

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Егоров Роман Игоревич

**ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ
И НИЗКОКАЛОРИЙНЫХ ТОПЛИВ ПРИ НАГРЕВЕ
СВЕТОВЫМ ПОТОКОМ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Томск – 2023

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

- Научный консультант:** **Стрижак Павел Александрович**
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
НОЦ И.Н. Бутакова, профессор.
- Официальные оппоненты:** **Кичатов Борис Викторович**
доктор технических наук, ФГБУН Физический институт
имени П.Н. Лебедева Российской академии наук
(г. Москва), лаборатория активных коллоидных систем,
высококвалифицированный ведущий научный
сотрудник.
- Палецкий Александр Анатольевич**
доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт
химической кинетики и горения имени В.В. Воевод-
ского Сибирского отделения Российской академии наук
(г. Новосибирск), лаборатория кинетики процессов
горения, ведущий научный сотрудник.
- Тугов Андрей Николаевич**
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Крас-
ного Знамени теплотехнический научно-исследова-
тельский институт» (г. Москва), отделение парогенераторов
и топочных устройств, заведующий отделением.

Защита диссертации состоится «19» октября 2023 года в 14:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.06 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, Россия, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.



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

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.06
доктор технических наук, доцент



Д.О. Глушков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема использования отходов углеобогащения и низкокалорийных ископаемых топлив (НИТ) в качестве энергетических ресурсов представляет интерес в связи с удорожанием традиционных энергоносителей, энергетическими кризисами и геополитическими конфликтами. На протяжении многих десятилетий разработки угольных месторождений в отвалах накоплены сотни миллионов тонн мелкодисперсных горючих отходов обогащения углей. Эти отходы характеризуются широкой доступностью, высокой зольностью (до 50–60 мас.%), низкими по сравнению с угольным концентратом теплотой сгорания и реакционной способностью. Отвалы занимают значительные территории, служат источником пылеобразования, представляют объекты повышенной пожарной опасности вследствие горючести пыли и высокого содержания в отходах высокомолекулярных углеводородов (до 30 мас.%), которые при солнечном нагреве выделяют легко воспламеняемые летучие вещества (в первую очередь, метан). Разработка эффективных методов утилизации таких отходов позволит существенно улучшить экологическую обстановку в угледобывающих регионах, а также даст промышленности дополнительное сырье, способное выступить в качестве промышленного топлива и удовлетворить потребности химической промышленности в исходных компонентах для синтеза высокомолекулярных соединений. Твердые НИТ (бурый уголь, торф) обладают рядом свойств, близким к свойствам отходов углеобогащения (пониженная теплотворная способность, высокая зольность), что также позволит применить разработанные подходы для расширения использования таких топлив в промышленности.

Попытки использования фильтр-кеков, шламов и прочих углеродсодержащих отходов, а также торфов и бурых углей в промышленном производстве тепловой энергии предпринимаются в течение длительного периода времени. Во второй половине XX в. выделены основные факторы, сдерживающие эффективное сжигание таких отходов. Показано, что данный тип топлива характеризуется высокими временами задержки зажигания и низ-

кой калорийностью, из-за чего попытки его массового использования сопряжены с высокими капитальными затратами на модификацию топочных агрегатов. В последние годы выделенная проблема набирает актуальность в связи с исчерпанием угольных месторождений в странах Европы, Китае и России. Сжигание отходов углеобогащения и низкокалорийных топлив в виде водоугольных смесей (ВУС) позволяет улучшить экологические показатели процесса горения вместе с повышением эксплуатационных характеристик процессов хранения и транспортировки топлива. Горение таких смесей достаточно полно исследовано в области пониженных температур (до 700 °С). Наиболее эффективный (с учетом довольно низкой реакционной способности смесей) высокотемпературный режим рассмотрен недостаточно глубоко вследствие необходимости дополнительных затрат на разогрев топлива (совместное сжигание с высокосортным топливом, применение плазменных горелок и кислородного дутья). Методы термохимической переработки (пиролиз, газификация) с применением традиционных автотермических технологий также не получили широкого распространения из-за низкой калорийности топлива, не позволяющей конвертировать значительную массу за счет сжигания малой порции. Таким образом, пока не сформированы обоснованные представления о том, какие физические механизмы наиболее эффективны при использовании низкокалорийного топлива в энергетике. С точки зрения энергетики целесообразно повысить параметры смесей на основе отходов углеобогащения, торфа и бурого угля к показателям традиционных топлив. Ранее исследованные подходы (например, при низкотемпературном сжигании) не дают такой возможности. С другой стороны, использование сторонних источников энергии (или специальных примесей) для ускорения химических реакций в топливе на разных этапах горения смесей, приготовленных из низкокалорийного горючего, является задачей многопараметрической и требует детального исследования как с точки зрения энергетики, так и с позиций экологии. Известные попытки использования аллотермических процессов для переработки углеродсодержащего сырья с низкой теплотой сгорания в промышленно применимое состояние также далеки от масштабного практического применения. Они показывают,

что наиболее перспективным путем переработки отходов с помощью сторонних источников тепла является использование экстремального нагрева, позволяющего получать генераторный газ с максимальной калорийностью наравне с высокой производительностью таких систем.

Степень проработанности темы исследования. Проблема утилизации отходов углеобогащения в приложении к мелкодисперсным отходам (шламы, фильтр-кеки), а также порошкам НИТ решается как в разрезе непосредственного их сжигания (в сухом и влажном виде), так и при их использовании в составе смесевых водоугольных топлив с добавлением отработанных нефтепродуктов. Применение методов термохимической переработки (газификация в плотном слое, фильтрационное горение) выделило проблемы, требующие переосмысления ранее созданных подходов, а использование методик сжигания в мощном световом потоке по аналогии с углями показало необходимые пределы интенсивностей светового потока, обеспечивающие наиболее полное выгорание углерода. Использование упомянутых методов позволило понять важные особенности горения таких топлив. Основной проблемой при непосредственном сжигании является необходимость предварительного прогрева топочных агрегатов до температур, обеспечивающих устойчивое зажигание ВУС. При этом более эффективные смеси, содержащие нефтепродукты, демонстрируют ухудшение экологических показателей. Освоенные промышленностью термохимические методы применимы к достаточно калорийным композициям, а использование непосредственно лазерного поджига является достаточно проблематичным для высокозольных материалов.

Значительный прогресс в разработке экспериментальных методов сжигания отходов углеобогащения, достигнутый в начале XXI в. группой профессоров Кузнецова Г.В., Стрижака П.А. на базе в ТПУ (г. Томск), прояснил основные моменты, связанные с зажиганием разных видов ВУС при использовании схем с доминированием радиационного или конвективного нагрева. Работы группы профессора Мальцева Л.И. по экспериментальному исследованию горения ВУС, а также профессоров Кузнецова Г.В., Салома-

това В.В., а также доц. Сыродоя С.В. по моделированию зажигания и горения низкорекреационных топлив (Томский политехнический университет, г. Томск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск) показали перспективные пути к практическому применению ВУС в народном хозяйстве. Определенные методики снижения выбросов при утилизации отходов углеобогащения разработаны в Санкт-Петербургском горном университете. Экологические аспекты применения отходов углеобогащения и НИТ исследовались на крупномасштабных установках под руководством профессора Мурко В.И. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк). Исследования зажигания и горения углей под действием лазерного излучения являются одним из основных направлений исследований в группе профессора Адуева Б.П. (Институт углехимии и химического материаловедения ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово). Пока не установлены закономерности инициирования горения ВУС на основе низкокалорийных топлив (в том числе и отходов) с применением безуглеродных примесей. Соответствующий подход считается перспективным, с точки зрения снижения выбросов оксидов углерода в атмосферу. Воздействие лазерного излучения преимущественно рассматривается, с точки зрения непосредственного нагрева и зажигания топлива, игнорируя возможность его применения для микрофрагментации топлива, позволяющей существенно ускорить зажигание в камерах сгорания. Применение мощного светового потока для реализации аллотермических процессов термохимической переработки отходов в условиях экстремального нагрева требует дополнительных исследований. Основные закономерности окисления топлив с низкой реакционной способностью при высоких температурах исследованы недостаточно полно, что делает актуальным поиск оптимальных режимов конверсии и эффективных составов смесей. Математическое моделирование окисления НИТ в условиях экстремального нагрева позволит установить характеристики аллотермических процессов, использующих мощные тепловые потоки, в сравнении с традиционными подходами, основанными на нагреве за счет сгорания топлива.

Постановка задачи исследований. Известные методы утилизации мелкодисперсных отходов углеобогащения, а также применения НИТ, в основном опираются на существенный научно-технический задел по их сжиганию в составе суспензий, а также смесей с другими углеродсодержащими отходами (отработанные нефтепродукты и нефтяные шламы). Несмотря на некоторый прогресс в развитии технологий сжигания таких топлив, проблемы, связанные с высокими значениями выбросов углекислого газа, не могут быть решены с использованием вышеперечисленных органических добавок. С другой стороны, переработка с помощью ранее освоенных автормических методов термохимической конверсии ограничена в силу недостаточной удельной теплотворной способности НИТ и требует поиска путей дополнительной интенсификации нагрева.

Как следствие, целесообразно изучить возможность использования отходов углеобогащения, близких им по совокупности свойств топлив (как сжиганием, так и в ходе термохимической конверсии), с задействованием сторонних источников тепла (в виде высокотемпературных неорганических включений в объеме топлива или потоков излучения, приходящих извне). Известные наработки по применению лазерного излучения для инициации и поддержания горения углей базируются на прямом нагреве частиц топлива излучением, игнорируя возможность непрямого воздействия излучения на горение топлива (лазерная микро-фрагментация порций топлива на входе в топку и др.).

Мотивация к написанию данной диссертационной работы опирается на необходимость изучения особенностей физических механизмов и основных закономерностей процессов, протекающих при термическом воздействии на мелкодисперсные топливные суспензии в условиях экстремального нагрева с применением сторонних источников тепла или неорганических горючих примесей, а также оценки влияния внешних условий на протекание процессов разложения и окисления горючего, а также на химический состав газообразных продуктов.

Целью работы является разработка научных основ термохимической утилизации отходов углеобогащения и низкокалорийных ископаемых твердых топлив при интенсивном нагреве на базе результатов экспериментальных исследований и численного моделирования физико-химических процессов их термического разложения и горения.

Основной интерес представляет определение характеристик зажигания (времена задержки зажигания в различных условиях), горения (температуры, длительности горения и состав газообразных продуктов сгорания) и пиролиза (температурные режимы и состав газообразных продуктов) влажных мелкодисперсных суспензий отходов обогащения каменных углей и НИТ в условиях воздействия мощных тепловых потоков от сторонних источников (неорганические горючие включения, радиационный нагрев высокой интенсивности) в экспериментальных исследованиях. На базе экспериментальных данных важно разработать математическая модель для изучения характеристик термохимических превращений, протекающих в слое топлива под действием интенсивного нагрева за счет мощного потока излучения от стороннего источника

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка нового подхода к изучению термохимической утилизации отходов углеобогащения и низкокалорийных ископаемых твердых топлив при интенсивном нагреве под воздействием потока лазерного излучения (процессы распыления смесей из отходов углеобогащения, пиролиза, зажигания и горения).

2. Установление фундаментальных закономерностей процессов зажигания и горения топливных смесей с примесями порошков металлов и известняка, а также определение влияния таких примесей на режим горения и состав газообразных выбросов.

3. Анализ динамических характеристик и закономерностей протекания аллотермического процесса разложения топливных смесей из отходов углеобогащения под действием мощного светового потока, определение граничных условий этого процесса, состава газообразных продуктов и возможных режимов.

4. Определение характеристик термического разложения смесей из низкокалорийных ископаемых топлив под действием светового нагрева в сравнении с аналогичными параметрами протекания процесса термохимической переработки отходов обогащения каменных углей.

5. Разработка математической модели термического разложения смесей из отходов углеобогащения под действием радиационного нагрева на основе полученных экспериментальных данных, исследование динамики процессов окисления углерода, а также ряда значимых факторов, которые не могут быть определены при прямых измерениях.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработан подход (включает фундаментальные основы методики исследований, основные зависимости, границы применимости, методология оценки затрат энергии) к детальному изучению закономерностей и характеристик физико-химических процессов при аллотермическом разложении топливных смесей, приготовленных из отходов углеобогащения, а также НИТ, под действием интенсивного потока света.

2. Определен высокий потенциал практического применения неорганических примесей для улучшения свойств топливных смесей, приготовленных из отходов. Обоснован значительный положительный экологический эффект добавления к топливным смесям частиц алюминия, железа и меди, а также известняка. Установлены закономерности зажигания и горения ВУС с неорганическими примесями.

3. Получены уникальные данные и новые представления о физике горения и основных закономерностях протекания термохимических процессов в низкокалорийных ископаемых топливах под действием тепловых потоков, значительно отличающиеся от протекающих процессов при их сжигании в камерах энергетических установок и реакторах (более 300 Вт/см²).

4. Получены новые данные об основных закономерностях процесса взаимодействия лазерного излучения с жидкими отходами обогащения углей в ходе распыления смесей из отходов углеобогащения с использованием лазерных импульсов. Оценен потенциал и границы применимости лазерного распыления к задаче зажигания топливных смесей.

5. Сформированы новые знания о закономерностях протекания термического разложения топливных смесей из отходов по результатам математического моделирования и экспериментальных исследований.

Теоретическая значимость работы. Созданы научные основы теории прогноза закономерностей и характеристик физико-химических процессов при синтезе компонентов генераторного газа из влажных отходов обогащения углей и низкокалорийных ископаемых топлив. Адаптирована физическая и математическая модели термического разложения смесей из отходов углеобогащения для случая нагрева топлива внешним источником высокой интенсивности, связывающая параметры топливной смеси, режима нагрева и состава конечных продуктов процесса.

Установлены закономерности теплопереноса в слое топлива в ходе аллотермического разложения смесей из отходов углеобогащения, а также проанализированы основные макроскопические характеристики данного процесса, которые не могут быть определены экспериментально. Показаны основные закономерности динамики газогенерации в области светового нагрева и вне неосвещенной зоны в привязке к кинетике доминирующих химических реакций, протекающих в топливе. Показаны границы применимости предложенного подхода к свето-индуцированному пиролизу отходов обогащения углей и низкокалорийных ископаемых топлив.

Практическая значимость работы. Предложенные в работе подходы, разработанные методики и выявленные закономерности позволили сформировать общие принципы переработки отходов углеобогащения и НИТ с использованием интенсивного нагрева под действием сфокусированного солнечного света, а также света от искусственных источников.

Оценка экологического и энергетического эффектов неорганических примесей в условиях зажигания и горения ВУС позволила выделить новые способы повышения эффективности использования топлив по характеристикам: температура горения, концентрации выбросов, времена задержки зажигания, предельные тепловые потоки.

Разработана математическая модель процесса свето-индуцированного пиролиза, позволяющая прогнозировать развитие газогенерации в различных условиях в зависимости от свойств топлива.

Предложенные в диссертационной работе подходы, выявленные закономерности, разработанные методики исследований (в частности методики «настольного» эксперимента) позволяют сформировать общие подходы к переработке отходов углеобогащения и НИТ с использованием сфокусированного солнечного света.

Использованные методы исследования. Для экспериментального исследования мелкодисперсной фрагментации ВУС под действием экстремального нагрева лазерными импульсами использовались панорамные оптические методы (PIV, PTV, теневая фотография). Для мониторинга температур топлива в процессе зажигания, горения и пиролиза использовались бесконтактные (тепловизор) и контактные (малоинерционные термопары) методы измерения. Для измерения времен зажигания и горения порций топлива использовалась высокоскоростная видеосъемка, проводимая параллельно с мониторингом температуры. Для анализа состава газообразных продуктов сгорания использовались оптические и электрохимические технологии газоанализа. В дополнение к указанным методам использовалось взвешивание образцов на электронных аналитических весах, исследование их свойств с помощью термогравиметрического анализа.

Для исследования ряда особенностей процесса пиролиза отходов обогащения углей под действием мощного светового потока использовалась математическая модель процесса, ключевые параметры которой определялись в ходе серии предварительных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Воздействие лазерных импульсов (80 мДж, 10 нс) на каплю суспензионного топлива, приготовленного из отходов углеобогащения, приводит к ее сверхтонкому распылению (размер фрагментов менее 100 мкм) при условии влажности приповерхностного слоя не ниже 40 мас.%. Этот эффект позволяет существенно (в 1,5–2,0 раза) снизить времена задержки зажигания капли топлива.

2. Добавление в топливную смесь менее 5 мас.% неорганических примесей (порошков алюминия, железа, известняка) ведет к повышению температур горения (более чем на 100 °С по сравнению с композиционным жидким топливом без таких добавок), а также к снижению в 2–10 раз концентраций газообразных антропогенных выбросов. Времена задержки зажигания топливных смесей без неорганических примесей и с добавлением последних сопоставимы.

3. Нагрев композиционных жидких топлив из отходов углеобогащения сфокусированным световым излучением (как непрерывным лазерным, так и некогерентным, с интенсивностями свыше 800 Вт/см²) позволяет интенсифицировать термическое разложение, обеспечивая производство синтезгаза, имеющего малое содержание негорючих компонентов. Использование наносекундных импульсов с интенсивностью около 8 Дж/см² позволяет получать генераторный газ с концентрациями CO₂ менее 0,01 %.

4. Нагрев композиционных жидких топлив, приготовленных из торфа и бурого угля, световым потоком (с интенсивностью около 100 Вт/см²) позволяет в условиях преимущественно аллотермического процесса реализовать их преобразование в генераторный газ с высоким содержанием водорода и метана. Контролируемое изменение влажности смеси позволяет минимизировать концентрации негорючих компонентов в составе генераторного газа.

5. На основе результатов математического моделирования термического разложения суспензий из отходов углеобогащения в аллотермическом режиме установлено, что практически полная (выше 95 %) утилизация углерода достигается при толщине слоя топливной смеси, соответствующей менее, чем двум характерным размерам пятна нагрева.

Достоверность полученных результатов и обоснованность положений работы подтверждаются сопоставлением результатов тестовых исследований с ранее известными данными, полученными другими авторами. Применение высокоточных средств измерений, а также корректная организация экспериментов дает обоснованную уверенность в полученных числовых результатах. Удовлетворительная корреляция результатов численного

моделирования с экспериментальными данными является дополнительным критерием достоверности полученных данных.

Личный вклад автора состоит в выборе направления исследований, формулировке задач, определении необходимых условий проведения экспериментов, выделении ключевых параметров, разработке алгоритмов решения поставленных задач, решении крупных научно-технических задач в направлении термохимической конверсии НИТ при мощном световом нагреве. Приведенные результаты экспериментальных исследований и математического моделирования получены в соавторстве с коллегами из Лаборатории тепломассопереноса ТПУ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования представлялись на конференциях, семинарах и симпозиумах. Основные из них: «Thermophysical basis of energy technologies 2015» (Томск, 2015), «Heat and mass transfer in the system of thermal modes of energy - technical and technological equipment, НМТТСС 2016» (Томск, 2016), «Nanoworkshop 2016» (Томск, 2016), «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов» (Саратов, 2018), «XXII Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых» (Томск, 2018), «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» (Томск, 2018), «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2018), III Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2018), X Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2018), V Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2019), XI Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2021).

Связь работы с государственными программами и НИР. Диссертационные исследования выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета: проект ВИУ-НУ-44-2014 «Постдок в Томском политехническом университете», проект

«Разработка оптимизированных методик конверсии горючих промышленных отходов для создания альтернативных топлив» (ВИУ-ИШФВП-299/2018), проект «Разработка экологически выгодных аллотермических методик утилизации горючих отходов углеобогащения с попутной выработкой тепловой энергии» (ВИУ-ИШФВП-197/2019), а также в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований «Оценка жизненного цикла снижения выбросов CO₂ путем энергоэффективного пиролиза и газификации композиционной биомассы» (№ 19-53-80019) и программ госзадания «Наука» проект № 1.0031.ГЗБ.2020 и проект № 2.0001.ГЗБ.2023.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и списка используемых источников, включающего 207 наименований. Полный объем диссертации – 265 страниц машинописного текста, в том числе 91 рисунок и 9 таблиц.

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в 25 научных трудах, включая 2 статьи в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ (Химия твердого топлива, Кокс и химия), 20 статей в зарубежных изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science (Fuel, Applied Thermal Engineering, Energy, Renewable Energy, Fuel Processing Technology, Energy&Fuels), входящих в первый и второй квартиль Scopus и WoS, 3 доклада в сборниках конференций различного уровня.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, отражены новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приведены свойства объектов исследования (отходы обогащения углей, торфы, бурые угли). Указаны основные месторождения, масштабы залежей, а также приведены основные прогнозы по производству отходов. Рассмотрены основные методики, применяемые для утилизации мелкодисперсных отходов углеобогащения, извлечения из них тепловой энергии, а также наиболее популярные методики использования НИТ. Обозначены достоинства различных используемых и перспективных методов термохимической переработки данных типов горючего сырья. Рассмотрены

результаты теоретических и экспериментальных исследований, производимых в смежных направлениях в течение ряда лет. Определены слабо изученные факторы, процессы, режимы, которые требуют прояснения для решения поставленных в диссертационной работе задач.

Во второй главе описаны использованные методы исследования процессов зажигания, горения и аллотермической газификации топливных смесей, рассмотрены конструктивные особенности стендов, а также описана структура математической модели процесса газификации ВУС и применяемые в расчетах исходные данные. На рис. 1 показаны схемы стендов, применявшихся в исследованиях.

Влияние размера частиц аэрозоля на характеристики зажигания ВУС исследовалось с использованием следующих методик: экспериментальная оценка возможных размеров при различных режимах распыления (стенд, рис. 1а), математическое моделирование зажигания частиц различных размеров.

Топливная смесь распылялась в камере стенда, скорость движения и размеры капель анализировались с применением методов теневой фотографии и PIV. Для моделирования зажигания использовалась ранее многократно опробованная математическая модель.

Фрагментация капель ВУС под влиянием лазерных импульсов при различных температурах исследовалась с помощью стенда, показанного на рис. 1б. Капля ВУС заданного размера помещалась на держатель и обстреливалась наносекундными лазерными импульсами.

Анализировались скорости и размеры выброшенных частиц, а также изменение времени задержки зажигания для исходной частицы при ее нагреве в печи.

Аналогичный подход (без использования лазера) использовался для исследования зажигания и горения ВУС с различными примесями при радиационном нагреве в печи. Капля на держателе вносилась в муфельную печь, разогретую до необходимой температуры. Время задержки зажигания, характерное время горения, температуры поверхности капли измерялись с по-

мощью высокоскоростной камеры и тепловизора. Исследование особенностей зажигания ВУС при конвективном нагреве проводилось с помощью стенда, где муфельная печь заменялась на кварцевую трубу с высокотемпературным воздушным потоком.

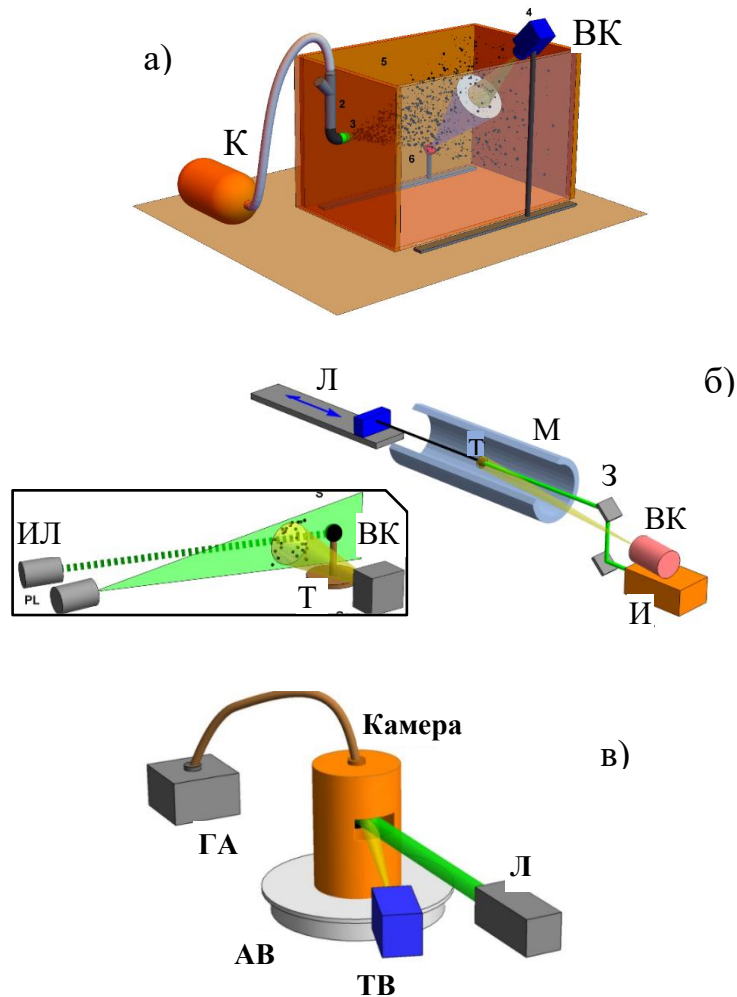


Рисунок 1 – Схемы стендов для исследования распыления ВУС (а), зажигания и горения ВУС (б), пиролиза ВУС (в). На схемах: непрерывный лазер (Л), импульсный лазер (ИЛ), высокоскоростная видеокамера (ВК), линейный привод (ЛП), тепловизор (ТВ), муфельная печь (МП), газоанализатор (ГА), компрессор (К)

Капля ВУС вносилась в трубу через отверстие в боковой поверхности, параметры зажигания и горения измерялись аналогично ранее описанному для радиационного нагрева. Для исследования аллотермической газификации ВУС применялся стенд, представленный на рис. 1в.

Порция топлива размещалась в камере реактора и освещалась потоком лазерного излучения через оптическое окно. Смесь газов, накапливающаяся в камере, откачивалась в ходе процесса и анализировалась проточным газоанализатором. Контроль температуры топлива производился с помощью тепловизора при открытом окне.

Общая производительность пиролиза ВУС измерялась с помощью аналитических весов, на которые устанавливалась камера. Для минимизации погрешностей в ходе измерений производительности газогенерации трубопроводы газоанализатора отключались. Показания тепловизора при измерении температуры поверхности ВУС проверялись с использованием малоинерционных термопар с дальнейшим подбором коэффициента серости, обеспечивающего наибольшую корреляцию показаний.

Конструкции стендов в ходе некоторых экспериментов видоизменялись для обеспечения большего удобства работы с жидкими топливными смесями при сохранении общей принципиальной схемы.

Физическая постановка задачи, решаемой в ходе математического моделирования процессов аллотермического пиролиза ВУС и разностная сетка представлены на рис. 2.

Математически

задача формулировалась в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных в цилиндрической системе координат. Такой подход, с учетом симметрии системы, позволяет обойтись меньшим числом независимых переменных и существенно ускорить время расчета. Нагрев порции топлива описывается уравнением теплопроводности для цилиндрического

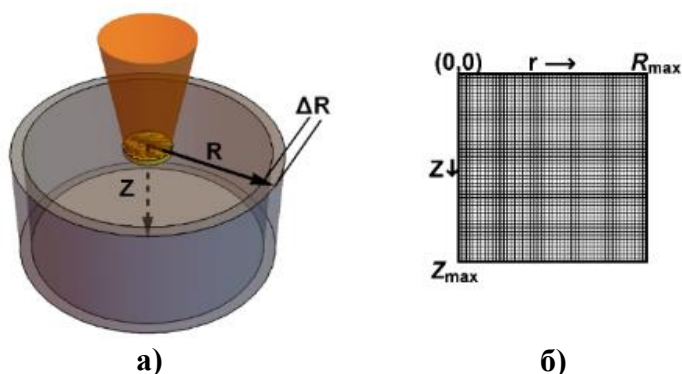


Рисунок 2 – Схема нагрева топлива (а) и схема сетки, используемой при решении системы уравнений (б). На схеме показан конус светового луча и слой топлива

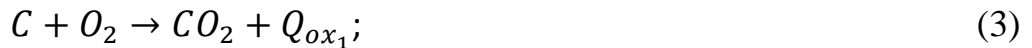
слоя топлива (1) с учетом нагрева поверхности в пятне фокусировки светового потока, а также внутреннего нагрева за счет тепловых эффектов химических реакций и фазовых переходов компонентов топлива (2):

$$C_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial z^2} \right) + \sum Q_i W_i, \quad (1)$$

$$\sum Q_i W_i = Q_r W_r + Q_H W_H - Q_{ox_1} W_{ox_1} - Q_{ox_2} W_{ox_2} + Q_e W_e + \sum Q_L, \quad (2)$$

где C_p , ρ , λ – теплоемкость, плотность и теплопроводность водотопливной смеси, Q_i и W_i – тепловые эффекты и скорости протекания i -го процесса (r – реакция восстановления углекислого газа, e – паро-углеродная реакция, ox_1 и ox_2 – реакции окисления углерода до CO и CO₂, соответственно, e – тепловой эффект испарения воды), Q_L – тепловые потери. Независимые переменные изменяются в диапазонах: $t > 0$, $0 < r < R_{max}$, $0 < z < Z_{max}$.

В модели учитываются следующие химические реакции:



Концентрационная кинетика протекания данных реакций рассчитывается согласно уравнению:

$$\frac{\partial c_i(r,z,t)}{\partial t} = c_j(r,z,t) \cdot c_i(r,z,t) \cdot W_i(r,z,t), \quad (7)$$

где c_i , c_j – концентрации прекурсоров описываемой реакции в точке с координатами r и z в момент времени t , W_i – скорость ее протекания в данной точке в момент времени t .

Скорости химических реакций, а также скорость испарения воды описывались с помощью уравнений Аррениуса:

$$W_i(r,z,t) = k_{0i} \cdot T(r,z,t)^{n_i} \cdot \exp\left(-\frac{E a_i}{R \cdot T(r,z,t)}\right); \quad (8)$$

$$W_e = W_0 \cdot \exp\left(\frac{Q_e \cdot \mu_w \cdot (T_s - T_{fr})}{R \cdot T_s \cdot T_{fr}}\right). \quad (9)$$

Система уравнений решалась совместно с граничными и начальными условиями (10), где R_{light} – радиус освещенного пятна на поверхности порции

топлива, q – интенсивность светового потока. Система дифференциальных уравнений решалась методом двойной прогонки на прямоугольной равномерной сетке размерами 300×100 в направлениях R и Z , соответственно.

Шаг по времени вычислялся адаптивно в зависимости от значения производных температуры по времени. Минимальное и максимальное значения шага составляли 10^{-5} с и 10^{-2} с соответственно. Интегрирование проводилось до момента, когда изменение концентрации углерода на границе освещенной области в течение одного шага становилось меньше 10^{-6} от текущего значения.

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 0, 0 < r < R_{max}, 0 < z < Z_{max}: \\ \quad T(r, z, t) = T_0, c_i(r, z, t) = c_0; \\ t > 0, 0 < r < R_{light}, z = Z_{max}: \\ \quad -\lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} = \alpha(T(r, z, t) - T_e) + \varepsilon\sigma(T(r, z, t)^4 - T_e^4); \\ t > 0, R_{light} < r < R_{max}, z = Z_{max}: \\ \quad -\lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} = \alpha(T(r, z, t) - T_e) + \varepsilon\sigma(T(r, z, t)^4 - T_e^4); \\ t > 0, 0 < r < R_{light}, z = 0: \\ \quad \lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} = q + \alpha(T(r, z, t) - T_e) + \varepsilon\sigma(T(r, z, t)^4 - T_e^4); \\ t > 0, R_{light} < r < R_{max}, z = 0: \\ \quad \lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} = \alpha(T(r, z, t) - T_e) + \varepsilon\sigma(T(r, z, t)^4 - T_e^4); \\ t > 0, r = R_{max}, 0 < z < Z_{max}: \\ \quad -\lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} = \alpha(T(r, z, t) - T_e) + \varepsilon\sigma(T(r, z, t)^4 - T_e^4); \\ t > 0, r = 0, 0 < z < Z_{max}: \\ \quad \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} = 0. \end{array} \right. \quad (10)$$

Третья глава посвящена результатам экспериментальных исследований зажигания ВУС, приготовленных на основе фильтр-кека каменного угля марки Г (газовый). Показано влияние основных факторов (температура, размер порции топлива) на время задержки зажигания порции. Про-

анализированы особенности сверхтонкого распыления ВУС при воздействии мощных лазерных импульсов, и потенциал данного подхода в сравнении с распылением ВУС с помощью разных типов форсунок.

Проанализированы особенности распыления ВУС с различным содержанием воды (и, следовательно, с различной вязкостью) с помощью механических форсунок.

Исследовано влияние размерного фактора на времена задержки зажигания частиц водо-топливного аэрозоля при радиационном нагреве, а также особенности распространения самого аэрозоля в воздухе.

Было отмечено, что влажность ВУС является одним из основных факторов, влияющих как на время задержки ее зажигания, так и на возможность мелкодисперсного распыления смеси. ВУС с влажностью порядка 70 мас.% позволяет получать аэрозоль со средним размером частиц 270 мкм и скоростями

порядка 0,55 м/с.

В то же время, более сухое топливо (30 мас.% воды и 10 мас.% отработанных нефтепродуктов) распыляется до размеров порядка 500 мкм при скоростях порядка 4 м/с. При этом, для капель с размером менее 500 мкм уменьшение концентрации воды в смеси с 70 мас.% до 30 мас.% приводит к ускорению зажигания не более, чем на 0,5 с.

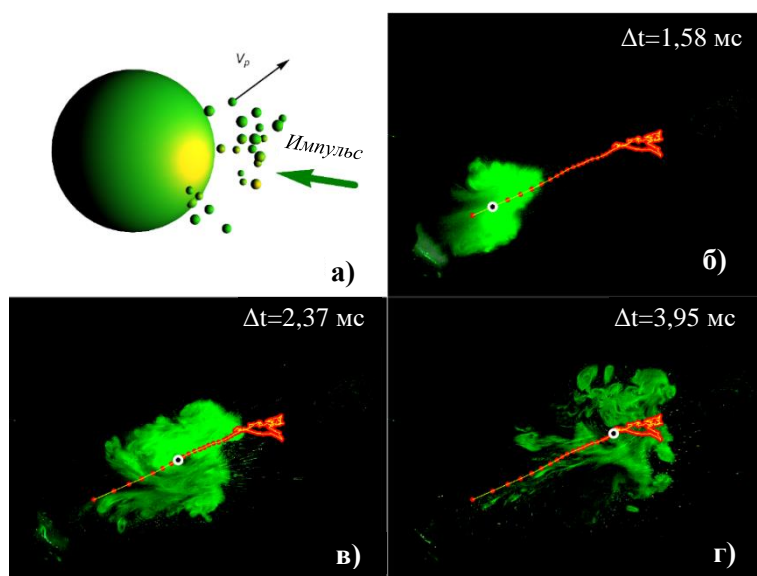


Рисунок 3 – Взаимодействие лазерного импульса с каплей ВУС (а). Распространение облака тонко распыленного аэрозоля, порожденного микровзрывом водяного пара (б–г). Зеленое облако произведенных газов, яркие точки – частички аэрозоля. Траектория облака показана красными точками

Полученный результат означает, что использование более калорийных, т.е.

более густых ВУС требует либо существенно больших размеров топочных агрегатов, либо организации более сложных систем распыления топлива (вихревые горелки, ротационные форсунки и др.). ВУС с удельной теплотворной способностью $\sim 11\text{--}12$ МДж/кг (фильтр-кек с ~ 40 мас.% воды) или до 15 МДж/кг (фильтр-кек с 30 мас.% воды и 10 мас.% отработанного нефтепродукта) достаточно сложно распылять простыми механическими форсунками до размеров капель менее 0,5 мм. Воздействие наносекундных лазерных импульсов с энергиями порядка 100 мДж позволяет распылить такое топливо до значительно меньших размеров аэрозольных частиц (менее 100 мкм) с одновременным рассеиванием потока аэрозоля в поперечном направлении, вокруг вектора скорости потока (рис. 3). Микрофрагментация капель ВУС происходит вследствие взрывного испарения водяного пара в области, где происходит поглощение энергии импульса.

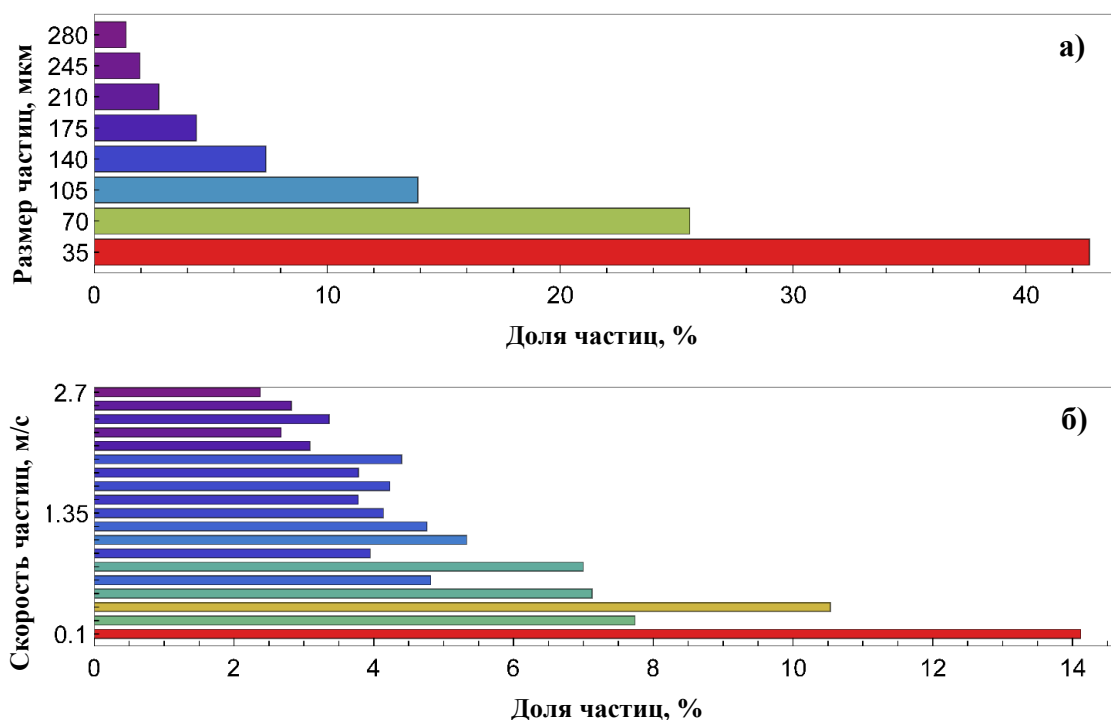


Рисунок 4 – Распределения по размерам (а) и скоростям (б) частиц аэрозоля полученных при взаимодействии лазерных импульсов с каплей ВУС

На рис. 4 показаны распределения частиц аэрозоля, полученных методом лазерного распыления, по размерам и скоростям. Видно, что средний

размер частиц не превосходит 100 мкм, а средняя скорость не превосходит 2 м/с.

Предварительный разогрев ВУС в печи до температуры около 400 К приводит к быстрой сушке топлива, вследствие чего поглощаемый лазерный импульс уже не способен инициировать выброс водяного пара с микрофрагментацией ВУС. Кроме того, локальный нагрев поверхности ВУС лазерным излучением приводит к быстрому выгоранию углерода и снижению ее проницаемости для получаемых газов. В результате спекания поверхности, время задержки зажигания исходной капли ВУС растет на 10–12 %.

Таким образом, для полноценного задействования лазерного распыления ВУС при высоких температурах необходимо использовать суспензии с высоким содержанием воды (порядка 70 %), причем облучение должно проводиться как можно раньше, сразу после подачи ВУС в область нагрева, но до высыхания поверхности капель.

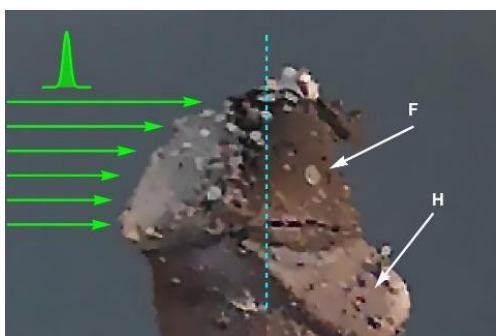


Рисунок 5 – Зольный остаток топлива (F) на держателе (H), после извлечения из печи. Зеленые стрелки показывают воздействие лазерного пучка.

Внешний вид порции топлива с начальной влажностью около 40 мас.% после воздействия лазерных импульсов показан на рис. 5. Видно, что облучаемая поверхность покрыта зольной коркой, тогда как часть поверхности капли ВУС, располагавшаяся в зоне тени, имеет темную окраску, что отражает присутствие недожженного углерода.

Еще одним важным результатом взаимодействия лазерных импульсов с ВУС является ее частичный пиролиз в зоне облучения. При поглощении топливом наносекундных импульсов с интенсивностями свыше 8 Дж/см² начинается интенсивное образование оксида углерода (CO), водорода, а также оксидов серы и азота.

Окисление углерода по-видимому идет с использованием абляционного механизма, причем отмеченный уровень интенсивности представляет

собой эффективный порог абляции углерода для ВУС с влажностью 40 мас.% (см. рис. 6).

В итоге, для обеспечения наиболее эффективного распыления ВУС желательно использовать лазерное излучение с плотностью энергии в импульсе менее 8 Дж/см². В противном случае существенная часть энергии импульсов будет расходоваться на производство горючих газов (СО и Н₂) и приведет к некоторому снижению производительности процесса распыления.

В четвертой главе изучены особенности горения ВУС, модифицированных с использованием порошков алюминия, железа и мела. Добавление в состав ВУС небольшого количества (менее 5 мас.%) порошка алюминия (ПАП-2) вносит в процесс горения ветку окислительных реакций, соответствующих горению металла.

Данный факт приводит к росту времени задержки зажигания ВУС не более 30 % при конвективном нагреве (рис. 7) и до 45 % при радиационном нагреве. При темпера-

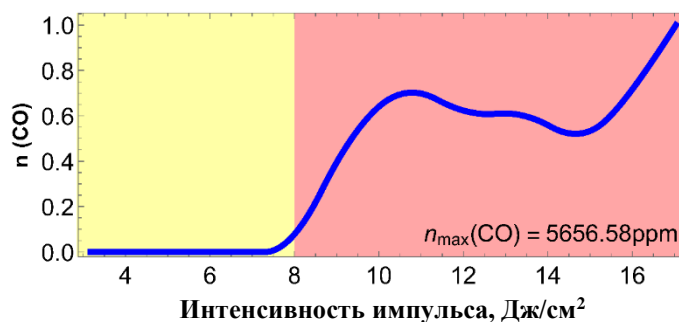


Рисунок 6 – Нормированная концентрация СО в камере реактора при разной интенсивности лазерного излучения. Нормировка проводилась на максимальное значение (n_{max})

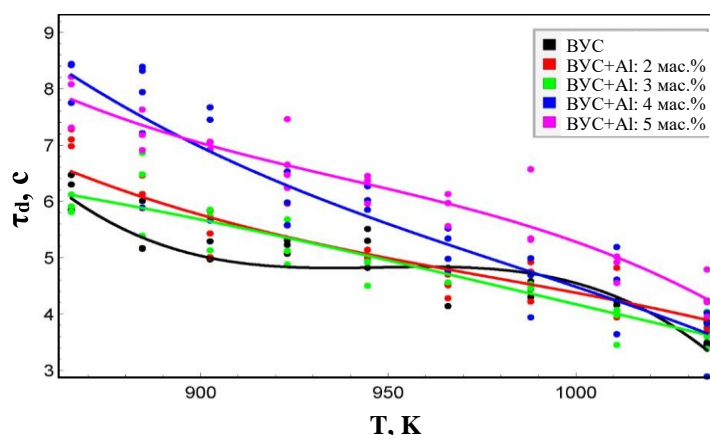


Рисунок 7 – Времена задержки зажигания в зависимости от температуры окружающей среды для ВУС с различными концентрациями порошка алюминия. Размер капли ~1,5 мм

турах свыше 1000 К времена задержки зажигания ВУС слабо зависят от количества примесей. Кроме того, температура поверхности горячей капли ВУС при добавлении порошка алюминия также растет. При концентрации порошка металла в 3 мас.% прирост температур достигает 150–170 градусов при конвективном нагреве и до 450 градусов при радиационном (рис. 8). Добавление порошка алюминия (3 мас.%) позволяет стабилизировать превышение температуры поверхности ВУС над температурой стенок печи в диапазоне 850–1100 К. При конвективном нагреве эффект стабилизации избыточной температуры больше всего заметен при температурах окружающей среды менее 1000 К.

Добавление порошков других металлов (железа, меди), а также мела в количестве менее 5 мас.% приводит к снижению температур горения ВУС на 150–200 градусов при росте времен задержки зажигания не более, чем на 50 %.

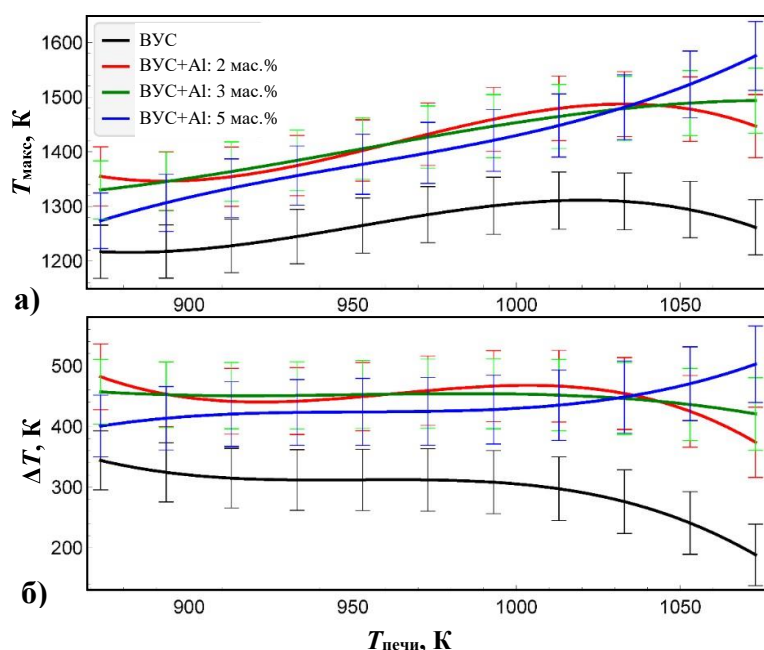


Рисунок 8 – Зависимости максимальных температур горения ВУС с примесью алюминия от температур стенок печи (а). Зависимость превышения температуры горения данных ВУС над температурой печи (б)

Изменение состава дымовых газов при добавлении малого количества неорганических примесей представлено на рис. 9. Было показано, что добавление алюминия приводит к значительному росту производства оксидов углерода и заметному росту концентрации водорода. Это, очевидно, связано с ростом полноты выгорания углерода вследствие роста тем-

пературы горения. Однако, при высоких температурах резко снижается выработка оксидов серы и азота. Данный факт, по-видимому, связан с активацией высокотемпературных реакций образования сульфидов и нитридов алюминия. Эти реакции эффективно связывают серу и азот в зоне горения, образуя твердые остатки.

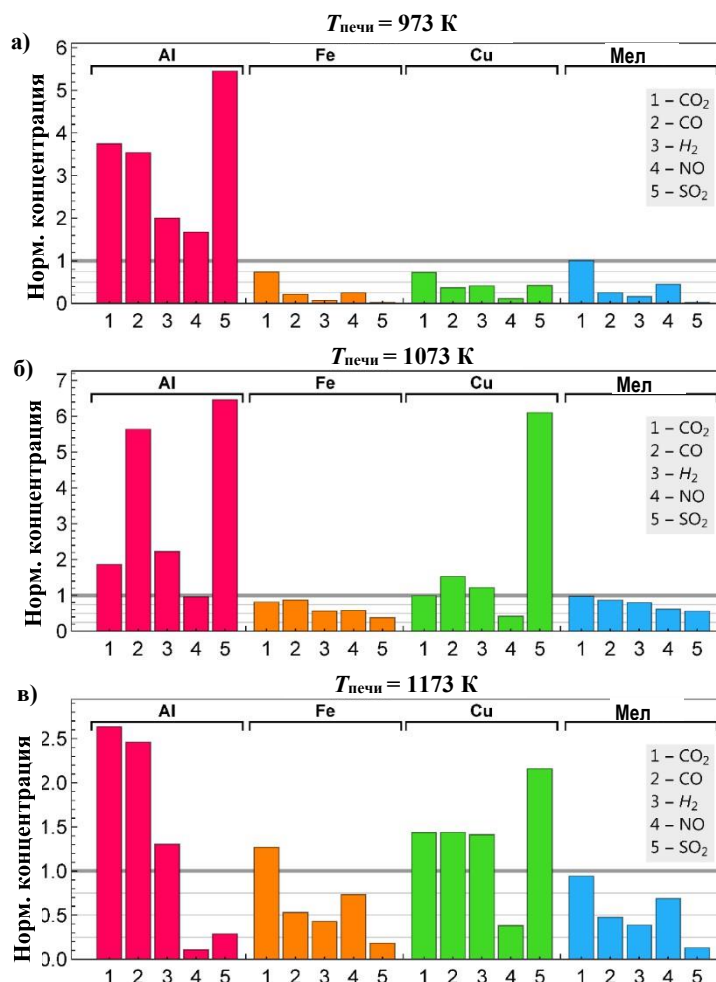


Рисунок 9 – Химический состав дымовых газов, полученных при сжигании ВУС с различными типами неорганических примесей при различных температурах. Концентрации нормированы на величины, измеренные для базовой ВУС

Добавление железа приводит к некоторому снижению общей газогенерации вследствие падения температуры горения, однако при высоких температурах стенок печи (1173 К и выше) уровень производства CO₂ несколько превышает эталонный уровень чистой ВУС. При этом образование вредных газов снижено от полутора до 4 раз. Использование меди в качестве

примеси для ВУС не целесообразно, т.к. при низких температурах она заметно снижает интенсивность горения, а при высоких приводит к росту выбросов диоксида серы.

Добавление 5 мас.% мела позволяет получить уровень производства диоксида углерода довольно близкий к измеренному при горении эталонной ВУС. Однако, выработка вредных газов снижается более, чем на порядок величины, в широком диапазоне температур стенок печи. Взаимодействие мела с водой, содержащейся в ВУС, приводит к формированию извести, которая эффективно связывает серу, а также дает некоторый вклад в тепловыделение за счет реакции гашения извести.

Таким образом, можно заключить, что добавление малого количества неорганических веществ (в первую очередь, порошков алюминия и мела) позволяет достичь большей эффективности горения ВУС и минимизировать уровень вредных выбросов.

В пятой главе представлены результаты исследования аллотермического пиролиза ВУС, приготовленных из отходов углеобогащения, а также влажных смесей НИТ, под действием мощного светового потока. Показано, что при облучении ВУС наносекундными лазерными импульсами с интенсивностью свыше 8 Дж/см^2 происходит газификация углерода, с преимущественной выработкой СО (рис. 10). Отсутствие измеримых количеств CO_2 , а также наличие очевидного порога интенсивности, определяющего начало процесса газификации углерода, позволяет заключить, что процесс протекает за счет абляционного механизма. При этом окисление углерода происходит при температурах в освещенной области порядка 2000 К, когда доминирует реакция неполного окисления углерода. Однако, импульсное воздействие не приводит к сильному росту температуры всей порции ВУС, а процесс является полностью аллотермическим. Типичные затраты энергии на конверсию ВУС в данном случае составляют порядка 3,5 МДж/кг.

В случае, когда для нагрева ВУС, приготовленной из отходов обогащения каменных углей было использовано непрерывное световое излучение, происходит пиролиз суспензии при температурах порядка 900 К и более. Для этого интенсивность светового потока должна превышать 800 Вт/см^2 .

Данный процесс также является преимущественно аллотермическим, т.е. выход массы генераторного газа пропорционален поглощенной световой энергии (рис. 11).

В данном случае порог интенсивности, обуславливающий, резкий рост производства монооксида углерода, также однозначно определяет пороговую температуру в освещенной области. Если нагреваемая порция топлива мала, то распределение ее температуры по объему достаточно однородно, и при условии поддержания избытка окислителя в камере не более 1,3 также наблюдается доминирующая генерация CO. Уровень выработки оксидов серы и азота не превышает величин, наблюдающихся при тривиальном самоподдерживающемся сгорании ВУС (менее 30 ппм). Варьирование содержания летучих в твердой части суспензии в пределах 5 мас.% не приводит к существенным измене-

ниям соотношения компонентов пиролизных газов.

Уровень затрат энергии от внешнего источника нагрева для газификации одного килограмма ВУС превосходит 3 МДж/кг. Стоит отметить, что рассматриваемые топ-

ливные смеси имели содержание воды на уровне 40 мас.%, соответствующее типичной влажности мелкодисперсных отходов обогащения каменных углей на выходе техпроцесса в ряде обогатительных фабрик Юго-Западной Сибири. Однако, снижение влажности ниже 30 мас.% приводит к росту выработки CO₂, которая быстро становится доминирующим каналом окисления углерода при снижении влажности смеси. На рис. 12 показано, что с ростом начальной влажности топливной смеси свыше 20 мас.% происходит общее снижение выработки оксидов углерода.

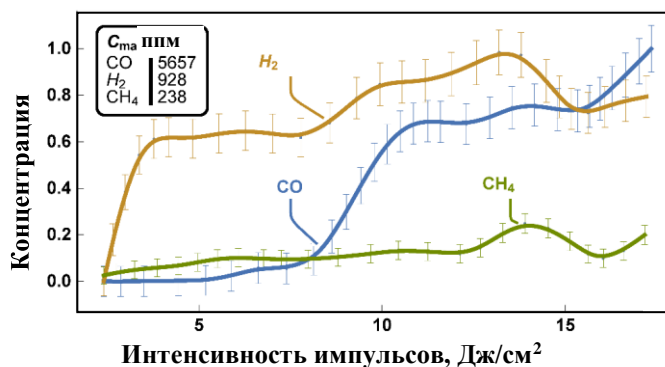


Рисунок 10 – Зависимости нормированных концентраций горючих компонентов генераторного газа от интенсивности лазерного излучения. Нормировочные коэффициенты указаны в легенде

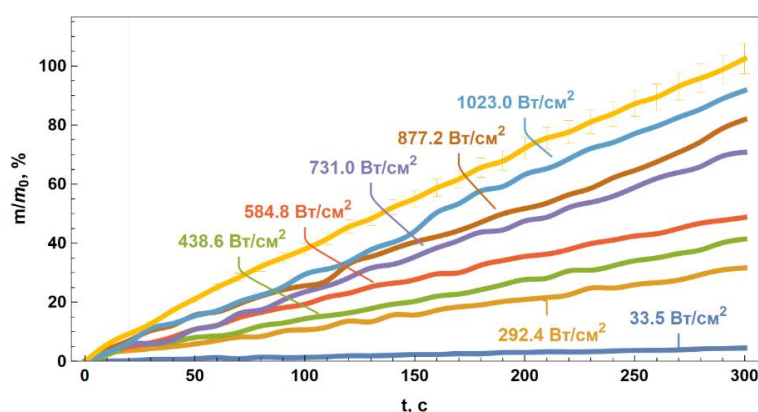


Рисунок 11 – Нормированные зависимости массы газообразных продуктов конверсии ВУС от времени для различных интенсивностей лазерного излучения. Нормировочный множитель $m_0=120$ мг

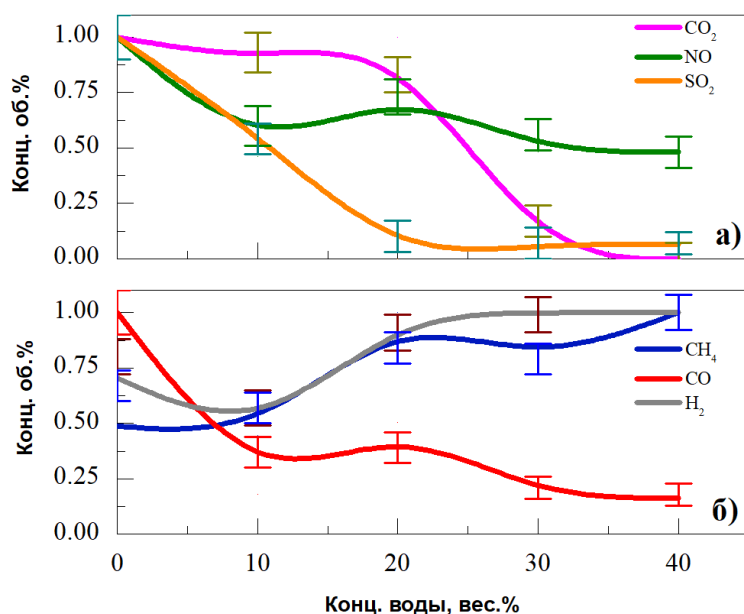


Рисунок 12 – Зависимости нормированных концентраций основных газообразных продуктов пиролиза ВУС от начальной влажности суспензии. Нормировочные коэффициенты: $C_{max}(\text{CO}) = 12640$ ppm, $C_{max}(\text{H}_2) = 630$ ppm, $C_{max}(\text{CH}_4) = 171$ ppm, $C_{max}(\text{SO}_2) = 22$ ppm, $C_{max}(\text{NO}) = 11$ ppm, $C_{max}(\text{CO}_2) = 14810$ ppm.

Интенсивность светового потока $q=990$ Вт/см²

процесс пиролиза становится в значительной степени не аллотермическим

При влажности смеси свыше 30 мас.% производство значимых количеств CO_2 не наблюдается. Выработка водорода и метана растет с ростом влажности топливной смеси вместе с некоторым снижением производства оксидов серы и азота.

Применение непрерывного светового нагрева для пиролиза ВУС, приготовленных на основе торфа и бурого угля, показало, что такие топлива могут быть успешно пиролизованы при на порядок меньших интенсивностях светового потока.

При этом также достигаются температуры порядка 900 К вследствие существенного вклада теплового эффекта реакций окисления топлива. Т.е.

(рис. 13). В этом случае, зависимости масс произведенных газов не пропорциональны закачанной в образец энергии. В силу существенного различия химического состава бурого угля и торфа, затраты энергии от

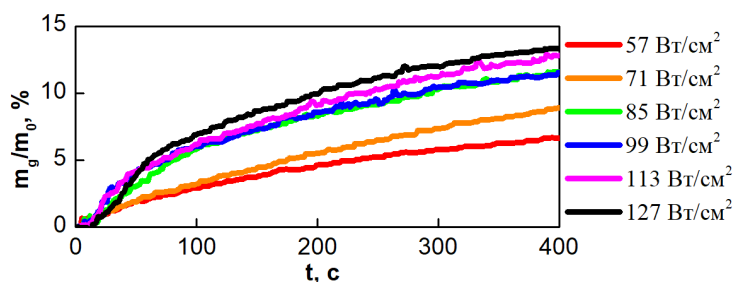


Рисунок 13 – Зависимости масс газов, произведенных из ВУС на основе торфа, от времени для различных интенсивностей светового потока. Начальная масса топлива $m_0 = 150$ мг

внешнего источника на конверсию одного килограмма ВУС довольно сильно отличаются (1,5 и 2,2 МДж, соответственно). При любом уровне содержания влаги в составе смеси, приготовленной на основе торфа или бурого угля, невозможно получить пиролизный газ, не содержащий значимых количеств CO_2 .

В шестой главе представлены результаты математического моделирования аллотермической газификации ВУС под действием мощного светового потока. Проанализированы особенности пространственных распределений, температуры, концентраций воды и не связанного углерода в объеме порции ВУС в ходе процесса пиролиза. На рис. 14 показаны тренды пиковых температур в центре освещенной области поверхности образца топлива, видны основные стадии процесса пиролиза – сушка (I), разогрев сухого топлива (II), газификация после полного выгорания углерода на оси светового пучка. Соответствующие распределения концентрации несвязанного углерода по объему порции ВУС представлены на рис. 15. Моменты времени 4 с, 20 с, 50 с, соответствуют меткам 1–3 на рис. 14. Видно, что основная часть окисления происходит в ходе стадий II и III.

Из рис. 15 следует, что пиролиз ВУС идет преимущественно в границах освещенной области. Причем основная масса производства CO_2 идет именно вне границ светового пятна, где температуры заметно ниже, и, соответственно, соотношение скоростей реакций окисления (3) и (4) изменяется в пользу реакции полного окисления.

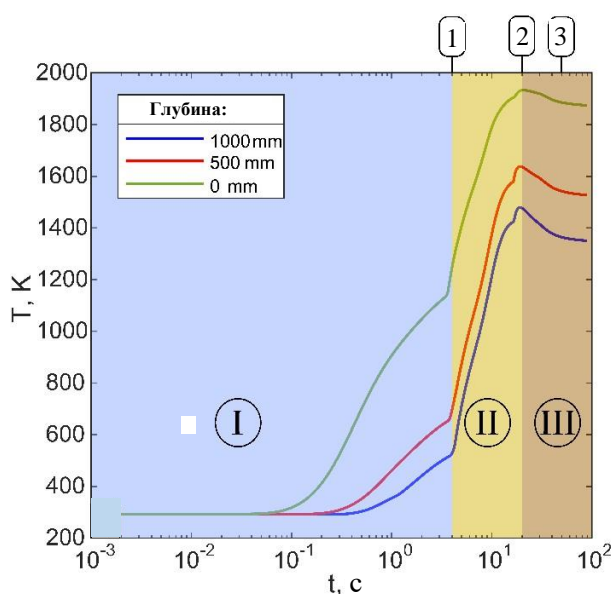


Рисунок 14 – Тренды пиковых температур в различных слоях образца топлива. Сверху цифрами отмечены: полное обезвоживание (1), выгорание углерода на оси светового пучка (2), полное выгорание углерода в границах освещенной области (3)

половине стадии (II), а максимум производительности реакции (4) – в начале стадии (III). Профиль производительности реакции (5) сильно коррелирует с реакцией (4) в силу того, что выработка CO_2 оказывает определяющее влияние на темпы его восстановления.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что роль воды в ходе конверсии ВУС состоит в ограничении роста температуры на начальной стадии процесса с быстрой выработкой большого количества газов (пар и CO), снижающих парциальную концентрацию кислорода вблизи поверхности ВУС, что и ограничивает производительность реакции (3), подавляя горение топлива.

Анализ динамики протекания химических реакций, учтенных в модели, показывает, что максимум скорости паро-углеродной реакции (6) достигается приблизительно через секунду после включения нагрева, сразу после локального максимума реакций (3) и (4).

Абсолютный максимум производительности реакции (3) наблюдается во второй

В седьмой главе рассмотрены возможные пути практического применения результатов, представленных ранее, а также произведена оценка экономического эффекта применения ВУС на основе отходов обогащения угля вместо энергетических углей. Предложенные методики лазерного распыления ВУС, а также методика свето-индуцированной газификации могут быть использованы совместно для оптимизации зажигания ВУС. Использо-

вание методики пиролиза под действием светового потока в качестве основного этапа термохимической переработки топлива позволяет реализовать процесс утилизации отходов обогащения углей за счет энергии солнечного света (рис. 16 и 17).

Использование неорганических примесей позволяет существенно стабилизировать процесс горения ВУС, а также улучшить состав газообразных выбросов.

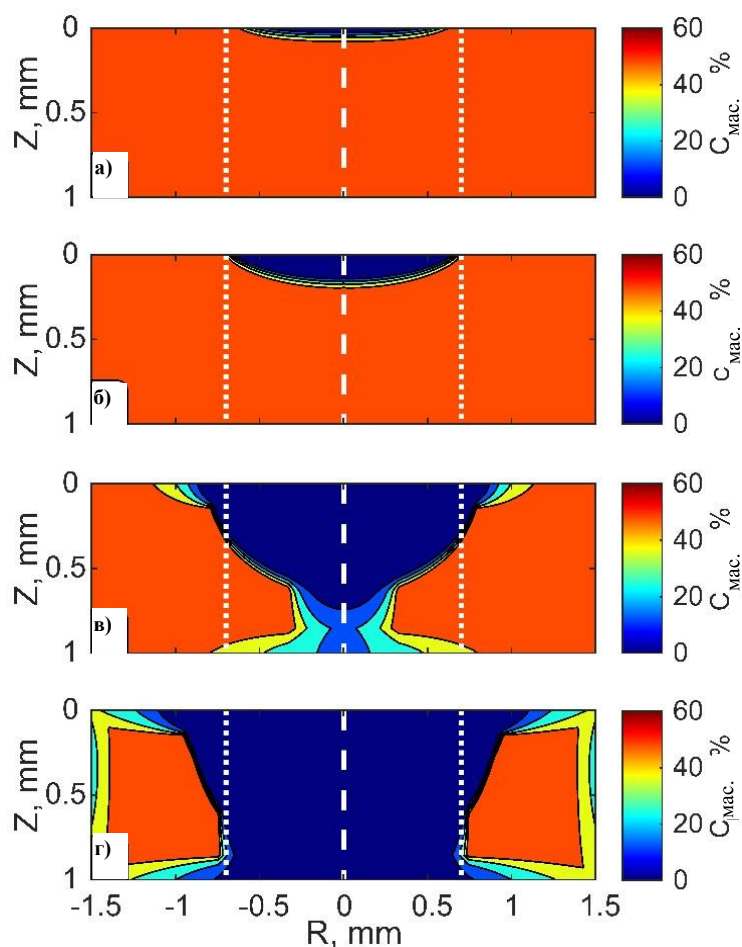


Рисунок 15 – Распределения концентрации углерода в поперечном сечении образца топлива для моментов времени 1 с, 4 с, 20 с и 50 с после начала нагрева (а) – (г)

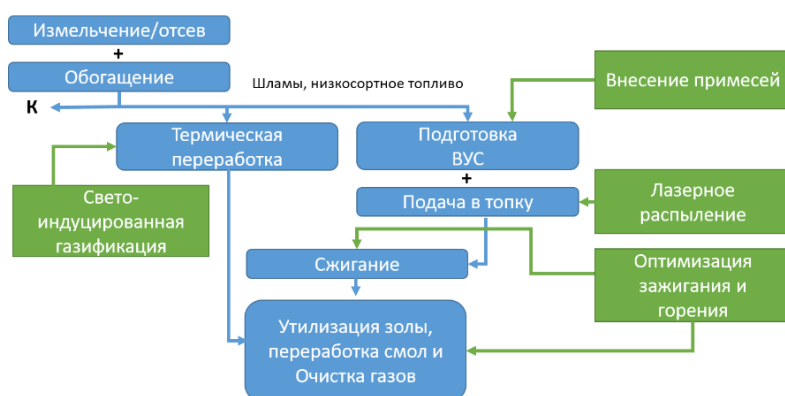


Рисунок 16 – Обобщенная схема технологии использования низкокалорийного твердого топлива. Зеленым отмечены предложенные в данной работе технологические этапы

Даже при текущих (2023 г.) ценах на энергетические марки углей (~16000 руб./т) и средней рыночной цене на алюминий (~17000 руб./т), применение ВУС с примесью 3 мас.% алюминия, позволяет получить экономию (без учета логистики и ка-

питальных затрат) порядка 7000 руб. с каждой тонны условного топлива. В 2022 году угольная промышленность Российской Федерации произвела порядка 81 млн. тонн отходов обогащения углей, которые могут быть непосредственно использованы. Таким образом, при полномасштабном использовании ВУС на основе отходов, порядка 55–60 млн. м³ отходов не попадут в отвалы.

Комплексное использование предложенных подходов позволяет суммировать вклады положительных эффектов, повышая общую эффективность использования ВУС.

Практическое применение результатов, представленных в пятой и шестой главах, возможно с использованием многократно опробованного концепта солнечного концентратора. С учетом среднего уровня инсоляции в умеренных широтах (порядка 300-400 Вт/м²), необходимый уровень интенсивности солнечного излучения достигается при фокусировке света, с площади ~3 га на поверхность ВУС площадью в 1 м². Параметры солнечных концентраторов ряда построенных в настоящее время СЭС (например, СЭС Ашалим, рис. 16) позволяют реализовать процесс пиролиза отходов углеобогащения.



Рисунок 17 – Типичный вид солнечного концентратора (СЭС Ашалим), параметры которого позволяют поддерживать свето-индуцированный пиролиз ВУС

Использование солнечного света для создания оптимальных условий окисления низкокалорийных топлив вместо тривиального нагрева воды, позволит повысить эффективность применения таких топлив вместе с повышением экологических показателей данного процесса. Южные регионы Российской Федерации, такие как Донбасс, Приазовье, а также угледобывающие регионы Казахстана, ЮАР, Индии являются потенциально пригодными для использования предложенного подхода к утилизации отходов обогащения углей, а также переработке бурых углей и торфов за счет сфокусированного солнечного света.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан новый подход к утилизации мелкодисперсных влажных отходов обогащения каменных углей, основанный на использовании нагрева световым потоком высокой интенсивности (свыше 300 Вт/см^2).

2. Впервые продемонстрирована методика лазерного распыления водоугольных суспензий, приготовленных из отходов обогащения каменных углей. Показано, что воздействие лазерных импульсов (10 нс, до 100 мДж) на каплю композиционного топлива приводит к ее диспергированию.

3. Впервые сформулированы фундаментальные основы методики повышения энергетических и экологических показателей продуктов термического разложения водоугольных топлив за счет добавления в их состав неорганических примесей (порошки алюминия, железа, а также известняка).

4. Установлены граничные параметры процесса пиролиза водных суспензий (пороговые интенсивности излучения, уровни затрат энергии на производство единицы массы генераторного газа, рабочие температуры), приготовленных на основе отходов обогащения каменных углей и низкокалорийных топлив.

5. На основе полученных экспериментальных данных, выявленных закономерностей и граничных значений, разработана новая математическая модель процесса пиролиза водоугольных суспензий под действием светового потока высокой интенсивности.

6. В результате проведенных широкомасштабных экспериментальных и теоретических исследований установлено влияние большой совокупности факторов (интенсивность излучения, температура поверхности топлива, влажность суспензии, размеры частиц аэрозоля, тип и количество неорганических примесей) на характеристики протекания процесса термохимической переработки и горения суспензий, приготовленных из отходов углеобогащения и низкокалорийных топлив.

7. Новые знания, полученные в результате проведенных исследований процесса свето-индуцированного пиролиза водоугольных суспензий, представляют интерес для разработки перспективных методов утилизации отходов обогащения углей за счет сфокусированного солнечного света, а также переработки низкокалорийных ископаемых топлив.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Журналы, входящие в перечень ВАК:

1. Зайцев, А. С. Светоиндуцированная газификация топливных композиций, приготовленных из отходов углепереработки / А. С. Зайцев, П. П. Ткаченко, М. В. Белоногов, **Р. И. Егоров** // Кокс и химия. – 2018. – № 7. – С. 43–51.
2. Зайцев, А. С. Газификация водоугольных композиций лазерными импульсами различной интенсивности / А. С. Зайцев, **Р. И. Егоров**, П. П. Ткаченко, М. В. Белоногов // Химия твердого топлива. – 2019. – № 1. – С. 54–60.

Журналы, индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science:

3. Vershinina, K. Yu. The ignition parameters of the coal-water slurry droplets at the different methods of injection into the hot oxidant flow / K. Yu. Vershinina, **R. I. Egorov**, P. A. Strizhak // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 107. – P. 10–20.
4. Iegorov, R. I. The effect of the petrochemicals at the ignition of the coal-water slurry droplet / **R. I. Iegorov**, T. R. Valliulin, P. A. Strizhak // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 106. – P. 351–353.
5. Valiullin, T. R. Perspectives of the use of rapeseed oil for the doping of waste-based industrial fuel / T. R. Valiullin, P. A. Strizhak, **R. I. Egorov** // Energy and Fuels. – 2017. – Vol. 31, No. 9. – P. 10116–10120.
6. Valiullin, T. R. Effect of a small amount of aluminum powder on the combustion of the waste-derived coal-water slurry / T. R. Valiullin, P. A. Strizhak, **R. I. Egorov** // Energy and Fuels. – 2017. – Vol. 31, No. 1. – P. 1044–1046.
7. Egorov, R. I. The light-induced gasification of waste-derived fuel / **R. I. Egorov**, P. A. Strizhak // Fuel. – 2017. – Vol. 197. – P. 28–30.
8. Antonov, D. V. Effect of macroscopic porosity onto the ignition of the waste-derived fuel droplets / D. V. Antonov, T. R. Valiullin, **R. I. Iegorov**, P. A. Strizhak // Energy. – 2017. – Vol. 119. – P. 1152–1158.

9. Valiullin, T. R. Combustion of the waste-derived fuel compositions metallized by aluminium powder / T. R. Valiullin, **R. I. Egorov**, P. A. Strizhak // *Combustion and Flame*. – 2017. – Vol. 182. P. 14–19.
10. Iegorov, R. I. Combustion of the coal-water slurry doped by combustible and non-combustible micro-particles / **R. I. Iegorov**, T. R. Valiullin, P. A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 113. – P. 1021–1023.
11. Egorov, R. I. Activation of the fuels with low reactivity using the high-power laser pulses / **R. I. Egorov**, A. S. Zaitsev, E. A. Salgansky // *Energies*. – 2018. – Vol. 11, No. 11. – Article no. 11113167.
12. Egorov, R. I. The ignition dynamics of the water-filled fuel compositions / **R. I. Egorov**, D. V. Antonov, T. R. Valiullin, P. A. Strizhak // *Fuel Processing Technology*. – 2018. – Vol. 174. – P. 26–32.
13. Zaitsev, A. S. Light-induced gasification of the coal-processing waste: possible products and regimes / A. S. Zaitsev, **R. I. Egorov**, P. A. Strizhak // *Fuel*. – 2018. – Vol. 212. – P. 347–352.
14. Egorov, R. I. Energetic and ecological effect of small amount of metalline powders used for doping waste-derived fuels / **R. I. Egorov**, T. R. Valiullin, P. A. Strizhak // *Combustion and Flame*. – 2018. – Vol. 193. – P. 335–343.
15. Egorov, R. I. Efficiency of different heat exchange mechanisms for ignition of coal-water compositions / **R. I. Egorov**, R. I. Taburchinov, A. S. Zaitsev // *Energy and Fuels*. – 2019. – Vol. 33, No. 8. – P. 7830–7834.
16. Yang, Z. Recent advances in co-thermochemical conversions of biomass with fossil fuels focusing on the synergistic effects / Z. Yang, Y. Wu, Z. Zhang, H. Li, X. Li, X. Gao, **R. I. Egorov**, P. A. Strizhak // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – Vol. 103. – P. 384–398.
17. Egorov, R. I. Intensity dependent features of the light-induced gasification of the waste-derived coal-water compositions / **R. I. Egorov**, A. S. Zaitsev, P. A. Strizhak, H. Li, X. Gao // *Renewable Energy*. – 2020. – Vol. 146. – P. 1667–1675.
18. Taburchinov, R. I. Effect of the addition of petrochemicals onto the atomization and ignition of the coal-water slurry prepared from the wastes /

- R. I. Taburchinov, M. V. Belonogov, **R. I. Egorov** // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – Article no. 8574.
19. Egorov, R. I. The propagation and ignition of the finely dispersed coal-water aerosol / **R. I. Egorov**, P. P. Tkachenko, R. I. Taburchinov, A. O. Chulkov // Fuel. – 2020. – Vol. 263. – Article no. 116767.
20. Zaitsev, A. S. Allothermal gasification of peat and lignite by a focused light flow / A. S. Zaitsev, R. I. Taburchinov, I. P. Ozerova, A. O. Pereira, **R. I. Egorov** // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, No. 8. – Article no. 2640.
21. Belonogov, M. V. Effect of the high-power electromagnetic pulses on the reactivity of the coal-water slurry in hot environment / M. V. Belonogov, R. I. Taburchinov, **R. I. Egorov** // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 28, No. 12. – P. 3145–3151.
22. Egorov, R. I. The numerical study of allothermal gasification of the peat by the focused light flow / **R. I. Egorov**, R. I. Taburchinov // Applied Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 195. – Article no. 117253.