$$

$$0 < t < t_{se}, \quad r_{wcf} < r < r_{wf}, \quad T \leq T_{se}$$

Уравнение (Б.1) решалось при следующих начальных и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{wf}} = \frac{\alpha}{\lambda_{wf}} \cdot [T_e - T]_{r=r_{wf}} + \frac{\varepsilon \cdot \sigma}{\lambda_{wf}} \cdot [T_e^4 - T^4]_{r=r_{wf}} \equiv q(t) \quad (\text{Б.2})$$

$$0 < r < r_{wf}, \quad T(r, 0) = T_0,$$

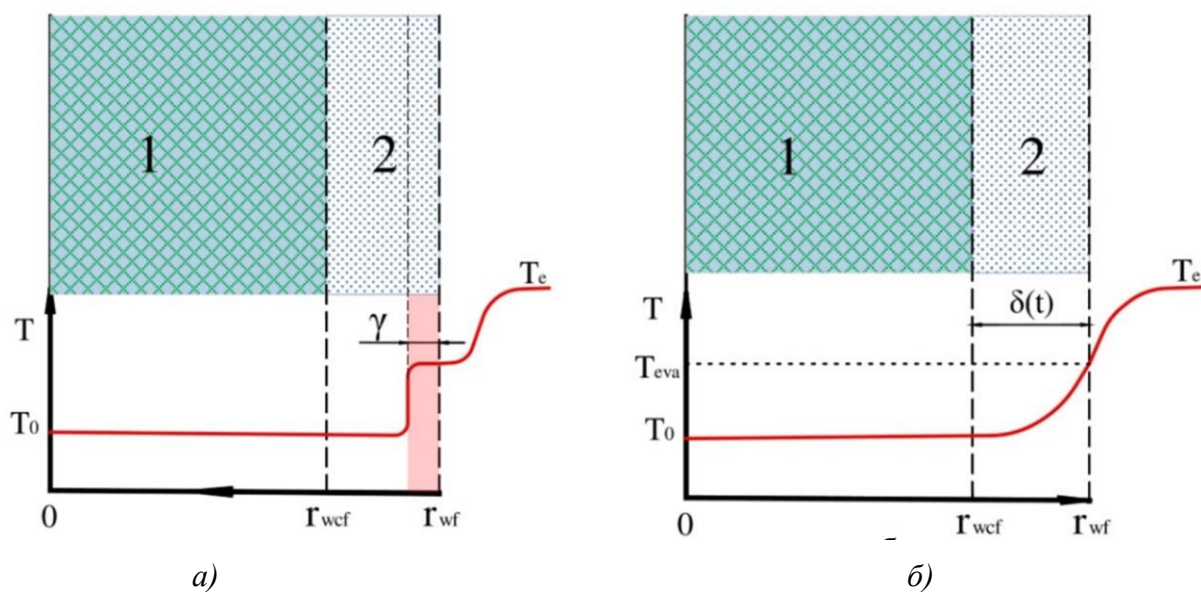
На границе раздела системы «частица ВУТ – водяная пленка» выполняется условие теплового сопряжения:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{wcf}} = \frac{C_{wcf} \rho_{wcf} r_{wcf}}{3\lambda_{wcf}} \frac{dT}{dt} \Big|_{0 < r < r_{wcf}} \quad (\text{Б.3})$$

В этом случае выражение $(C_{wcf} \rho_{wcf} r_{wcf}) / (3\lambda_{wcf})$ определяет поглощение тепла основным слоем топлива. При постановке задачи предполагалось, что градиент температуры по радиусу основного топливного слоя (водоугольный агломерат) топлива незначительно зависит от интенсивности радиационно – конвективного нагрева водяной пленке. Это связано с тем, что из – за высокой (по сравнению с водоугольным агломератом) теплоемкости (4190 Дж / кг) водяная пленка формирует своеобразный «барьер» для теплового потока.

Вследствие лучистого теплообмена задача нагрева пленки носит существенно нелинейный характер и не имеет аналитического решения. По этой причине решение задачи

нагрева водяной пленки осуществляется в два этапа: первый – начальный (или инерционный) этап нагрева (Рисунок Б.2 а). Второй этап – конечный (квазистационарный, Рисунок Б.2 б) этап нагрева.



(1 – частица водоугольного топлива; 2 – водная пленка.)

Рисунок Б.2 — Схема решения задачи нагрева пленки воды

а – начальная стадий нагрева;

б – окнчание процесса нагерва пленки воды

Начальный этап нагрева

Рассмотрим начальный этап нагрева водяной пленки. Предполагалось, что кривизна поверхности водяной пленки не оказывает значимого влияния на характеристики и условия испарения пленки воды. Для обоснования данного предположения при постановке задачи были проведены численные исследования по оценке влияния системы координат, используемой при моделировании процессов теплопроводности в водоугольной топливной частице с водяной пленкой на ее поверхности. Решена одномерная задача теплопроводности для частиц в форме сферы и куба при условии идентичности объема последних. По результатам численного моделирования установлено, что максимальные отклонения температуры в тождественных условиях нагрева для двух существенно разных частиц в диапазоне от 273 до 373 К (точка кипения воды) не превышают 0,001 К на нагреваемой поверхности пленки и менее 5 К на границе раздела системы «водяной угольный агломерат – пленка воды». Такие результаты были получены для частиц малых размеров (диаметр менее 3 мм), которые достаточно малы в условиях температуры окружающей среды 1000 К. Процесс нагрева

пленки рассматривается в рамках волновой модели распространения теплового потока (Рисунок Б.2 а). Математическая модель состоит из уравнения энергии водной пленки, записанного в безразмерных переменных:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} \quad (\text{Б.4})$$

$$0 < Fo < Fo_{se}, \quad 0 < X < 1, \quad \theta \leq \theta_{se}$$

$$0 < X < 1, \quad \theta(X, 0) = \theta_0,$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=0} = \left\{ Sk \left[1 - \theta_{X=0}^4(Fo) \right] + Bi \left[1 - \theta_{X=0}(Fo) \right] \right\} = Ki(\theta_w, Fo) = Ki; \quad (\text{Б.5})$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=\gamma} = 0; \quad (\text{Б.6})$$

$$X = \frac{x}{\delta_{wf}} \quad \theta = \frac{T}{T_e} \quad Fo = \frac{at}{\delta_{wf}^2} \quad Bi = \frac{\alpha \delta_{wf}}{\lambda_{wf}} \quad Sk = \frac{\varepsilon \sigma T_e^3 \delta_{wf}}{\lambda_{wf}}$$

Где: γ – толщина зоны теплового возмущения. Последнюю можно найти из решения уравнения:

$$\gamma(Fo) = \frac{\theta_w(Fo) - \theta_0}{0,5Ki} \quad (\text{Б.7})$$

Для решения нелинейной системы уравнений (Б.4) – (Б.6) воспользуемся асимптотическим методом теплового квазистационарного приближения, разработанным и апробированными в [149, 150].

В начальный период нагрева водяной пленки значение скорости движения фронта теплового возмущения определяется распределением температуры по толщине пленки воды. Такое предположение аналогично условию локального термодинамического равновесия. В результате закон движения температурного фронта будет формироваться этими локальными квазистационарными состояниями. Найдем квазистационарное асимптотическое приближение краевой задачи (Б.1) — (Б.3), в соответствии с методикой [149, 150]. Распределение температуры в пленке с учетом трех членов асимптотического разложения имеет вид:

$$\theta(X, Fo) \cong \theta_w(Fo) + \frac{\gamma(Fo)Ki}{2} \left(\frac{X}{\gamma} \right)^2 + \frac{\gamma(Fo)\dot{Ki}}{2} \left(\frac{X}{\gamma} \right)^2 \left[\left(\frac{X}{\gamma} \right)^2 - 2 \right] \quad (\text{Б.8})$$

Температуру поверхности водяной пленки $\theta_w(Fo)$ в (7) и (8) можно найти из решения уравнения:

$$\frac{3}{2} Sk Fo = V \left[\theta_w(Fo), Fo \right] - V(\theta, Fo) \quad (\text{Б.9})$$

$$V(\theta, Fo) = A_1 \ln(1-\theta) - \frac{A_2}{1-\theta} + B_1 \ln(\theta-b_1) - \frac{B_2}{\theta-b_1} + \frac{C_1}{2} \ln(\theta^2 + a_2\theta + b_2) +$$

$$+ \frac{2}{\sqrt{4 \cdot b_2 - a_2^2}} \operatorname{arctg} \frac{2\theta + a_2}{\sqrt{4b_2 - a_2^2}} \left[\left(D_1 - C_1 \frac{a_2^2}{2} \right) + \frac{D_2 - C_2 \frac{a_2^2}{2}}{2 \left(b_2 - \frac{a_2^2}{4} \right)} \right] + \frac{\left(D_1 - C_1 \frac{a_2^2}{2} \right) \left(\theta - \frac{a_2}{2} \right) - C_2 \left(b_2 - \frac{a_1}{4} \right)}{2 \cdot \left[1 - \theta^4 + \frac{Bi}{Sk} (1-\theta) \right]^2} - \frac{\theta - \theta_0}{C_1 \left[1 - \theta^4 + \frac{Bi}{Sk} (1-\theta) \right]^2}$$

Где: $A_i, B_i, C_i, D_i, a_i, b_i$ – константы [149, 150], которые приведены в Таблице Б.1.

Таблица Б.1 — Константы уравнения (Б.9)

| | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|
| $\alpha_1 = \sqrt{2\alpha_0}$ | $\alpha_1 = -\sqrt{2\alpha_0}$ | $b_1 = \alpha_0 - \alpha_2$ | $b_2 = \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{2}$ | $b_1 = \frac{Bi/Sk}{\sqrt{2\alpha_0}}$ |
|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|

$$\text{Где: } \alpha_0 = \left[\left(\frac{Bi}{4Sk} \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{Bi}{4Sk} \right)^4 - \left(\frac{Bi}{3Sk} + \frac{1}{3} \right)^3} \right]^{1/3} + \left[\left(\frac{Bi}{4Sk} \right)^2 - \sqrt{\left(\frac{Bi}{4Sk} \right)^4 - \left(\frac{Bi}{3Sk} + \frac{1}{3} \right)^3} \right]^{1/3}$$

$$A_1 = \frac{1}{(1-b_1)^2 \cdot (1+\alpha_2+b_2)^2} - \frac{2(1-\theta_0) \cdot (1+\alpha_2^2+b_2) + (1-b_1) \cdot (2+\alpha_2)}{(1-b_1)^3 \cdot (1+\alpha_2+b_2)}$$

$$B_1 = \frac{1}{(1-b_1)^2 \cdot (b_1^2 + \alpha_2 b_1 + b_2)^2} - \frac{2 \cdot (b_1 - \theta) \cdot (1-b_1) \cdot (2b_1 + \alpha_2) + (b_1^2 + \alpha_2 b_1 + b_2)}{(1-b_1)^3 \cdot (b_1^2 + \alpha_2 b_1 + b_2)^3}$$

$$A_2 = \frac{1-\theta_0}{(1-b_1)^2 \cdot (1+\alpha_2+b_2)^2} \quad B_2 = \frac{b_1-\theta_0}{(1-b_1)^2 \cdot (b_1^2 + b_2 \alpha_1 + b_2)^2} \quad C_1 = A_1 - B_1$$

$$D_1 = -A_1(1-2A_2+2b_1) - (A_2+B_2) + B_1(b_1-2\alpha_2+2) + (A_1-B_1) \cdot (2b_1-\alpha_2+2)$$

$$C_2 = \frac{\alpha_1 - \theta_0}{(1-\alpha_1)^2 \cdot (\alpha_1 - b_1)^2 \alpha_1} - A_1 \frac{b_2^2}{\alpha_1 \cdot (1-\alpha_1)} - A_2 \frac{b_2^2}{\alpha_1 \cdot (1-\alpha_1)} - B_1 \frac{b_2^2}{\alpha_1 \cdot (\alpha_1 - b_1)} -$$

$$- A_2 \frac{b_2^2}{\alpha_1 \cdot (\alpha_1 - b_1)^2} - \frac{D_2}{\alpha_1} - \frac{(C_1 \alpha_1 + D_1) \cdot b_2}{\alpha_1};$$

$$D_2 = \frac{b_2^2}{b_1^2} (B_1 b_1 - B_2) - b_2^2 \cdot (A_1 - A_2) - \frac{\theta}{b_1^2} - D_1 b_2$$

Можно предположить, что на начальной стадии нагрева пленки температура ее поверхности мала $\theta_w(Fo) < 1$. Соответственно можно пренебречь обратным излучением от поверхности пленки во внешнюю газовую среду. В результате нелинейный член $\theta_w^4 \rightarrow 0$. Последнее утверждение справедливо для $\theta_w \leq 0.65$ (погрешность расчета температуры не превышает 5%). В этих условиях асимптотическое разложение (8) примет следующий вид:

$$\theta_w(Fo) = \theta_0 + \left(1 + \frac{Bi}{Sk}\right) \sqrt{\frac{3}{2} Sk^2 Fo} \quad (\text{Б.10})$$

Распределение температуры в водяной пленке:

$$\theta(X, Fo) = \theta_0 + \left(1 - \frac{X}{\sqrt{6 \cdot Fo}}\right) \left(1 + \frac{Bi}{Sk}\right) \sqrt{\frac{3}{2} Sk^2 Fo} \quad (\text{Б.11})$$

Ширина зоны теплового возмущения:

$$\gamma(Fo) = \sqrt{6Fo} \quad (\text{Б.12})$$

Затем продолжительность начального этапа нагрева

$$Fo = \frac{1}{6} \quad (\text{Б.13})$$

Решая уравнение (Б.13), можно найти время (t_{shf}) начальной стадии нагрева пленки.

Завершающий этап нагрева водяной пленки

Рассмотрим второй этап нагрева водяной пленки – нагрев до температуры кипения (Рисунок Б.2 б). Исходя из предположения, что основной топливный слой (водоугольный агломерат) является термически тонким телом, и применяя процедуры асимптотического анализа, можно получить аналитическое решение задачи нагрева пленки воды. В этих условиях математическая постановка задачи нагрева пленки состоит из уравнения энергии пленки:

$$\frac{\partial \theta(X, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta(X, Fo)}{\partial X^2} \quad (\text{Б.14})$$

$$0 < X < 1; \theta(X, 0) = \varphi(X) \quad (\text{Б.15})$$

В точке контакта «водная пленка – водоугольное топливо» выполняется граничное условие:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=0} = \frac{1}{\xi} \frac{\partial \theta_{wcf}}{\partial Fo_{wcf}} \quad (\text{Б.16})$$

Здесь: $\xi = \frac{\lambda_{wcf} C_{wcf} \delta}{\lambda_{wcf} C_{wcf} R}$ – соотношение аккумулирующих способностей воды и водоугольной суспензии. На границе раздела «высокотемпературный газ – водяная пленка» выполняются граничные условия второго рода:

$$\frac{\partial \theta(1, Fo)}{\partial X} = \left\{ Sk \left[1 - \theta_{X=1}^4(Fo) \right] + Bi \left[1 - \theta_{X=1}(Fo) \right] \right\} = Ki(Fo) = Ki \quad (\text{Б.17})$$

$$X = \frac{x}{\delta_{wf}} \quad Fo = \frac{a_{wf} t}{\delta_{wf}^2} \quad Bi = \frac{\alpha \delta_{wf}}{\lambda_{wf}} \quad Sk = \frac{\varepsilon \sigma T_e^3 \delta_{wf}}{\lambda_{wf}}$$

Распределение температуры в такой системе также представляется в виде асимптотического разложения с учетом двух слагаемых по формуле [149]:

$$\theta(X, Fo) \cong \bar{\varphi} + \frac{1}{1 + \frac{1}{\xi}} \left\{ \int_0^{Fo} KidFo + Ki \left[\frac{X^2}{2} + \frac{X}{\xi} - \frac{1 + \frac{3}{\xi}}{6 \left(1 + \frac{1}{\xi} \right)} \right] \right\} \quad (\text{Б.18})$$

Здесь: $\bar{\varphi} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \varphi(x) dx$ – средняя по объему температура в водяной пленке в момент окончания начальной стадии нагрева пленки воды. При условии $X = 1$ (18) сводится к интегральному уравнению Вольтера второго рода:

$$\theta_{wf}(Fo) = \bar{\varphi} + \frac{1}{1 + \frac{1}{\xi}} \left\{ \int_0^{Fo} \{ Sk[1 - \theta_w^4(Fo)] + Bi[1 - \theta_w(Fo)] \} dFo + \{ Sk[1 - \theta_w^4(Fo)] + Bi[1 - \theta_w(Fo)] \} K(\xi) \right\} \quad (\text{Б.19})$$

$$\text{где } K(\xi) = \frac{1}{3 \left(1 + \frac{1}{\xi} \right)} \left[1 + \frac{3}{\xi} \left(1 + \frac{1}{\xi} \right) \right] \quad (\text{Б.20})$$

Интегральное уравнение (Б.19) имеет аналитическое решение:

$$SkK(\xi)Fo = F(\theta) \quad (\text{Б.21})$$

где:

$$F(\theta) = \int_{\bar{\varphi}}^{\theta_w} \frac{1 + K(\xi)Sk \left(4\theta^3 + \frac{Bi}{Sk} \right)}{\left[(1 - \theta^4) + \frac{Bi}{Sk}(1 - \theta) \right]} d\theta$$

Распределение температуры в водной пленке описывается уравнением:

$$\theta(X, Fo) = \theta_{wf}(Fo) - \frac{\{ Sk[1 - \theta_w^4(Fo)] + Bi[1 - \theta_w(Fo)] \} \left[\frac{1 - X^2}{2} + \frac{1 - X}{2} \right]}{1 + \frac{1}{\xi}} \quad (\text{Б.22})$$

Решая уравнение (Б.22) относительно Fo , можно найти время (t_{ehf}) нагрева пленки до точки кипения воды (момент начала стадии испарения воды).

$$t_{hf} = t_{shf} + t_{ehf} \quad (\text{Б.23})$$

Стадия испарения пленки

После нагрева водяной пленки начинается процесс испарения (Рисунок Б.3). Математическая модель процесса испарения пленки включает уравнение энергии:

$$C_{wf} \rho_{wf} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_{wf} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (\text{Б.24})$$

$$t > 0, r_{wcf} < r < r_{wff}, T \geq T_w$$

Уравнение (Б.24) решается при следующих начальных и граничных условиях:

$$r_{wcf} < r < r_{wff}(t), T(r, 0) = T_0$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{wff}} = \frac{\alpha}{\lambda_{wff}} [T_e - T]_{r=r_{wff}} + \frac{\varepsilon \sigma}{\lambda_{wff}} [T_e^4 - T^4]_{r=r_{wff}} - \frac{Q_{ewf} \rho_{wff}}{\lambda_{wff}} \frac{d\delta_{wff}(t)}{dt} \Big|_{r=r_{wff}} \quad (\text{Б.25})$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{wcf}} = \frac{C_{wcf} \rho_{wcf} r_{wcf}}{\lambda_{wcf}} \frac{dT}{dt} \Big|_{0 < r < r_{wcf}} \quad (\text{Б.26})$$

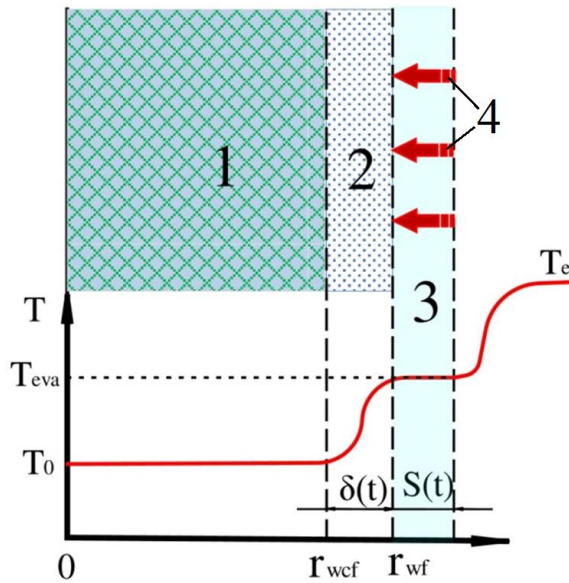


Рисунок Б.3 — Схема области решения задачи испарения водяной пленки:

1 – частица водоугольного топлива; 2 – водяная пленка; 3 – слой испаренной воды (пар); 4 – направление движения фронта испарения водяной пленки

В безразмерных переменных распределение температуры в испаряющемся приповерхностном слое воды без учета его кривизны описывается уравнением:

$$\frac{\partial \theta(X, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta(X, Fo)}{\partial X^2} \quad (\text{Б.27})$$

$$R(Fo) < X < 1$$

Уравнение (Б.27) решалось при следующих граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial Fo} \right|_{X=1} = \frac{1}{\xi} \frac{d\theta_{wcf}}{dFo} \quad (\text{Б.28})$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=0} = Ki(Fo) - V(Fo) = \bar{Ki}(Fo) \quad (\text{Б.29})$$

$$\theta(R, Fo) \Big|_{X=0} = 1 \quad (\text{Б.30})$$

$$V(Fo) = -MR \dot{R}(Fo) \quad (\text{Б.31})$$

$$\text{где } M = \frac{Q_{eva}}{c_{wcf} T_e} \quad (\text{Б.32})$$

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{\delta_{wf}} & \theta &= \frac{T}{T_{eva}} & Fo &= \frac{a_{wf} t}{\delta_{wf}^2} & Bi &= \frac{\alpha \delta_{wf}}{\lambda_{wf}} & Sk &= \frac{\varepsilon \sigma T_e^3 \delta_{wf}}{\lambda_{wf}} \\ \dot{R}(Fo) &= \frac{dR_{wf}}{dFo} & R_{wcf} &= \frac{r_{wcf}}{\delta} & T_{eva} &= 373 \text{ K} \end{aligned}$$

Для решения задачи (Б.27) – (Б.31) вследствие ее нелинейностей авторы [150] разработали оригинальный квазистационарный подход к исследованию задач с подвижными границами. В его основе лежит следующий физический принцип. Известно, что скорость движения границы фазового перехода (плавление, затвердевание, испарение, горение, образование новой фазы, и т.д.) обычно намного меньше скорости передачи теплового импульса. Это позволяет нам использовать предположить, что динамика движения фазовой границы в этих условиях будет контролироваться ограниченными по времени распределениями температуры. Решающую роль придаем квазистационарной асимптотике температурного поля. Используя алгоритм построения асимптотических разложений, разработанный в [149, 150], мы получаем квазистационарное приближение, оставляя три члена разложения:

$$\theta(X, Fo) = \frac{1}{R(Fo) + \frac{1}{\xi}} \left\{ \int_0^{Fo} \overline{Ki}(Fo) dFo + \int_0^{Fo} \varphi(X) dX + \frac{\overline{Ki}(Fo)}{R(Fo) + \frac{1}{\xi}} \left[\frac{X^2}{2} - \frac{X}{\xi} - \frac{R^2 \left(R(Fo) + \frac{3}{\xi} \right)}{6(R(Fo) + 1)} \right] \right\} + \dots \quad (\text{Б.33})$$

В уравнении (33) фазовая граница $R(Fo)$ неизвестна. Если предположить, что $X = 1$, то:

$$\overline{Fo} = N \left[1 - R(Fo) \right] + \rho(1) \left[1 - \int_0^{Fo} \frac{dFo}{\rho(R)} \right] \quad (\text{Б.34})$$

$$\overline{Fo} = \frac{1}{Ki(0)} \int_0^{Fo} Ki(0) dFo \quad (\text{Б.35})$$

$$\text{где: } N = \frac{M}{Ki(Fo)} \quad (\text{Б.36})$$

$$\rho(R) = \frac{R(Fo)}{3} \left[R(Fo) + \frac{2}{\xi} + \frac{1}{\xi^2} \frac{1}{R(Fo) + \frac{1}{\xi}} \right] \quad (\text{Б.37})$$

Рассмотрим начальную стадию испарения пленки ($R(Fo) \rightarrow 1$). В этом случае время испарения пленки можно рассчитать по формуле:

$$\overline{Fo} = N \left[1 - R(Fo) \right] + \rho(1) \left[1 - \exp \left(- \frac{Fo}{\rho(Fo)} \right) \right] \quad (\text{Б.38})$$

Время полного испарения водной пленки Fo при $R = 0$ можно определить, как:

$$\overline{Fo} = N - \rho(1) \quad (\text{Б.39})$$

Заключительная стадия процесса испарения пленки при условии $q(Fo) \sim V(Fo) = 0$, соответственно изменение радиуса во времени может быть рассчитано по формуле:

$$R(Fo) = \frac{\overline{Fo} - Fo}{N} \quad (\text{Б.40})$$

В случае $q(Fo) = q(0) = \text{const}$ числа $\overline{Fo} = Fo$. Используя формулы (Б.34) – (Б.39), можно определить полное время испарения пленки t_{ewf} .

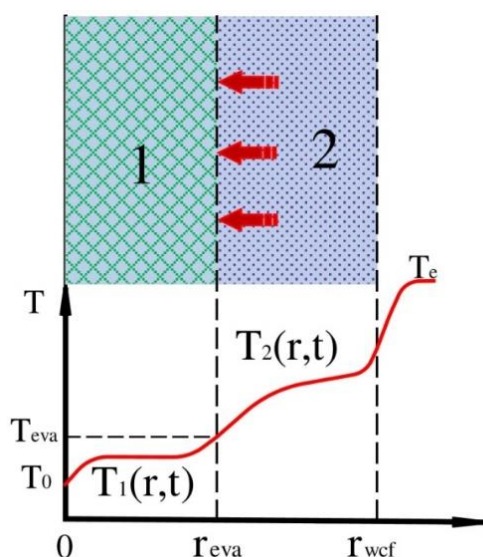


Рисунок Б.4 – Схема области решения задачи влагоотвода:

1 – частица водоугольного топлива; 2 – сухой уголь

Стадия влагоудаления

После испарения водяной пленки инициируется процесс испарения воды в основном (суспензионная часть) слое топлива. Фронт фазового перехода движется от поверхности топлива вглубь частицы (Рисунок Б.4). Процесс влагоудаления из частицы водоугольного топлива рассматривается в рамках условий Стефана [427]. Для решения этой задачи используется метод квазистационарных приближений, разработанный в [149, 150]. Как уже говорилось выше это связано с тем, что скорость движения фронта испарения много меньше скорости распространения теплового импульса [149]. Динамика движения фронта фазового перехода зависит от распределения температуры в частице. Соответственно для вычисления скорости влагоудаления, можно использовать метод выделения квазистационарной температурной асимптотики. Математическая постановка задачи испарения влаги в капле

ВУТ представляет собой систему нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности, описывающих распределение температуры в системе «исходное топливо – сухой уголь». Температурное поле в сухом слое ВУТ описывается уравнением:

$$K_a \frac{\partial \theta}{\partial Fo_1} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{2}{X} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (\text{Б.41})$$

$$R_{eva}(Fo) < X < 1; \quad \theta > 1; \quad Fo > Fo_{evf}$$

Распределение температуры в водонасыщенной части ВУТ описывается уравнением:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo_2} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{2}{X} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (\text{Б.42})$$

$$0 < X < R_{eva}(Fo); \quad \theta_{st} < \theta < 1; \quad Fo > Fo_{evf}$$

Система (Б.41) – (Б.42) решалась при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях:

$$\theta(X, 0) = \varphi(X)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=0} = 0 \quad (\text{Б.43})$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=1} = Ki(Fo) \quad (\text{Б.44})$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial X} - K_\lambda \frac{\partial \theta_2}{\partial X} = -M \frac{dR}{dFo} \equiv V(Fo) \quad (\text{Б.45})$$

$$\theta_1(R_{ev}, Fo) = \theta_2(R_{ev}, Fo) \equiv 1 \quad (\text{Б.46})$$

$$\text{Где: } K_a = \frac{a_{dry}}{a_{wcf}}; \quad K_\lambda = \frac{\lambda_{dry}}{\lambda_{wcf}}; \quad M = \frac{Q_{eva}}{C_2 \cdot T_{eva}}; \quad \theta = \frac{T}{T_{eva}}; \quad T_{eva} = 373\text{K}$$

$\varphi(X)$ – распределение температуры в момент времени окончания процесса испарения пленки воды. K_a – симплекс нестационарности. Если $K_a < 1$ (другими словами $\lambda_{dry} \ll \lambda_{wcf}$ или $C_{dry}\rho_{dry} \gg C_{wcf}\rho_{wcf}$, процесс теплопроводности в исходном топливе может считаться стационарным. Соответственно, теплота, подводимая к подвижной границе, полностью тратится на испарение. Если $K_a \gg 1$, можно обоснованно предположить, что процесс теплопереноса в сухой части топлива можно рассматривать как квазистационарный. $K_\lambda = \lambda_{wcf}/\lambda_{dry}$ – симплекс определяющий интенсивность потока теплоты из сухой в исходную часть топлива.

Задача (Б.41) – (Б.46) относится к классу существенно нелинейных задач со слабым разрывом температуры на границе фазового перехода. Для ее решения необходимо найти

момент времени инициирования процесса испарения (Fo_{eva}) и температурное поле $\varphi(x)$, соответствующее условию $Fo = Fo_{eva}$. Момент времени Fo_{eva} можно найти при условии $\theta_2(Fo_{eva}) = 1$. При этом испарение может начаться в начальной (при малых Fo) или квазистационарной (большие Fo) стадии. Как показывают оценки приведенные в [150] границей перехода от одной из стадии в другую является неравенство $Ki \geq 2$. Применительно к рассматриваемому случаю (диаметр каплей ВУТ $\delta \approx 1-3 \cdot 10^{-3}$ м) можно обоснованно предположить, что $Ki < 2$. Тогда момент начала испарения Fo_{eva} и распределение температуры $\varphi(X)$ в капле определяется из уравнений:

$$1 - \theta_0 = \int_0^{Fo} Ki(Fo) dFo + \frac{Ki(Fo)}{5} \quad (Б.47)$$

$$\theta_2(X, Fo_{st}) = \varphi(X) = 1 + \frac{Ki(1, Fo_{st})}{2} (X^2 - 1) \quad (Б.48)$$

Выделим в температурном поле квазистационарную асимптотику при двух известных $\varphi(X)$ и Fo_{eva} , с учетом двух членов разложения. В этих условиях распределение температуры в сухой части топлива рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \theta_1(X, Fo) = 1 + \frac{1}{1 - R^3} \left\{ 3K_a^{-1} \int_{Fo_{st}}^{Fo} [Ki(\theta_1(1, Fo), Fo) - R^2 q_1(Fo)] dFo + \right. \\ \left. + \frac{Ki(\theta_1(1, Fo), Fo)}{2} \left[X^2 - \frac{3}{5} + 2R^3 W(X, R) \right] - \frac{R^2 q_1(Fo)}{2} \left[X^2 - \frac{3}{5} + R^2 + 2W(X, R) \right] \right\}; \end{aligned} \quad (Б.49)$$

Распределение температуры в исходной (водонасыщенной) части топлива описывается по формуле:

$$\begin{aligned} \theta_2(X, Fo) = \frac{1}{R^3} \left\{ 3K_a^{-1} \int_{Fo_{eva}}^{Fo} [R^2 (q_1(Fo) - V(Fo))] dFo + 3 \int_0^R X^2 \varphi_2(X) dX + \right. \\ \left. + \frac{K_\lambda^{-1} R^2 [q_1(Fo) - V(Fo)]}{2} \left(X^2 - \frac{3}{5} R^2 \right) \right\} \end{aligned} \quad (Б.50)$$

В этих условия: $q_1(Fo) \equiv \partial \theta_1(R, Fo) / \partial X$. Функция $W(X, R)$ – координатная функция. Последняя приведена в Таблице Б.2. В уравнение (Б.50) используется калорическое условие вида:

$$q_1(Fo) - K_\lambda q_2(Fo) = V(Fo) \quad (Б.51)$$

Таблица Б.2 — Координатные функции

| | | | |
|---|---|---|---|
| $W(X, R)$ | $A(R) = \frac{1 - R^2 + 2 \cdot R^3 \cdot \Delta W(1, R)}{1 - R^3}$ | $B(R) = \frac{R^3 \cdot (1 - R^2 - 2 \cdot \Delta W(1, R))}{1 - R^3}$ | $\Delta W(X, R) =$ $= W(X, R) - W(R, R)$ |
| $\frac{1}{X} - \frac{9}{5} \cdot \frac{1 - R^2}{1 - R^3}$ | $\frac{2 \cdot R^3 - 3 \cdot R^2 + 1}{1 - R^3}$ | $R \cdot \frac{R^3 - 3 \cdot R + 1}{1 - R^3}$ | $\frac{R - X}{R \cdot X}$ |

В системе (Б.49) – (Б.50) неизвестны $q_1(Fo)$ и $R(Fo)$. Удовлетворяя уравнения (Б.49) и (Б.50) условию (Б.46) получим первое интегральное уравнение:

$$3K_a^{-1} \int_{Fo_{st}}^{Fo} [Ki(\theta_1, Fo) - R^2 q_1(Fo)] dFo = -\frac{Ki(\theta_1, Fo)}{2} \left[R^2 - \frac{3}{5} + 2R^3 W(X, R) \right] + R^2 \cdot q_1(Fo) \cdot \left[\frac{R^2}{5} + W(X, R) \right]; \quad (Б.52)$$

и второе уравнение интегро – дифференциальное уравнение:

$$1 = \frac{1}{R^3} \left\{ 3K_\lambda^{-1} \int_0^{Fo} R^2 [q_1(Fo) - V(Fo)] dFo + 3 \int_0^R X^2 \varphi_2(X) dX + \frac{R^3 K_\lambda^{-1} [q_1(Fo) - V(Fo)]}{5} \right\} \quad (Б.53)$$

Далее отсчет времени ведется от Fo_{eva} . Используя (Б.51), уравнение (Б.53) можно записать в виде:

$$R^3 = 3 \cdot \int_0^{Fo} R^2 \cdot q_2(Fo) dFo + 3 \cdot \int_0^R x^2 \cdot \varphi_2(X) dX + R^2 \frac{q_2(Fo)}{5} \quad (Б.54)$$

Решение (Б.54) имеет вид:

$$q_2(Fo) = q_2(0) R^2 \exp \left[-15 \int_0^{Fo} \frac{dFo}{R^2(Fo)} \right] \quad (Б.55)$$

где: $q_2(0) = Ki(Fo_{eva}) = Ki(0)$. При известной $q_2(0)$ для определения $R(Fo)$ с использованием (Б.52), которое с учетом (Б.55) преобразуется к виду:

$$3K_a^{-1} \int_0^{Fo} [Ki(\theta_1, Fo) - R^2 (K_\lambda q_2(Fo) + V(Fo))] dFo = \frac{Ki(\theta_{1p}, Fo)}{10} \alpha(R_{eva}) + \frac{K_\lambda q_2(Fo) + V(Fo)}{10} \beta(R_{eva}); \quad (Б.56)$$

$$\text{Где: } \begin{cases} \alpha(R_{eva}) = 3 - 5 \cdot [R^2 + 2 \cdot R^3(Fo) \cdot W(R, R)] \\ \beta(R_{eva}) = 2 \cdot R^2 \cdot [R^2 + 5 \cdot W(R, R)] \end{cases}$$

Уравнение (Б.56) описывает динамику обезвоживания водоугольного топлива представлено для достаточно общего закона теплообмена. Так для конвективного теплообмена на поверхности капли ВУТ выполняется условие

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=1} = Ki(Fo) \equiv Bi \cdot (1 - \theta|_{X=1}); \quad (\text{Б.57})$$

В этом случае решение (Б.46) имеет вид:

$$\tilde{m}Fo = I_L(R_{eva}) + \sum_{i=1}^2 I_i(R_{eva}) + \sum_{j=1}^3 P_j(R_{eva}) \quad (\text{Б.58})$$

Где: $\tilde{m} = (\theta_g - 1)/M$; I_i, P_j – известные выражения:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^2 I_i(R_{eva}) &= I_1(R_{eva}) + I_2(R_{eva}) = \frac{\tilde{m}K_a}{30} \Lambda(R_{eva}) \Phi(R_{eva}) + \frac{\tilde{m}K_a}{10} \int_1^{R_{eva}} \frac{B(R_{eva})}{1-R^3} \Phi(R_{eva}) dR \\ \sum_{j=1}^3 P_j(R_{eva}) &= P_1(R_{eva}) + P_2(R_{eva}) + P_3(R_{eva}) \\ &= \frac{\tilde{m}K_a K_\lambda}{30} [\beta(R_{eva}) - \alpha(R_{eva}) \Psi(R_{eva})] \Lambda(R_{eva}) q_2(R_{eva}) + \\ &+ \frac{\tilde{m}K_a K_\lambda}{30} \int_1^{R_{eva}} q_2(Fo) \frac{\Psi(R_{eva})}{1-R^3} [\beta(R_{eva}) - \alpha(R_{eva}) \Psi(R_{eva})] dR \\ &+ \tilde{m}K_\lambda \int_0^{Fo} q_2(Fo) \Lambda(R_{eva}) [\Psi(R_{eva}) + R^2] dFo \end{aligned}$$

$$\text{Где: } \Phi(R_{eva}) = \frac{\alpha(R_{eva})}{\Lambda(R_{eva})} [\beta(R_{eva}) - \alpha(R_{eva}) \Psi(R_{eva})] V(R_{eva})$$

$$\Lambda(R_{eva}) = \frac{1}{Bi} + \frac{A(R_{eva})}{2}$$

$$\Psi(R_{eva}) = \frac{B(R_{eva})}{2 \cdot \Lambda(R_{eva})}$$

Структура решения (Б.48) включает в себя: первый член $I_L(R)$ представляет собой решение Л.С. Лейбензона [528]:

$$I_L(R) = - \int_1^R A(R) \cdot (R^2 + B(R)) dR = \frac{1-R}{3} \cdot \left[\frac{1}{Bi} + \frac{A(R)}{2} \right] \quad (\text{Б.59})$$

Второй член уравнения (Б.48) $\sum_{i=1}^2 I_i(R_{eva})$ – учитывает перегрев высохшего слоя; третий $\sum_{i=1}^3 P_i(R_{eva})$ – прогрев исходной (водонасыщенной) части топлива. Полное время испарения влаги может быть рассчитано если (58) удовлетворить условию ($R_{eva} = 0$):

$$\tilde{m}Fo = I_L(0) + \sum_{i=1}^2 I_i(0) + \sum_{j=1}^3 P_j(0) \quad (\text{Б.60})$$

Решая (Б.60) относительно Fo можно определить время полного обезвоживания водугольной частицы (t_{fe}). Более простая форма уравнения (Б.60) для расчета динамики испарения влаги имеет следующий вид:

$$\tilde{m}Fo_{fe} \cong \frac{1}{2}(1-R_u^2) + \frac{1}{3}\left(\frac{1}{Bi} - 1\right)(1-R_{eva}^3) + \frac{\tilde{m}}{10}\left[1 - 5R_{eva}^2\left(1 - \frac{6}{5}R_{eva}\frac{1-R_{eva}^2}{1-R_{eva}^3}\right)\right] \quad (\text{Б.61})$$

Решение задачи зажигания.

Рассмотрим проблему возгорания со следующими упрощающими предположениями:

- Термическое разложение топлива не оказывает существенного влияния на характеристики теплопередачи.
- Теплофизические и термохимические свойства постоянны.
- Химическая реакция происходит в очень узкой зоне (намного меньше размера частиц) поверхности, которой можно пренебречь.

Из теории теплового взрыва [371] известно, что инициирование горения топлива происходит при выполнении критических (температура поверхности топлива) условий воспламенения. Для определения времени задержки воспламенения частицы ВУТ воспользуемся методом асимптотических приближений, развитым в [529]. В частности, асимптотика значения температуры на поверхности (в безразмерных переменных Д.А. Франк – Каменецкого [249]):

$$\theta(0,t) = \frac{\theta_0 + (Bi \cdot \theta_0 + Ki) \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{\pi}}}{1 + Bi \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{\pi}}} \quad (\text{Б.62})$$

Где: $\theta = \frac{E}{R \cdot T_{ign}^2} \cdot (T^* - T_{ign})$ $\theta_g = \frac{E}{R \cdot T_{ign}^2} \cdot (T_g - T_{ign})$ $\theta_0 = \frac{E}{R \cdot T_{ign}^2} \cdot (T_0 - T_{ign})$

$$\xi = \frac{x}{x_a}; \quad t_{sti} = \frac{\tau}{\tau_a}; \quad \beta = \frac{R \cdot T_{ign}}{E} \quad x_a = \sqrt{a \cdot \tau_a} \quad Bi = \frac{\alpha \cdot x_a}{\lambda}$$

$$Ki = \frac{E_i}{R \cdot T_{ign}^2} \cdot \frac{x_a}{\lambda_{dry}} \cdot \sigma \cdot T_e^4 \quad \tau_a = \frac{R \cdot T_{ign}^2}{E_i} \cdot \frac{C_{dry}}{Q_i \cdot z_i} \exp\left(\frac{E_i}{R \cdot T_{ign}}\right)$$

Зависимость (3) в момент начала процесса зажигания преобразуется к виду:

$$\sqrt{\pi \cdot \tau_{si}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\pi} \cdot Bi \cdot \sqrt{\tau_{si}}\right)^2 \cdot \exp\left(\frac{\theta_{ign}}{1 + \beta \cdot \theta_{ign}}\right) = Bi \cdot (\theta_g - \theta_0) + Ki \quad (\text{Б.63})$$

Если принять за масштаб температуры T^* температуру зажигания (другими словами $\theta = 0$), тогда выражение (Б.63) преобразуется к виду:

$$\tau_{sti} = \frac{\pi \cdot \theta_0^2}{4(Bi \cdot \theta_e + Ki)^2} \quad (\text{Б.64})$$

Используя формулу (Б.64) можно определить момент времени начала термохимического реагирования углерода кокса с окислителем. Однако в уравнение (Б.63) неизвестной является температура зажигания (T_{ign}). Подставляя условие (Б.64) в уравнение (Б.63) получим выражение для расчёта T_{ign} :

$$\frac{\pi}{2} \cdot \frac{|\theta_{ign}|}{(Bi \cdot \theta_g + Ki)} \cdot \left(1 + \frac{|\theta_{ign}| \cdot Bi}{Bi \cdot \theta_g + Ki} \right) = Bi \cdot (\theta_g - \theta_0) + Ki \quad (\text{Б.65})$$

Из решения, полученного О.М. Тодесом, известно [530], что период индукции t_{ind} можно определить по формуле:

$$t_{ind} = 1 + 2 \cdot \beta \quad (\text{Б.66})$$

Тогда полное время задержки зажигания t_{ign} рассчитывается по формуле:

$$t_{ign} = t_{hf} + t_{ewf} + t_{sti} + t_{ind} \quad (\text{Б.67})$$

Приложение В. Методы решения

Аппроксимация уравнений энергии

Сформулированная задача математической физики решена методом конечных разностей. Аппроксимация двумерных уравнений теплопроводности, диффузии и пьезопроводности проводилась локально – одномерным методом А.А. Самарского с использованием неявной четырехточечной разностной схемы (Рисунок В.1). Аппроксимация уравнения для функции тока проводилась в соответствии с шеститочечной разностной схемой. Аппроксимация конвективных членов выполнена в соответствии с монотонной разностной схеме А.А. Самарского. Например, уравнение (6.1.1) было аппроксимировано следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \bar{C} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \bar{C} \frac{\text{Re}_{gm} \text{Pr}_{gm}}{\text{Dar}} \left(\frac{\partial H}{\partial \xi_x} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} + \frac{\partial H}{\partial \xi_y} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) O(\xi_{eva}) = \frac{K_a^m R_K^2}{Fk} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_x} \left((\Lambda_m + N_{rc}) \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_y} \left((\Lambda_m + N_{rc}) \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y} \right) \right] - \\
 & \frac{Ku \cdot \Delta(\xi_{eva})}{\Omega^\theta} \frac{d\xi_{eva}}{d\tau} + \left\{ \sum_j^{m_1} K_j^{td} (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta\gamma_j}{1+\beta\theta}\right) + \sum_{j=1}^m \left[K_j^{get} \exp\left(\frac{\theta\gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \right] + \sum_{j=1}^m \left[K_j^{gf} \exp\left(\frac{\theta\gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \prod_{k=1}^s Y_j \right] \right\} O(\xi) \\
 & \bar{C} \frac{\theta^{n+1/2} - \theta^n}{\tau} - \bar{C} \frac{\text{Re}_{gm} \text{Pr}_{gm}}{\text{Dar}} \left[\frac{H_{i+1,j}^n - H_{i,j}^n}{h_x} \frac{\theta_{i+1,j}^{n+1/2} - \theta_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x} - \left| \frac{H_{i+1,j}^{n+1/2} - H_{i,j}^{n+1/2}}{h_x} \right| \frac{\theta_{i+1,j}^{n+1/2} - 2\theta_{i,j}^{n+1/2} + \theta_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x} \right] O(\xi_{eva}) = \\
 & = \frac{1}{h_x^2} \frac{K_a^m R_K^2}{Fk} \left(1 + \left| \frac{H_{i+1,j}^n - H_{i,j}^n}{h_x} \right| \frac{h_x}{2} \right)^{-1} \left[(\Lambda_m + N_{rc})_{i+1/2} (\theta_{i+1,j}^{n+1/2} - \theta_{i,j}^{n+1/2}) - (\Lambda_m + N_{rc})_{i-1/2} (\theta_{i+1,j}^{n+1/2} - \theta_{i-1,j}^{n+1/2}) \right] - \\
 & - \frac{Ku}{2\Omega^\theta} \int_{\xi_x - \frac{1}{2}}^{\xi_x + \frac{1}{2}} \left(\frac{\xi_{i,j}^{n+1/2} - \xi_{i,j}^{n+1/2}}{\tau} \Delta(\xi_{eva}) \right) d\xi_x + 0.5 \left\{ \int_{\xi_x - \frac{1}{2}}^{\xi_x + \frac{1}{2}} \left(\sum_j^{m_1} K_j^{td} (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta\gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \right) d\xi_x + \right. \\
 & \left. + \int_{\xi_x - \frac{1}{2}}^{\xi_x + \frac{1}{2}} \left(\sum_{j=1}^m \left[K_j^{get} \exp\left(\frac{\theta\gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \right] \right) d\xi_x + \int_{\xi_x - \frac{1}{2}}^{\xi_x + \frac{1}{2}} \left(\sum_{j=1}^m \left[K_j^{gf} \exp\left(\frac{\theta\gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \prod_{k=1}^s Y_j \right] \right) d\xi_x \right\} O(\xi) \\
 & \bar{C} \frac{\theta^{n+1} - \theta^{n+1/2}}{\tau} - \bar{C} \frac{\text{Re}_{gm} \text{Pr}_{gm}}{\text{Dar}} \left[\frac{H_{i,j+1}^{n+1/2} - H_{i,j}^{n+1/2}}{h_y} \frac{\theta_{i,j+1}^{n+1} - \theta_{i,j-1}^{n+1}}{2h_y} - \left| \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j}^{n+1/2}}{h_y} \right| \frac{\theta_{i,j+1}^{n+1} - 2\theta_{i,j}^{n+1} + \theta_{i-1,j}^{n+1}}{2h_y} \right] O(\xi_{eva}) = \\
 & = \frac{1}{h_y^2} \frac{K_a^m R_K^2}{Fk} \left(1 + \left| \frac{H_{i,j}^{n+1/2} - H_{i,j}^{n+1/2}}{h_y} \right| \frac{h_y}{2} \right)^{-1} \left[(\Lambda_m + N_{rc})_{j+1/2} (\theta_{i,j+1}^{n+1} - \theta_{i,j}^{n+1}) - (\Lambda_m + N_{rc})_{j-1/2} (\theta_{i,j+1}^{n+1} - \theta_{i,j-1}^{n+1}) \right] - \\
 & - \frac{Ku}{2\Omega^\theta} \int_{\xi_y - \frac{1}{2}}^{\xi_y + \frac{1}{2}} \left(\frac{\xi_{i,j}^{n+1} - \xi_{i,j}^{n+1}}{\tau} \Delta(\xi_{eva}) \right) d\xi_y + 0.5 \left\{ \int_{\xi_y - \frac{1}{2}}^{\xi_y + \frac{1}{2}} \left(\sum_j^{m_1} K_j^{td} (1-\eta) \exp\left(\frac{\theta\gamma_j}{1+\beta\theta}\right) \right) d\xi_y + \right.
 \end{aligned}$$

$$+ \int_{\xi_y - \frac{1}{2}}^{\xi_y + \frac{1}{2}} \left(\sum_{j=1}^m \left[K_j^{get} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1 + \beta \theta}\right) \right] \right) d\xi_y + \int_{\xi_y - \frac{1}{2}}^{\xi_y + \frac{1}{2}} \left(\sum_{j=1}^m \left[K_j^{gf} \exp\left(\frac{\theta \gamma_j}{1 + \beta \theta}\right) \prod_{k=1}^g Y_j \right] \right) d\xi_y \left. \right\} O(\xi_{eva})$$

Где: $R_{i+1/2} = 0.5 \cdot (R_i + R_{i+1})$; $R_{i-1/2} = 0.5 \cdot (R_i + R_{i-1})$.

$\Lambda_{i+1/2} = 0.5 \cdot (\Lambda_i + \Lambda_{i+1})$; $\Lambda_{i-1/2} = 0.5 \cdot (\Lambda_i + \Lambda_{i-1})$.

Уравнения движения, диффузии и пьезопроводности, а также граничные условия аппроксимированы по аналогичной схеме. Система уравнений была решена за период времени до достижения условий, соответствующих условиям воспламенения топлива. Следует отметить, что численное моделирование процессов воспламенения топлива в условиях интенсивных фазовых превращений (в частности, испарения) является одним из наиболее сложных в теории горения. Последнее связано с тем, что испарение воды происходит в очень узкой (значительно меньшей, чем линейный размер частиц) области (фронт испарения). Причем, как правило, тепловые эффекты фазовых переходов очень велики (до 2,5 МДж/кг). В результате во влажной частице возникает внутренний локальный теплоотвод. Численные исследования усложняются тем, что асимптотическое поведение процессов испарения и воспламенения существенно различается (воспламенение – быстротечный процесс, испарение значительно медленнее). Соответственно, для решения поставленной задачи разработан алгоритм на основе метода сквозного счета с использованием схемы Самарского – Моисеенко с квазинявным выделением фронта фазовых трансформаций [145].

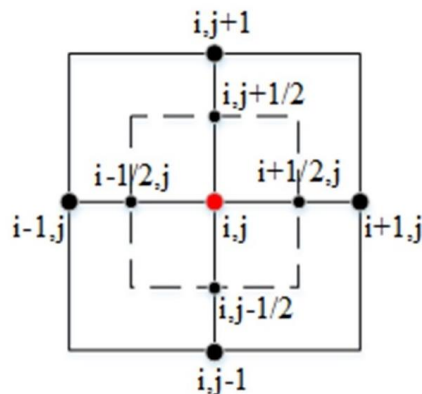


Рисунок В.1 — Схема аппроксимации

Решение задачи влагоудаления

Решение задачи воспламенения является существенно нелинейной. Это связано с нелинейными эффектами (испарение внутрипоровой воды, термическое разложение, воспла-

менение летучих). При решении системы разностных уравнений использовался метод итераций с использованием метода релаксации на каждой итерации. В этом случае скорость фронта фазового перехода (V_F), массовая скорость испарения (W_{eva}) и температура поверхности фронта испарения ($T(R_{eva}, t)$) связаны явно. Для решения задачи определения скорости испарения и расчета координат поверхности системы «водонасыщенное топливо – сухой угольный скелет» был разработан гибридный алгоритм, основанный на комбинации метода неявного выделения фронта фазового перехода, теории перколяции и метод Монте – Карло. Последний основан на итерационной процедуре, основанной на сквозном счете с методом релаксации с учетом разрывных коэффициентов и разделении границы раздела между водонасыщенной и сухой зонами сухого углеродистого каркаса топливной частицы.

На первом этапе были проведены расчеты, в результате которых были рассчитаны значения температуры. После этого рассчитывалась массовая скорость испарения (по формуле (В.2)) в узлах разностной сетки, соответствующих фронту фазового перехода. Координаты фронта фазового перехода рассчитывались методом перколяции в сочетании с методом Монте – Карло. Кластеризация расчетных ячеек проводилась по алгоритму Хошена – Копельмана (Рисунок В.2). Для насыщенных водой ячеек предполагалось, что значение параметра составляет $O(\xi) = 0$, а для сухих ячеек $O(\xi) = 1$. Расчет проводился по следующей схеме: с использованием генератора случайных чисел выбиралась ячейка разностной сетки. После этого была проведена проверка на содержание влаги в топливной зоне, соответствующей этой ячейке. Если влаги не было, то параметру $O(\xi)$ было присвоено значение 1 для этой ячейки, иначе 0. Если $O(\xi) = 0$, то вокруг этой ячейки проводился «обход» с выбором соседних ячеек, для которых значение $O(\xi) = 1$. После этого рассчитывали массовую скорость испарения (по формуле В.2) и, соответственно, массу испаряемой влаги (по формуле В.1):

$$M_{i,j} = \int_0^{\tau} \left(\iiint_0^V W_{eva} F_{i,j} O(\xi) dV \right) d\tau \quad (B.1)$$

$$W_{eva} = \frac{A(P_s - P|_{x+0})}{\sqrt{2\pi mRT}} \quad (B.2)$$

Если выполнялись условия:

$$M_{i,j} = \begin{cases} \geq M_{wat}, \Rightarrow O(\xi) = 1; \\ < M_{wat}, \Rightarrow O(\xi) = 0; \end{cases}$$

Где: M_{wat} – начальная (в момент времени $t = 0$) масса воды в ячейке, кг; W_{eva} – массовая скорость испарения, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; $F_{i,j}$ – площадь зеркала испарения (принимается

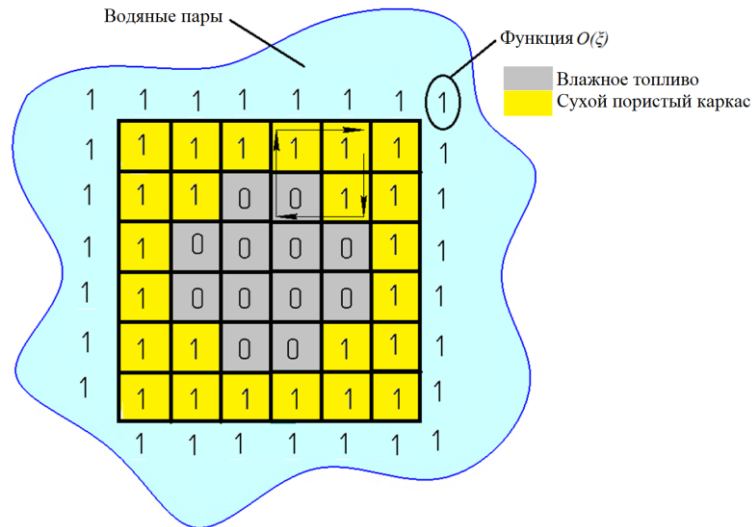


Рисунок В.2 — Схема алгоритма Хошена – Капельмана

равной площади поверхности ячейки), m^2 (Рисунок В.3). На следующем этапе были определены координаты нового положения фронта испарения. Координаты фронта испарения определялись из условия:

$$\text{grad}[O(\xi)] = 1$$

На основании результатов расчетов положения границы раздела между твердой и жидкой фазами были установлены теплофизические характеристики в каждом узле разностной сетки в соответствии с состоянием среды в этом узле (водонасыщенные или сухие части топлива). После этого расчеты были выполнены снова. Итерации выполнялись до тех пор, пока разность температур в каждом узле разностной сетки на двух последовательных итерациях не стала меньше указанной допустимой ошибки (0,001 К).

Численное моделирование проводилось на разностной сетке 601×301 . Где 601 – количество узлов (N) в направлении координатной оси «X», 301 – количество узлов в координатной оси «Y».

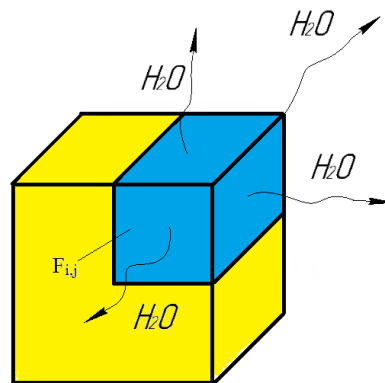


Рисунок В.3 — Схема испарения

Во время математического моделирования процесса зажигания был принят временной шаг $\tau = 1,62 \cdot 10^{-4}$. Столь малая величина временного шага обусловлена тем, что процессы воспламенения, как правило, быстросредействующие. Это особенно очевидно в период прямой реакции газообразных продуктов пиролиза и окислителя. По этой причине для определения времени задержки зажигания с допустимой ошибкой шаг по времени должен быть достаточно мал (не более 10^{-5} с в размерной форме).

Проверка математической модели проводилась путем сравнения результатов численного моделирования с экспериментом. Проверка консерватизма разностной схемы проводилась методом остаточного теплового баланса.

Решение уравнения переноса энергии излучения

Решение уравнения переноса энергии излучения проводилось S_n методом [144]. В соответствии с последним исходное уравнение переноса излучения заменяется обыкновенным дифференциальным уравнением:

$$\Omega \text{grad}(\Gamma) + h_\lambda \Gamma = \frac{h_\lambda \Gamma_{\text{eff}}}{\pi} \Rightarrow \quad (\text{B.3})$$

$$\Rightarrow \frac{d\Gamma}{dN} + h_\lambda \Gamma = \frac{h_\lambda \Gamma_{\text{eff}}}{\pi} \quad (\text{B.3}')$$

Где Ω – направление полета теплового фотона. Разобьем пространство области решения задачи разностной сеткой (Рисунок В.4). Интегрируя уравнение (1') вдоль направления Ω_1 получим следующее аппроксимационное выражение:

$$\Gamma_{i,j} = \Gamma_{i-1,j-1} \exp(-h_\lambda \Delta N_1) + \frac{h_\lambda}{\pi} \Gamma_{\text{eff}} [1 - \exp(-h_\lambda \Delta N_1)] \quad (\text{B.4})$$

Здесь $\Gamma_{i-1,j-1}$ – значение интенсивности энергии излучения в точке $(i-1, j-1)$, N_1 – длина отрезка характеристики. Для направления Ω_2 уравнение (1') интегрируется аналогично (B.4) и примет следующий вид:

$$\Gamma_{i,j} = \Gamma_{i+1,j+1} \exp(-h_\lambda \Delta N_2) + \frac{h_\lambda}{\pi} \Gamma_{\text{eff}} [1 - \exp(-h_\lambda \Delta N_2)] \quad (\text{B.5})$$

Соответствующим образом уравнение (1) аппроксимируется в других направлениях. Интенсивность излучения в точке (i,j) вычисляется интегрированием интенсивностей энергии излучения по всем направлениям:

$$\Gamma_{i,j} = \oint \Gamma d\Omega$$

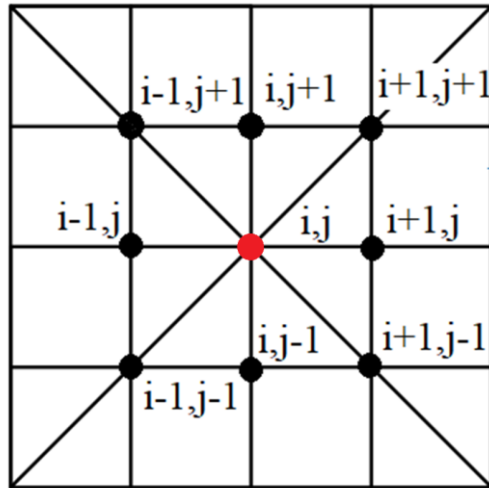


Рисунок В.4 — Схема решения двумерного уравнения переноса энергии излучения S_n – методом

Приложение Г. 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 координата) направлении, м/с;

v — скорость движения смеси водяных паров и газообразных продуктов пиролиза в порах в азимутальном (в направлении оси y – в декартовой системе координата) 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);

$\chi = K_p/(\omega\beta l_0)$ – коэффициент пьзопроводности, 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 жидкост, Па⁻¹;

I_R – интенсивность излучения, Вт/м²;

$t_a = \frac{RT^2}{E^*} \frac{c^*}{Q^*k^*} \exp\left(\frac{E}{RT}\right)$ — 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 (модель в разделе б.1 – 6.2)

$\tau = t/t^*$ — время;

$\tau = t/t_a$ — время (модель в разделе б.1 – 6.2);

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 (модель в разделе б.1 – 6.2);

$\xi_y = y/x_a$ — координата оси y (модель в разделе б.1 – 6.2);

$\Pi = m/m^*$ — 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 (c_i — для модели приведенной в 2.6; ζ_i — модель в параграфе 3.5; ζ_i — модель в параграфах 5.1, 6.1 – 6.2) — массовая концентрация i -го компонента газовой смеси;

$\Psi(\xi) = O(\xi)$ — функция Хевисайда;

Ψ — функция тока (в уравнениях 5.1.5);

$\delta(\xi) = \Delta(\xi)$ — функция Дирака;

Ω — направление полета фотона.

Ω — функция тока (в уравнениях 5.1.6);

$\gamma_i = \frac{T - G_i \dot{T}}{T - \dot{T}}$; — безразмерный параметр;

$G_i = \frac{E_i}{E}$ — безразмерная энергия активации;

$\hbar = a_p x_a$ — характерная оптическая толщина;

$$R_K = L/x_a$$

Безразмерные комплексы и критерии:

$$Arr = \frac{E}{RT} - \text{критерий Аррениуса};$$

$$\Upsilon = \frac{\omega u^*}{p^* r^*} - \text{параметр торможения};$$

$$\Upsilon = \frac{k_i \rho_i RT^2}{k^* \rho^*} \frac{c^*}{Q^* k^*} \exp[E/(RT)] - \text{безразмерный критерий выгорания (уравнение 6.1.9)}$$

$$Da = Dar = \frac{\omega r^* u^*}{K_p p^*} - \text{критерий Дарси};$$

$$Da^{III} = \frac{Q_i}{c^* \Delta T} - \text{третье число Дамкёлера};$$

$$Bo = N_R Pe - \text{критерий Больцмана};$$

$$Bo = \frac{u^* \rho^* c^* RT^2}{\sigma T_g^4} \frac{RT^2}{E} - \text{критерий Больцмана (модель в разделе б.1 – 6.2)};$$

$$Ku = \frac{Q_{eva}}{\Delta T c^*} - \text{критерий Кутателадзе};$$

$$Ki = \frac{qr^*}{\lambda \Delta T} - \text{критерий Кирпичева};$$

$$Ste = \frac{\Delta T c^*}{Q_{eva}} - \text{критерий Стефана (уравнение 4.1.1.1)};$$

$$\Omega = \frac{\rho_{wat}(r^*)^3}{a^* st^* \rho^*} - \text{безразмерный параметр уравнения 4.1.1.1};$$

$$K_{td} = kt^* - \text{постоянная процесса термического разложения};$$

$$K_\lambda = \frac{\lambda_g}{\lambda_{wcf}} - \text{комплекс, характеризующий интенсивность перетока теплоты из пограничного}$$

слоя частицы в слой топлива.

$$K_a = \frac{a_g}{a_{wcf}} - \text{симплекс нестационарности для уравнений энергии};$$

$$K_H = \frac{\chi_c}{\chi_w} - \text{симплекс нестационарности для уравнений пьзопроводности};$$

$$K_D = \frac{d_i^{ip}}{d_i} - \text{симплекс нестационарности для уравнений диффузии};$$

$$K_j^n = \frac{Q \rho k}{Q^* \rho^* k^*} - \text{симплекс тепловой мощности};$$

$$Fo = \frac{a^* t^*}{(r^*)^2} - \text{критерий Фурье};$$

$$Fo_H = \frac{\chi t^*}{m(r^*)^2} - \text{аналог критерия Фурье в уравнении пьзопроводности};$$

$$Fo^{dif} = \frac{a_i^{dif} t^*}{(L)^2} - \text{диффузионный критерий Фурье};$$

$$Fk = \frac{Q^* \rho^* k^*}{\lambda^*} \frac{E}{RT^2} L^2 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) — \text{число Франк – Каменецкого};$$

$$Pe = \frac{u^* r^*}{a^*} — \text{критерий Пекле};$$

$$Po = \frac{Q_i W_i (r^*)^2}{\lambda^* \Delta T} = \frac{Q_i k_i \rho (r^*)^2}{\lambda^* \Delta T} — \text{критерий Померанцева для } i — \text{ой химической реакции};$$

$$Po_i^H = \frac{W_i (r^*)^2 \omega}{\rho_{gm} p^* K_p^*} = \frac{k_i \rho (r^*)^2 \omega}{\rho_{gm} p^* K_p^*} — \text{аналог критерия Померанцева (уравнение пьзопроводности)}$$

для химических реакций (термическое разложение, взаимодействие водяных паров и углерода кокса);

$$Po_{eva}^i = \frac{W_{eva} (r^*)^2 \omega}{s \rho_{gm} p^* K_p^*} — \text{аналог критерия Померанцева (уравнение пьзопроводности) для процесса испарения};$$

$$Po_i^{dif} = \frac{W_i (r^*)^2}{\rho_g d^*} = \frac{k_i \rho (r^*)^2}{\rho_g d^*} — \text{аналог критерия Померанцева (уравнение диффузии)};$$

$$Ki_{C+O_2} = \frac{Q_{C+O_2} W_{C+O_2} r^*}{\lambda^* \Delta T} — \text{критерий Кирпичева для реакции горения углерода};$$

$$Ki = \frac{E}{RT^2} \frac{x_a}{\lambda} \varepsilon I_R — \text{критерий Кирпичева в параграфе 6.1 – 6.2};$$

$$Sk(\theta) = \frac{\varepsilon(T) \sigma \Delta T^3}{\lambda^*} — \text{критерий Старка};$$

$$Sh = \frac{L}{\tau^* u^*} — \text{число Струхала};$$

$$Re = \frac{U^* L}{\nu} — \text{число Рейнольдса};$$

$$Ri = \frac{g L \beta_{sp} \Delta T g}{\nu^2} — \text{число Ричардсона};$$

$$N_R = \frac{\sigma T^4 r^*}{\lambda^*} — \text{радиационно – кондуктивный параметр (для газовой среды)};$$

$$N_R = \frac{\sigma T_g^4 x_a}{\lambda^*} \frac{E}{RT^2} — \text{радиационно – кондуктивный параметр (для газовой среды, уравнение 6.1.2)};$$

$$N_{rc} = \frac{13.5 \sigma T^3 s}{\varepsilon \lambda^*} — \text{радиационно – кондуктивный параметр (для внутрипорвой структуры}$$

топлива);

$$N = \frac{\rho^* u^* r^*}{d^* \rho_g};$$

$$\zeta = \frac{(r^*)^2}{K_p};$$

$$\Gamma = \frac{\lambda_s L^2}{\lambda^* S^2};$$

$$\Omega^\theta = \frac{\Delta T_g \rho_c a_c s t^*}{\Delta T_{eva} \rho_w L^3};$$

$$\Omega^H = \frac{(r^*)^2}{su^* t^*};$$

$$\Omega^H = \frac{sm\beta\upsilon u^*}{K_p} \text{ – в параграфах 6.1 – 6.2}$$

$$\Omega^\theta = \frac{RT^2 \rho_c s}{\Delta T_{eva} E \rho_w x_a} \text{ – в параграфах 6.1 – 6.2}$$

$$B^H = \frac{a_c \rho_c}{\rho_w u^* L}$$

$$B^H = \frac{K_p}{\rho_w u^* t \upsilon x_a} \frac{k_i \rho_i c^*}{Q^* k^*} \frac{RT^2}{E} \text{ – в параграфах 6.1 – 6.2.}$$

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»;

ewf – испарение пленки воды;

etd – окончание процесса термического разложения;

ign – зажигание;

oxy – окислитель (воздух);

sur – поверхность

td – процесс термического разложения;

bio – биомасса;

wat – вода.

Верхний индекс: * — масштаб.

Приложение Д. Свидетельства о регистрации программ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016616180

**Расчет минимальных температур окислителя для
устойчивого зажигания водоугольных и
органоводоугольных топлив**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» (RU)*

Авторы: *Сыродой Семен Владимирович (RU),
Стрижак Павел Александрович (RU)*

Заявка № 2016613718

Дата поступления 18 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 07 июня 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016616283

**Расчет времени задержки зажигания одиночных капель
органоводоугольных топлив с внешней пленкой воды при
стоке тепла на спай термопары**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» (RU)*

Авторы: *Сыродой Семен Владимирович (RU),
Стрижак Павел Александрович (RU)*

Заявка № 2016613724

Дата поступления 18 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 июня 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016616284

**Расчет распределения температуры в капле
органоводоугольного топлива в процессе нагрева в среде
окислителя**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» (RU)*

Авторы: *Сыродой Семен Владимирович (RU),
Стрижак Павел Александрович (RU)*

Заявка № 2016613723

Дата поступления 18 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 июня 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017618877

**Оценка влияния скорости фазовых превращений и
термического разложения на характеристики зажигания
капли композиционного топлива**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» (RU)*

Авторы: *Сыродой Семен Владимирович (RU), Кузнецов Гений
Владимирович (RU), Глушков Дмитрий Олегович (RU)*

Заявка № 2017615758

Дата поступления 19 июня 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 августа 2017 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017619188

**Изучение движения фронтов фазовых переходов при
зажигании капли композиционного топлива**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» (RU)*

Авторы: *Сыродой Семен Владимирович (RU), Кузнецов Гений
Владимирович (RU), Глушков Дмитрий Олегович (RU)*

Заявка № 2017615760

Дата поступления 19 июня 2017 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 16 августа 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021661622

**Расчет характеристик и условий зажигания капель
водоугольного топлива в условиях высоких температур
и давлений окислителя**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (RU)*

Авторы: *Сыродой Семен Владимирович (RU), Малышев
Дмитрий Юрьевич (RU)*

Заявка № 2021660874

Дата поступления 12 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 14 июля 2021 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFB5C00B1A5CF59A40A2F08092E9A118
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021661779

Расчет времени задержки зажигания частиц влажной
древесной биомассы

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (RU)*

Автор(ы): *Сыродой Семен Владимирович (RU)*

Заявка № 2021660890

Дата поступления 09 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 июля 2021 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02245CFB5C00B1A5CF59A40A2F08092E9A118
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021661794

**Программа по анализу интенсивности образования
антропогенных оксидов азота при сжигании древесно-
угольных топливных смесей**

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (RU)**

Авторы: **Сыродой Семен Владимирович (RU), Нигай
Наталья Андреевна (RU)**

Заявка № 2021660697

Дата поступления 09 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 июля 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFB5C00B1A5CF59A40A2F08092E9A118
Владелец Ивлиев Григорий Петрович
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021661959

**Программа по анализу интенсивности образования
антропогенных оксидов серы при сжигании древесно-
угольных топливных смесей**

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (RU)**

Авторы: **Сыродой Семен Владимирович (RU), Нигай
Наталья Андреевна (RU)**

Заявка № 2021660813

Дата поступления 09 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 июля 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFB5C00B1A5CF59A40A2F08092E9A118
Владелец Ивлиев Григорий Петрович
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021662566

**Программа по оценке влияния расстояния между
частицами древесины и угля на характеристики их
совместного воспламенения**

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (RU)**

Авторы: **Сыродой Семен Владимирович (RU), Косторева
Жанна Андреевна (RU)**

Заявка № 2021661649

Дата поступления 26 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 августа 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFB5C00B1A5CF59A40A2F08092E9A118
Владелец Ивлиев Григорий Петрович
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021662592

**Программа по расчёту времен задержки зажигания
частиц многокомпонентных топлив.**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (RU)*

Авторы: *Сыродой Семен Владимирович (RU), Пурин Михаил
Владимирович (RU)*

Заявка № 2021661635

Дата поступления 26 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 августа 2021 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02245CFB5C00B1A5CF59A40A2F08092E9A118
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

Приложение Е. Справки и акты внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «ФНПЦ «Алтай»

В.В. Певченко

2021г.



АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы
Сыродя Семена Владимировича**

Настоящий акт свидетельствует, что результаты научно-исследовательской деятельности Сыродя Семена Владимировича используются при прогнозировании режимов работы газогенерирующих установок, работающих на композиционном топливе применительно к задачам нефте- и газодобывающей промышленности.

Разработанные физические и математические модели, описывающие основные процессы тепло- и массопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений в период зажигания топливных частиц, представляют интерес для прогнозирования процессов горения топливных композитов. Полученные результаты научно-исследовательской деятельности (в виде графиков и таблиц) могут быть рассмотрены как при проектировании новых, так и при реконструкции или расширении действующих газогенераторных станций.

Зам.генерального
директора по науке

Начальник отдела 10

Начальник отдела 50

Р.Г. Никитин

С.А. Зяблицкий

С.А. Рябков



**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НПО МАЛАЯ ГЕНЕРАЦИЯ»**

пр-т Кирова, д. 36, оф. 525, г. Томск, Томская обл., 634041
+7 (383) 375-45-00, +7 (3822) 977-808,
info@smallgeneration.ru, smallgeneration.ru
ИНН/КПП 7017094761/701701001, ОГРН 1047000134543

АКТ

о внедрение результатов научно-исследовательской деятельности Сыродоя
Семена Владимировича (Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, г.Томск)

Настоящим актом подтверждается, что программный комплекс «Расчет характеристик и условий зажигания капель водоугольного топлива в условиях высоких температур и давлений» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021661622 от 14.07.2021, авторы Сыродой Семен Владимирович, Малышев Дмитрий Юрьевич, Национальный исследовательский Томский политехнический университет) был использован и внедрен ООО «НПО МАЛАЯ ГЕНЕРАЦИЯ» при проведении опытно-конструкторских работ в рамках разработки горелочного устройства для сжигания водоугольного топлива.

Главный инженер
ООО «НПО Малая генерация»



Д.В. Ошлыков
23.09.2021

А.В.Ошлыков

Директор
ООО «НПО Малая генерация»

В.Г. Вольхин
23.09.2021

В.Г. Вольхин