

На правах рукописи



**Бутаков Евгений Борисович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ С  
МЕХАНО– И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К  
ЭНЕРГЕТИКЕ И ПОЛУЧЕНИЮ ТОПЛИВНОГО ГАЗА**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
«Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской  
академии наук»

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор  
**Бурдуков Анатолий Петрович**

Официальные оппоненты: **Баев Владимир Константинович**  
доктор технических наук, профессор,  
«Институт теоретической и прикладной  
механики СО РАН им. Христиановича»  
Заведующий лабораторией  
«Неравновесных процессов»

**Кузнецов Гений Владимирович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, «Национальный  
исследовательский Томский  
политехнический университет»  
заведующий кафедрой «Теоретической и  
промышленной теплотехники»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский федеральный  
университет» (СФУ) г. Красноярск.

Защита состоится «08» декабря 2017 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.173.02 в Федеральном государственном бюджетном  
образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный  
технический университет» (630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального  
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет» и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан « » октября 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.173.02  
доктор технических наук, профессор



А.В. Чичиндаев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одним из глобальных направлений развития энергетических технологий в современном мире является непрерывное повышение эффективности и экологичности способов сжигания органического топлива. В России сформулирована «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года», предполагающая, в частности, снижение до технологического и экономического предела удельных показателей загрязнения окружающей среды предприятиями ТЭК.

Существующие методы повышения эффективности топливоиспользования в основном себя исчерпали и в настоящее время разрабатываются и осваиваются новые энергоэффективные и экологически более чистые технологии. К числу таких можно отнести технологии, основанные на механоактивационной и термохимической подготовке топлива к сжиганию. Активное применение данных технологий возможно на угольных котельных и ТЭС, где можно выделить две основных проблемы.

Первая – это высокая чувствительность процесса горения к свойствам используемых углей. При переходе к рыночной экономике возникли новые проблемы взаимоотношения между электростанциями и угольными предприятиями: даже небольшие по мощности ТЭЦ, не говоря уже о крупных ГРЭС, вынуждены закупать топливо у множества поставщиков. Получение топлива однородного состава в этом случае практически исключено.

Вторая – это необходимость сжигания огромного количества дополнительного высокорекреационного топлива (мазут, газ) для розжига и подсветки пылеугольного факела котлов. Совместное сжигание угля с мазутом, практикующееся на пылеугольных ТЭС, приводит к заметному возрастанию мехнедожога топлива, снижению КПД котлов и надежности работы котельного оборудования, повышению выбросов оксидов азота, серы и пентаоксида ванадия.

Применение термохимической технологии с использованием плазмотронов при утилизации техногенных, в том числе и органических отходов, показало свою эффективность и востребованность. Разработка новых подходов к созданию плазменных электротехнологических установок с улучшенными энергетическими параметрами для задач переработки техногенных отходов (ТО) является весьма востребованной в настоящее время. Такими энергоэффективными установками являются электропечи для плазменной газификации углеродосодержащих отходов с получением высококалорийного синтез-газа.

Таким образом актуальным является исследование механо – и плазмохимических методов интенсификации горения и газификации углеродосодержащих твердых топлив.

**Целью** диссертации является развитие механо – и плазмохимических методов интенсификации горения и газификации углей и углеродосодержащих твердых топлив. В соответствии с целью, были поставлены и решались следующие **задачи**:

1. Получение новых данных о влиянии предварительного высоконапряженного измельчения угольного топлива в мельничных устройствах на реакционную способность топлива.

2. Изучение горения и газификации механоактивированного угольного топлива различной степени метаморфизма на укрупненных стендах; исследование условий выхода на автотермический режим горения;

3. Разработка двухступенчатой системы горения и газификации механоактивированного пылеугольного топлива и экспериментальное моделирование на укрупненных стендах и совместно с углем, измельченным на штатных мельничных устройствах, и оценка эффективности системы применительно к промышленным котельным и ТЭС;

4. Создание экспериментального лабораторного стенда и разработка конструкторской документации лабораторной электроплазменной установки производительностью 10-20 кг/ч для газификации углеродсодержащих отходов;

5. Исследование высокотемпературной (плазменной) газификации твердых органических (углеродсодержащих) отходов с получением высококалорийного синтез-газа.

#### **Научная новизна работы.**

1. Впервые проведены экспериментальные исследования по воспламенению и горению механоактивированных углей различной степени метаморфизма на лабораторных и полупромышленных стендах, показавшие высокую эффективность процессов при механоактивационном измельчении.

2. Получены сравнительные данные по горению и газификации угольного топлива, измельченного на высоконапряженных мельницах - дезинтеграторе и виброцентробежной - на стенде тепловой мощностью 1 МВт.

3. Проведены экспериментальные исследования по воспламенению, горению и газификации пылевзвеси углей 2-х ступеней помола (механоактивированного и после ШБМ) в двухступенчатом горелочном устройстве производительностью до 1 т/ч с ЗЗУ стартом применительно к процессам горения и газификации с оптимизацией режимов.

4. Проведены экспериментальные исследования по воздушной и паровоздушной газификации механоактивированных углей микропомола с ЗЗУ и плазменным стартом, и приведены сопоставления с расчётными данными.

5. Изучены процессы воспламенения, горения и газификации механоактивированного угольного топлива различной степени метаморфизма в вихревом горелочном устройстве тепловой мощностью до 5 МВт при различных избытках воздуха, расходах топлива и условиях зажигания; проведено исследование устойчивости горения пылеугольного факела в холодном пространстве и проведено сравнение с расчетными моделями.

6. Разработана и создана единственная в России экспериментальная электроплазменная установка для газификации органических отходов производительностью 10-20 кг/ч. Показано, что углеродсодержащие отходы являются возобновляемым энергетическим сырьем, а их переработка в плазме методом высокотемпературной газификации обеспечивает получение высококалорийного топливного газа для сжигания в электрогенерирующих агрегатах.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Показаны принципиальные и технологические возможности повышения химической активности углей различной стадии метаморфизма при их механоактивационном измельчении.

2. Исследования на укрупненных стендах позволяют разрабатывать системы безмазутного розжига и стабилизации горения пылеугольного факела, а также схемы и технические решения по замещению высокорекреакционного топлива механоактивированным углем микропомола в объектах энергетики.

3. На котле ПК-40-1 ст. № 6Б Беловской ГРЭС ОАО «Кузбассэнерго» производительностью 320 т пара / ч проведены первые демонстрационные испытания по замещению газа и мазута углем микропомола в процессе розжига котла.

4. Полученные данные по воспламенению, горению и газификации пылевзвеси углей 2-х ступеней помола (механоактивированного и после ШБМ) в двухступенчатом горелочном устройстве производительностью до 1 т/час позволяют выдать рекомендации по созданию двухступенчатых горелочных устройств для розжига и подсветки пылеугольного факела в котельных установках с минимальными расходами на микропомол.

5. Результаты термодинамического анализа газификации углеродсодержащих отходов свидетельствуют об определяющем влиянии температуры на технологию

процесса. Показано, что оптимальной температурой паровой и воздушной газификации является 1600 К.

Результаты исследований, по газификации отходов, используются в ОАО «Сибирский завод электротермического оборудования» (ОАО «Сибэлектротерм»).

#### **Методология и методы исследования:**

Значительное внимание было уделено моделированию технологических процессов воспламенения, горения и газификации механоактивированных твердых топлив. Результаты численных исследований в достаточной мере соответствуют экспериментальным данным. Разработана методика экспериментальных исследований по воспламенению, горению и газификации пылевзвеси углей 2-х степеней помола (механоактивированного и после ШБМ) в горелочных устройствах производительностью до 500 кг/час с плазменным и ЗЗУ стартом применительно к процессам газификации во 2-й ступени камеры газификации с оптимизацией расходов углей 2-х степеней помола.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты исследования воспламенения и горения механоактивированного угольного топлива различной степени метаморфизма при одно - и двухступенчатой схеме сжигания на экспериментальных стендах тепловой мощностью до 5 МВт.

2. Результаты исследования воздушной и паровоздушной газификации механоактивированного угольного топлива с газовым или плазменным стартом.

3. Результаты исследования высокотемпературной (плазменной) газификации углеродосодержащих отходов на экспериментальной электроплазменной установке с получением синтез-газа.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международной конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2013, 2014), всероссийской школе - семинаре молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидро-газодинамики» (Новосибирск, 2014, 2016), международной конференции «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла» (Москва, 2014, 2016), всероссийской конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи», всероссийской конференции «Горение твердого топлива» (Новосибирск, 2015), всероссийской конференции «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2015), международной конференции «Минский международный форум по тепломассообмену» (Минск, 2016), всероссийской конференции «Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием» (Екатеринбург, 2016), всероссийской конференции «Научно-практическая конференция Минобрнауки РФ по прикладным научным исследованиям и экспериментальным разработкам» (Москва, 2016).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ в печатных изданиях, из которых 4 в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 97 наименований, 2 приложений, общий объем диссертационной работы составляет 154 страницы, 46 Рисунков, 27 Таблиц.

**Личный вклад автора** Работа выполнена под научным руководством д.т.н., профессора А.П Бурдукова. Ему принадлежит постановка задач, анализ и обсуждение результатов. Основная часть работы автором выполнена самостоятельно. Им задана установка на модернизацию и оснащение экспериментальных укрупненных стендов, проведены эксперименты, проверка, сопоставление и обобщение результатов исследований, обработка результатов и подготовка материалов к публикации. Все результаты, имеющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура и объем диссертационного исследования.

**В первой главе** выполнен анализ теоретических и экспериментальных работ по сжиганию и газификации угольного топлива и органических отходов. Приведено современное состояние технологий интенсификации механохимических и плазмохимических процессов газификации и горения. Показано, что уголь и углеродосодержащие отходы являются одними из самых распространенных среди энергетических ресурсов топлив и разработка новых перспективных технологий их использования является важной научной задачей. Элементный состав и энергетические характеристики углей и отходов показывают, что они подчиняются одинаковым зависимостям теплоты сгорания от содержания углерода и водорода.

Основными методами повышения энергоэффективности сжигания топлив является их механическая и плазменная активация. Имеется значительный научно-технический прогресс в изучении данных технологий. Однако остаются не исследованными диффузионно-кинетические процессы, протекающие при горении и газификации топлив, подвергнутых данным активационным воздействиям. Для исследований механо- и плазмохимических технологий интенсификации процессов горения и газификации твердого углеродосодержащего топлива необходима экспериментальная база, оснащенная современным оборудованием диагностики и разработанная методическая база для проведения исследований. Для уничтожения/утилизации органических отходов производства и потребления одним из наиболее эффективных способов утилизации является высокотемпературная (плазменная) технология. Наиболее распространенная в настоящее время огневая переработка органических отходов обладает набором негативных явлений для окружающей среды и человека.

По результатам анализа литературных данных и выше перечисленных проблем сформулированы задачи настоящего исследования.

**Во второй главе** описаны экспериментальные огневые стенды тепловой мощностью 1 и 5 МВт, существующие в ИТ СО РАН и модернизированные под поставленные задачи, использованные в работе.

В разделе 2.1 описан тепловой стенд мощностью 1 МВт (Рисунок 1), стенд укомплектован двумя высоконапряженными

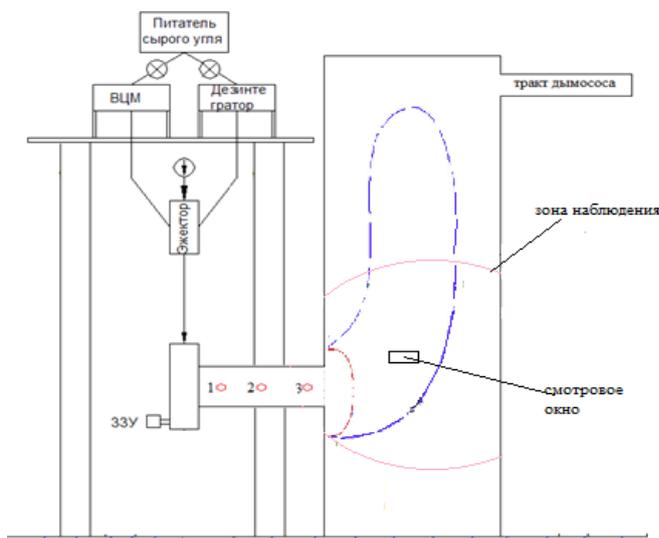


Рисунок 1 - Тепловой стенд мощностью до 1 МВт

мельницами виброцентробежного и дезинтеграторного типа, предназначенными для изучения влияния измельчения на процесс горения и газификации твердых топлив.

Уголь подается через шнековый питатель в высоконапряженное измельчительное устройство типа дезинтегратор или ВЦМ, где измельчается до угольной пыли среднего размера порядка 40 мкм. Угольная пыль из мельницы подается в смесительную камеру эжектора, где происходит смешение с потоком воздуха. Воздух подается воздуходувкой и регулируется частотным преобразователем; расход контролируется с помощью расходомерной шайбы. Образованная

пылевоздушная смесь подается в улиточный вход квадратного сечения, где пылевоздушный поток закручивается и воспламеняется с помощью запального защитного устройства (ЗЗУ) с подачей пропана, встроенного в улиточный завихритель. Пропан подается через ротаметр марки «Aalborg». Закрученный поток газов и угля поступает в камеру сгорания диаметром 155 мм и длиной 1,1 м, где замеряется его температура и отбирается проба газа для анализа. Затем поток поступает в камеру дожигания, в которой происходит дожигание угольных частиц. Регулированием количества подаваемого воздуха и угля создается возможность работы в режимах с различными коэффициентами избытка воздуха, в том числе в режиме газификации. В дальнейшем недогоревшее топливо дожигаются в котле, после которого установлены центробежно-барботажный очиститель газа и дымосос.

Температура и состав газов по длине горелочного устройства контролируется термопарами и специальным многокомпонентным газоанализатором.

В разделе 2.2 рассматривается тепловой стенд мощностью до 5 МВт, на котором предусмотрен одно- и двухступенчатый режим работ.

*Одноступенчатая схема работы* предусматривает проведение экспериментальных исследований процессов воспламенения и горения угольного топлива, а также выход в автотермический режим.

Одноступенчатый стенд тепловой мощностью до 5 МВт (Рисунок 2) для исследования горения и газификации пыли микропомола состоит из горелочного устройства, системы топливоподачи, мельницы-дезинтегратора, дымососа и системы золоулавливания. Температура и состав газов по длине горелочного устройства контролируется термопарами и специальным многокомпонентным газоанализатором ТЕСТ-1. Предварительно измельченное топливо с размером частиц не более 5 мм засыпается в бункер угля, после чего шнековым питателем подается в вертикальный транспортер и далее в мельницу-дезинтегратор. Максимальная производительность мельницы составляет 2.5 т/ч. После мельницы готовая пылеугольная аэрозоль поступает в эжектор, где смешивается с дополнительным первичным воздухом и подается через улиточный закручивающий аппарат в камеру горения. Закручивающий аппарат позволяет организовать в камере горения зону обратных токов, необходимую для стабилизации процесса горения угольной пыли в автотермическом режиме. Для воспламенения угольной пыли используется ЗЗУ с пропаном, установленное перед закручивающим аппаратом. Пропан подается через ротаметр марки «Aalborg».

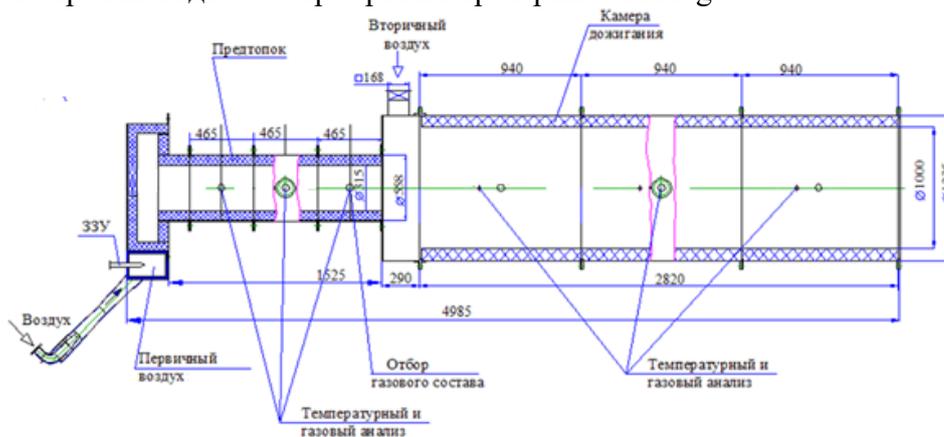


Рисунок 2 – Одноступенчатый тепловой стенд мощностью до 5 МВт

*Двухступенчатая схема работы* позволяет существенно сократить расходы на приготовление угля микропомола и количество растопочных горелок, поскольку во вторую ступень подается топливо от штатной мельницы котла с различным соотношением, в зависимости от реакционных свойств используемого топлива, т.е.

имеется возможность в несколько раз увеличить мощность растопочной горелки по сравнению с одноступенчатым сжиганием (Рисунок 3).

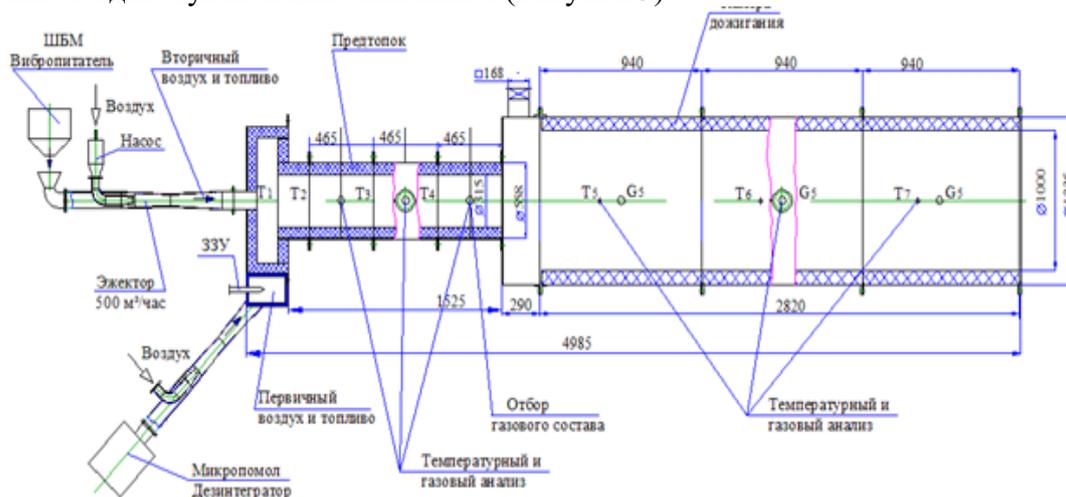


Рисунок 3. - Модифицированный тепловой стенд 5 МВт с двухступенчатой подачей угольного топлива

Воспламенение пылевзвеси осуществляется стандартным прибором (ЗЗУ), используемым при воспламенении топлива в газо-мазутных котлах. Воспламенение и горение угля микропомола реализуется в трех - секционной камере реагирования общей длиной 1510 мм с внутренним диаметром 315 мм, футерованной изнутри огнеупорным материалом. Догорание пылевзвеси происходит в футерованной камере дожигания диаметром 1000 мм и длиной 2800 мм. Продукты сгорания, смешанные с охлаждающим воздухом через горизонтальный циклон и дымосос, выбрасываются в атмосферу.

Расход газа измеряется расходомерами, температура – платино-платинородиевыми термопарами. Питатель угля позволяет регулировать расход в пределах  $50 \div 1000$  кг/ч. Из бункера пыль вибропитателем подается на вход эжектора и затем в виде пылевоздушной струи по оси камеры сгорания, смешивается с факелом пыли микропомола. Система позволяет исследовать процессы воспламенения, горения и газификации в двухступенчатом режиме.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования воспламенения, горения и газификации механоактивированной угольной пылевзвеси различной степени метаморфизма.

В реальном процессе воспламенения и горения частиц в пылеугольном факеле в топке котла, где реализуются переменная температура частиц топлива при их движении в потоке, полифракционный размер частиц (на стадиях выделения и горения летучих и догорания коксового остатка), возможно изменение режима горения от внутри кинетического до внешнего диффузионного. Детальное экспериментальное исследование всех стадий процесса горения полидисперсных частиц представляется достаточно сложной задачей. Для увеличения скорости сгорания частиц угля следует повышать температуру процесса в кинетических режимах и уменьшать диффузионное сопротивление в диффузионных режимах. Повышение температуры сопряжено с рядом технологических и экологических проблем, связанных с материаловедением, плавкостью золы, образованием окислов азота и т.д. В реальных топочных устройствах максимальная температура в объеме не превышает 1500-1700 °С.

Для изучения процессов, протекающих при воспламенении, горении и газификации механоактивированных углей микропомола различных стадий метаморфизма, было проведено экспериментальное и численное моделирование на экспериментальных стендах до 5 МВт.

## Исследование горения и газификации угольного топлива измельченного на высоконапряженных мельницах типа дезинтегратор и виброцентробежной мельнице на тепловом стенде 1 МВт

Для определения влияния различных способов высоконапряженного измельчения на воспламенение, горения и газификацию угля, проводились эксперименты на тепловом стенде 1 МВт (Рисунок 1). Для измельчения использовались мельницы – виброцентробежного и дезинтеграторного типа.

Эксперименты проводились на Переясловском буром угле (ЗБР), данные по техническим характеристикам которого приведены в Таблице 1.

Таблица 1 Характеристика Переясловского бурого угля (ЗБР)

Типы углей	W <sub>r1</sub> , %	Ar , %	S <sub>d1</sub> , %	V <sub>a</sub> , %	Q <sub>daf</sub> , ккал/кг
ЗБР	26,0	5,3	0,27	47,0	6900

Анализ данных по скорости воспламенения и горения пылеугольного факела, представленных на Рисунках 4, 5, а также общий вид факела одного и того же по степени метаморфизма бурого угля (Рисунок 6) при разных способах помола существенно различны. Факел на угле

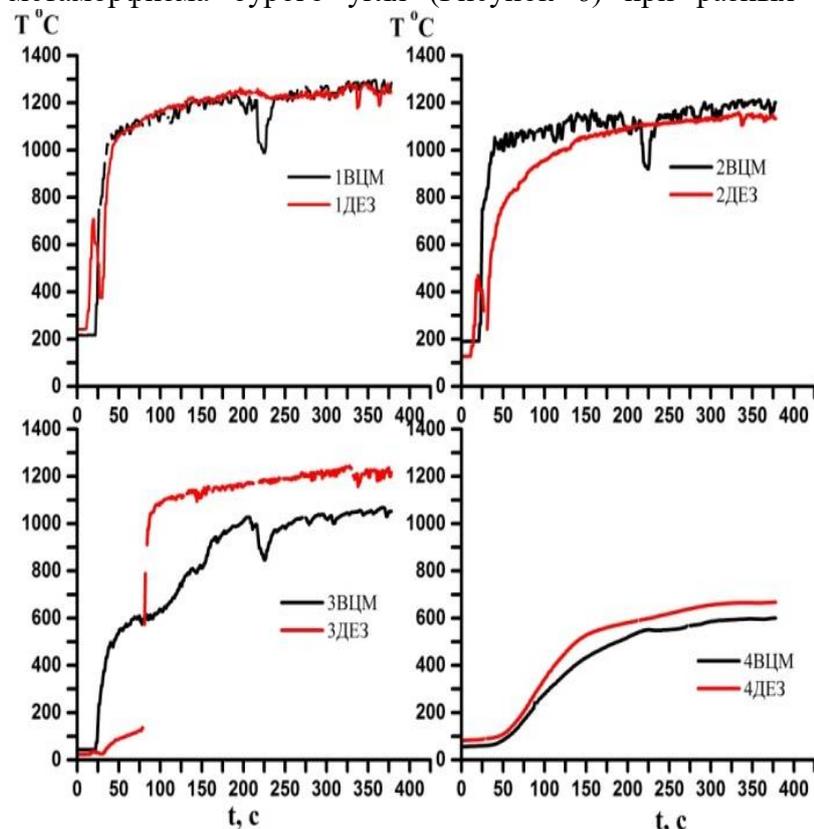


Рисунок 4 - Распределение температуры по длине в зависимости от времени на стенде 1 МВт при сжигание угольной пыли, измельченной на мельнице - дезинтеграторе и на ВЦМ

°С. Значения температур в точке Т2 для углей после ВЦМ на 50 сек уже достигало 1000 °С, а после дезинтегратора наблюдался равномерный прогрев до температуры 1000 °С в течение 150 сек. Максимальная температура угля после дезинтегратора в точке Т3, расположенной на расстояние 800 мм от торца заверителя, выше на 200 °С, чем в эксперименте с ВЦМ. В камере дожигания температура в эксперименте с дезинтегратором на 100 °С выше, чем в эксперименте с ВЦМ.

после помола в дезинтеграторе по основным параметрам близок к газовому, т.е. видна очевидная реальность замещения газа и мазута углем микропомола.

Эксперимент проводился при одинаковых условиях инициирования пылеугольной смеси после мельницы, время работы ЗЗУ составляло 110 сек, после чего газ отключался и горение протекало в автотермическом режиме на угле, измельченном на дезинтеграторе и ВЦМ. Расход угля составлял 30 кг/ч, коэффициент избытка воздуха 0,54.

На термопаре Т1, расположенной на расстоянии 300 мм от торца завихрителя, значения температур после мельниц близки, в обоих случаях спустя 120 сек температура достигала 1200

В эксперименте с измельчением угля на дезинтеграторе значение  $H_2$  - 1,8 об.% и  $CO$  - 8 об. %, при измельчении в ВЦМ значения  $H_2$  - 0,6 об.% и  $CO$  - 4 об. %. Видно, что присутствуют скачки концентраций кислорода в случае с ВЦМ, что свидетельствует о нестабильном горении.

При исследовании горения механохимически обработанных образцов угля было

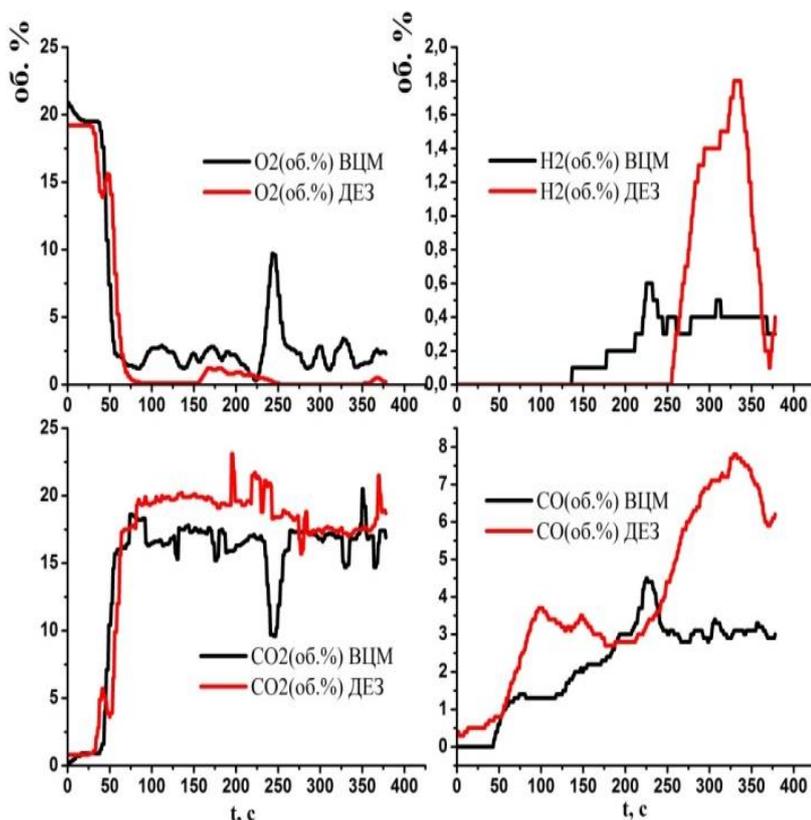
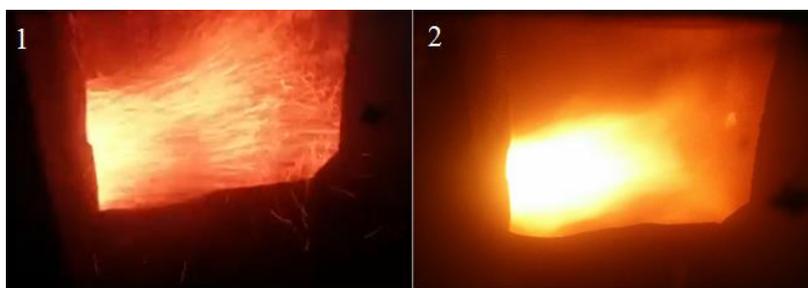


Рисунок 5 - Распределение концентраций газов по длине в зависимости от времени на стенде 1 Мвт при сжигание угольной пыли, измельченной на мельнице - дезинтеграторе и ВЦМ

Поскольку параметры факела являются основными характеристиками, определяющими конструкцию теплогенераторов, изучение физико-химических причин



1 - ВЦМ; 2 - Дезинтегратор

Рисунок 6 – Вид факела при горении угля после измельчения на различных мельницах

обнаружено, что при прочих равных условиях параметры факела, а именно, размеры и распределение температурных зон сильно зависят от того, на оборудовании какого типа проводилась обработка. В частности, обработка примерно до одинаковой степени дисперсности на механических мельницах-активаторах со стесненным ударом (виброцентробежная мельница-активатор ВЦМ) и в мельницах со свободным ударом (дезинтегратор) приводила к различным параметрам факела.

В результате опытов на укрупнённом стенде по сжиганию углей различных стадий метаморфизма, механоактивированных при помоле на виброцентробежной мельнице и дезинтеграторе, было установлено, что при почти не отличающемся спектре размеров частиц скорость выгорания частиц в факеле после мельницы дезинтеграторного типа выше.

обнаруженного явления является актуальным. С другой стороны, создание на основе механохимического явления способа управления параметрами факела также открывает новые технические перспективы. В дальнейших экспериментах проводились исследования влияния механоактивированного угольного топлива после мельницы -дезинтегратора на

процессы воспламенения, горения и газификации, поскольку степень активации в дезинтеграторе выше.

### **Исследование горения и газификации механоактивированного угольного топлива различной степени метаморфизма на стенде 5 МВт.**

Эксперименты проводились на полупромышленном стенде тепловой мощностью 5 МВт. В процессе всего эксперимента измерялись температуры по всей длине экспериментального стенда и проводился газовый анализ на выходе из камеры сгорания. В Таблице 2 приведены характеристики исследуемых углей.

Таблица 2 – Характеристики кузнецких углей марки Г и СС

Каменный уголь, Марка	W <sub>rl</sub> , %	Ar , %	S <sub>dl</sub> , %	V <sub>a</sub> , %	Q <sub>daf</sub> , ккал/кг
1. Г	19.0	14.3	0.30	43.5	7327
2. СС	7,0	13,5	0.30	27,5	8180

Угольная крошка размером до 1 мм или пыль после ШБМ подаётся в бункер, затем через дозатор поступает в мельницу тонкого помола и после помола поступает в воронку, из которой с помощью транспортирующего воздуха эжектором подается в улиточный завихритель пылеугольной горелки, где в дальнейшем инициируется воспламенение и горение пылевзвеси в условиях недостатка воздуха в муфельизированной камере сгорания, т.е. происходят воспламенение и частичная газификация угля с выходом летучих веществ (СО и Н<sub>2</sub> и др.). Высокореакционная горючая смесь после частичной газификации поступает в камеру дожигания, где смешивается с вторичным воздухом, поступающим тангенциально. Эксперименты проводились при избытках воздуха  $\alpha = 0,5; 0,7$  и мощности газового запального устройства 50 кВт. В течение всего эксперимента замерялась температура и проводился газовый анализ продуктов сгорания. Трубка забора газа располагалась в конце камеры сгорания, забор осуществлялся в центре сечения камеры. В ходе испытаний определялось минимальное время выхода в автотермический режим горения, время замерялось от начала подачи механоактивированного угольного топлива в камеру сгорания до отключения растопочного газа.

В работе представлены первые эксперименты по исследованию воспламенения, устойчивого автотермического горения и воздушной газификации углей двух стадий метаморфизма – газового и СС.

Результаты эксперимента по воспламенению и газификации каменных углей марки Г и СС представлены на Рисунке 7.

Эксперимент проводился следующим образом. Через 100 сек. после начала подачи пылевзвеси газового угля в камеру с работающим запальным газовым устройством (ЗЗУ) производилось отключение газа и процесс горения пылевзвеси протекал в автотермическом режиме. При работе с углем СС выход на автотермический режим осуществлялся через 240 сек. После выхода на стационарный режим по температуре в камере сгорания проводились основные температурные и газоаналитические измерения.

Во всех случаях реализуется полное выгорание О<sub>2</sub>, т.е. на 3 калибрах происходит выгорания 50 - 70 % угольного топлива. Когда О<sub>2</sub> достигает ~ 3%, концентрации СО и Н<sub>2</sub> начинают увеличиваться. Концентрация СО<sub>2</sub> растёт и имеет максимум при полном выгорании О<sub>2</sub>, в дальнейшем начинает уменьшаться за счет протекания реакции газификации в углекислом газе.

Изменение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  с 0,7 до 0,5 приводит к увеличению максимальной концентрации Н<sub>2</sub> и СО. В случае с углем марки: Г концентрация Н<sub>2</sub> =4,8 - 6,3% и СО =12,9 - 15,3%. Для угля марки СС Н<sub>2</sub> =6,6 - 9,5% и СО =12,5 - 15,6%; Уменьшение концентрации кислорода влечет за собой рост концентрации NO и СО<sub>2</sub>, при этом СО<sub>2</sub> начинает уменьшаться при 1000 - 1100 °С, а уменьшение концентрации NO происходит при 650 – 750 °С и до 900 – 1000 °С.

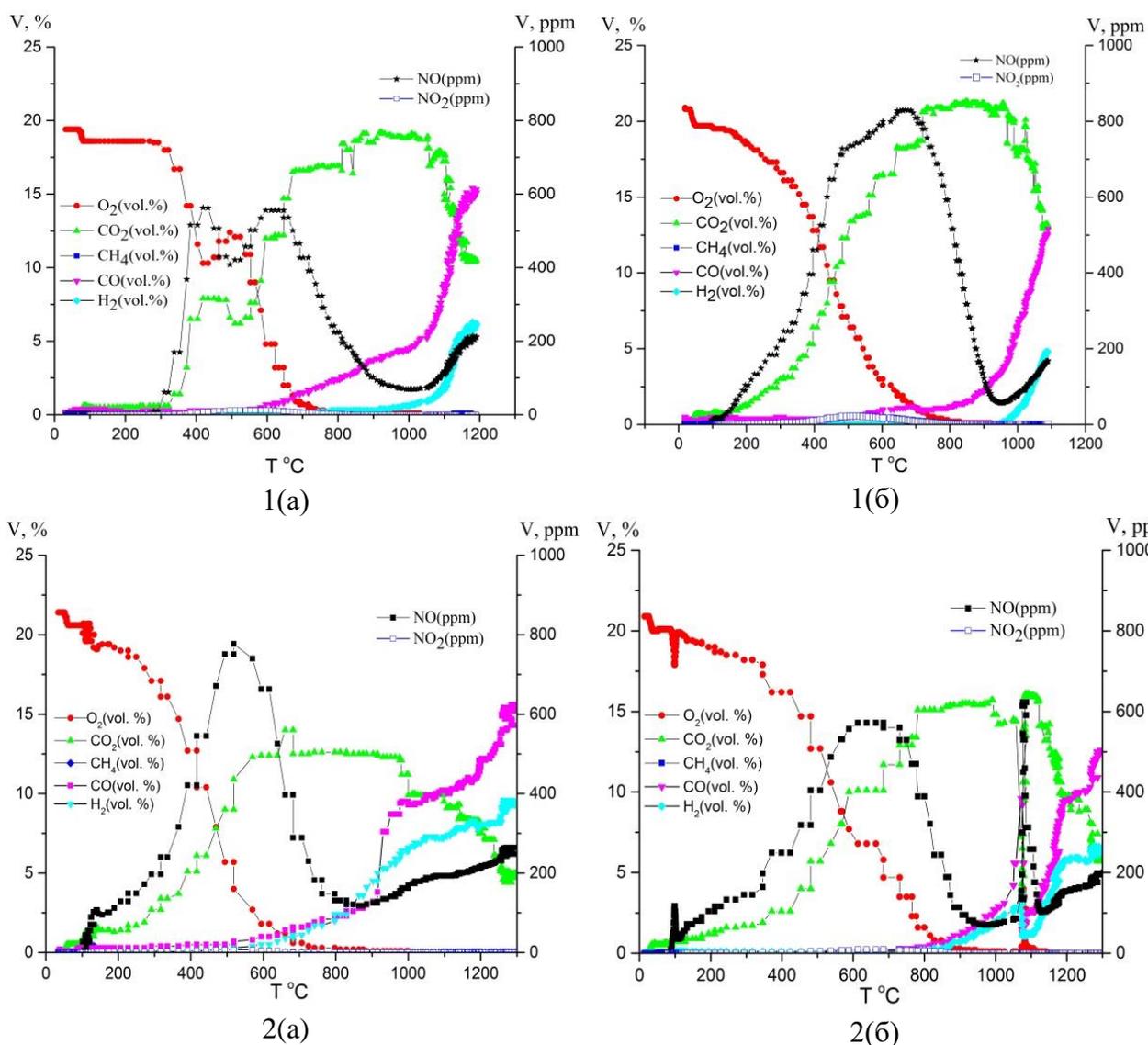


Рисунок 7 – Температурная зависимость концентраций компонентов газовой фазы при газификации механоактивированного каменного угольного топлива марки: 1 – Г, 2 – СС; а –  $\alpha = 0,5$ ; б –  $\alpha=0,7$ ;

Получено устойчивое автотермическое горение пылевзвеси кузнецких углей двух марок – Г и СС в результате их механоактивационного измельчения и поджига газовой горелкой. Результаты исследования воздушной газификации этих углей подтверждают возможность использования процессов механоактивационного измельчения, позволяющего получить приемлемые значения величин  $H_2$  и  $CO$ . Полученные данные по воспламенению и горению механоактивированных углей марки Г и СС позволяют рекомендовать технологию микропомола этих углей для систем безмазутного розжига котельных установок.

Для создания реальных высокоэффективных процессов и устройств газификации углей микропомола необходимы дальнейшие исследования по оптимизации режимных параметров процесса – уровней температур, избытков воздуха, времени пребывания пылевзвеси в реакционной камере и т.д.

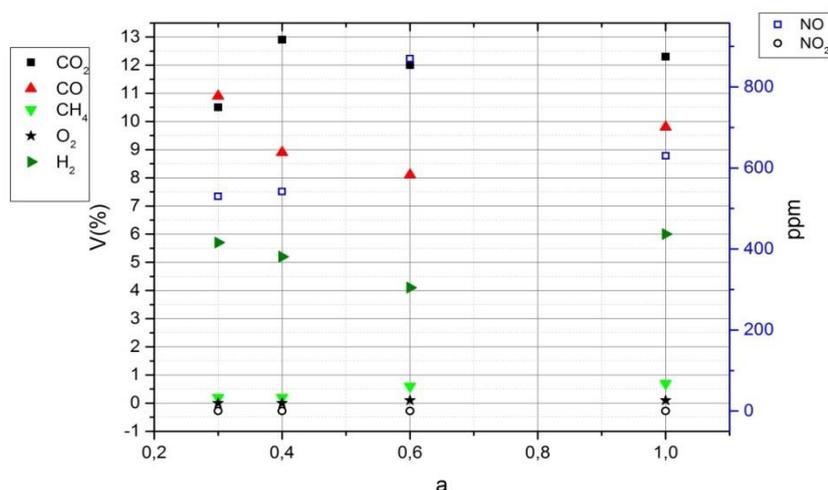
#### **Исследования воздушной газификации углей механоактивированного микропомола с плазменным управлением процесса**

Для проведения исследований процесса газификации использовался экспериментальный стенд 1 МВт с тангенциальным улиточным вводом пылевзвеси угля и воздуха и цилиндрической камерой реагирования. Эксперименты проводились на угле

кузнецкого месторождения марки Д. Дробленый уголь питателями подается в дезинтегратор, откуда эжектором с транспортным воздухом поступает в улиточную горелку. Процесс поджига пылевзвеси осуществляется при помощи маломощного ( $N \sim 10$  кВт) плазмотрона. Расход угля составлял 17 кг/ч, контролируется по показаниям датчиков напряжения на питателях на основании предварительной тарировки. Коэффициент избытка воздуха в реакционной камере изменяется в пределах 0.3-1, т.е. проводится исследование всех режимов – воспламенение, горение, газификация на углях, подвергнутых различным методам измельчения.

В процессе всего эксперимента максимальная температура в центре реакционной камеры достигала 1250 °С. При этом температура после тангенциального улиточного ввода не превышала 750 °С, температура в конце реакционной камеры - 1000 °С. Температура практически не зависит от изменений расхода воздуха, т.е. после воспламенения пылевзвеси и начала устойчивого горения пылеугольного факела с изменением скорости потока уменьшается время пребывания частиц пылевзвеси в камере, что компенсирует рост тепловыделения с увеличением  $\alpha$  в объеме камеры и не приводит к заметному росту температуры потока. Этот же эффект влияет на изменение концентрации СО за счет реакции восстановления  $CO_2$ , т.к. последняя требует большего времени по сравнению с реакцией окисления углерода, протекающей с большой скоростью.

Следует отметить, что концентрация кислорода на выходе из камеры при всех  $\alpha$  близка к нулю, т.е. на всех этапах горения кислород расходуется полностью (Рисунок 8). Концентрация окисла углерода в зависимости от коэффициента избытка воздуха изменялась в пределах 12 - 15%, а водорода – 7.5 - 10%, причем концентрация СО с ростом  $\alpha$  снижается, а водорода – возрастает, при этом концентрация  $CO_2$  с ростом  $\alpha$  уменьшается с 12 до 10%. Отмеченные эффекты связаны с изменением температуры, а также временем пребывания пылевзвеси угля в камере реагирования.



мощность плазмотрона 10 кВт;  $\alpha = 1, 0.6, 0.4, 0.3$ ;

Рисунок 8 - Состав газа при воздушной газификации углей механоактивированного микропомола с плазменным управлением процесса

Исследования процессов воздушной газификации выполнены в режиме тестовых экспериментов и показали работоспособность предлагаемых схем. Полученные концентрации СО и  $H_2$  в продуктах газификации позволяют анализировать возможности оптимизации процессов с помощью выбора оптимальных тепловых и аэродинамических характеристик процессов с изменением соотношений расходов топлива, измельчения, уровней температур в реакционной камере, времени пребывания в ней угольных частиц и т.д.

С использованием пакета программ SigmaFlow расчетной группой под руководством Чернецкого М.Ю., были проведены расчеты воздушной газификации углей

механоактивированного микропотола с плазменным управлением процессом. Адаптация комплексной математической модели по данным экспериментальных исследований была проведена на основе газификации угольного топлива, измельченного в дезинтеграторе при коэффициенте избытка воздуха равным 0.6. Можно видеть (Таблица 3), что наблюдается удовлетворительное соответствие с результатами эксперимента.

Таблица 3 – Состав газов на выходе из камеры второй ступени при коэффициентах избытка воздуха  $\alpha=0.6$

Состав газа (% об.)	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Экспериментальные данные	0.5	8	4	-	12	-	0
Расчетные данные	0.6	6.3	3.1	9	15	66	0

### Экспериментальное и численное исследование паровоздушной газификации механоактивированного угля

Эксперименты по паровоздушной газификации механоактивированного угольного топлива проводились на 1 МВт тепловом стенде. Фракционный состав пыли угля, полученной на мельнице-дезинтеграторе, определён оптически-цифровым методом в диапазоне диаметров частиц 0 - 180 мкм. Максимальный размер частиц не превышал 70 мкм.

Подача пара в камеру осуществлялась через сопло из нержавеющей стали диаметром 32 мм с толщиной стенки 2 мм, размещённое по центру улиточного завихрителя и имеющее возможность перемещения вдоль оси установки. Сопло погружалось внутрь установки до 150 мм. Такое расстояние соответствует расположению выходного сечения сопла в начале камеры газификации. При меньшем расстоянии пар поступает в улиточный завихритель, что снижает стабильность воспламенения вновь подаваемого угля из-за снижения температуры в завихрителе. Большее расстояние снижает время контакта пара с реагирующей смесью в камере реагирования и степень реагирования водяного пара.

Эксперимент включал следующие этапы.

1. Предварительный разогрев завихрителя с помощью ЗЗУ.
2. Выход на автотермический режим работы установки при расходе угля 20 кг/ч с коэффициентом избытка воздуха 0,9 (режим 1 - неполное сгорание).
3. Уменьшение коэффициента избытка воздуха от 0,9 до 0,4 путём снижения расхода воздуха с 90 до 40 м<sup>3</sup>/ч (режим 2 - воздушная газификация).
4. подача пара с температурой 200°C и расходом 4,7 кг/ч (режим 3 - паровоздушная газификация).
5. Увеличение расхода пара до 10 кг/ч (режим 4 – паровоздушная газификация).
6. Выключение установки.

Экспериментальные результаты представлены в Таблице 4. Температура и состав газа соответствуют точке Т<sub>3</sub>.

Таблица 4 - Результаты экспериментов

№	$\alpha$	Расход пара, кг/ч	T <sub>3</sub> , °C	O <sub>2</sub> , об. %	H <sub>2</sub> , об. %	CO <sub>2</sub> , об. %	CO, об. %	CH <sub>4</sub> , об. %	Q <sub>сг</sub> сухого газа, МДж/м <sup>3</sup>
1	0,9	0	1200-1250	1,08	0,86	16,05	2,94	0	0,46
2	0,4	0	1200-1250	1,07	1,89	15,9	6,28	0,02	0,99
3	0,4	4,7	1180-1200	1,05	3,08	15,43	8,75	0,02	1,44
4	0,4	10	1000-1100	0,97	4,2	14,09	9,69	0,04	1,68

Благодаря высокой величине  $\alpha=0,9$  первый режим характеризуется постепенным ростом температуры во всех точках замера. При переходе ко второму режиму (снижению  $\alpha$  до 0,4) температуры, измеряемые термопарами, незначительно снижаются. Подача пара (режим 3) ещё сильнее уменьшает показатели температуры, но через 5 минут они достигают своих максимальных значений. При увеличении расхода пара до 10 кг/ч (режим 4) температура существенно снижается.

В рамках совместной работы с расчетной группой Уральского Федерального Университета под руководством д.т.н., проф. А.Ф. Рыжкова по газификации углей микропомола проводилось численное моделирование. В данной работе используется ранее разработанная CFD-модель поточной газификации твёрдого топлива.

Сравнение результатов термодинамического расчёта с экспериментальными данными приведены на Рисунке 9 – 11.

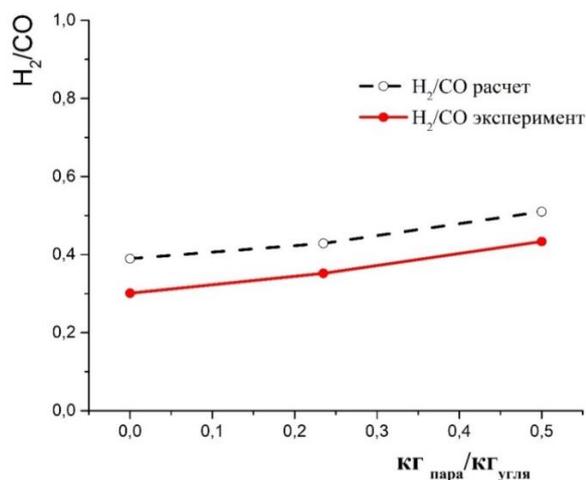


Рисунок 10 - Результаты термодинамического расчёта работы экспериментальной установки. Отношение концентраций H<sub>2</sub>/CO

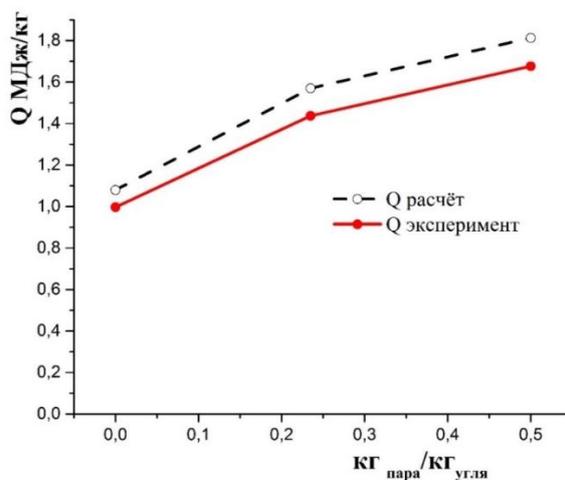


Рисунок 11 - Результаты термодинамического расчёта работы экспериментальной установки. Теплота сгорания синтез-газа

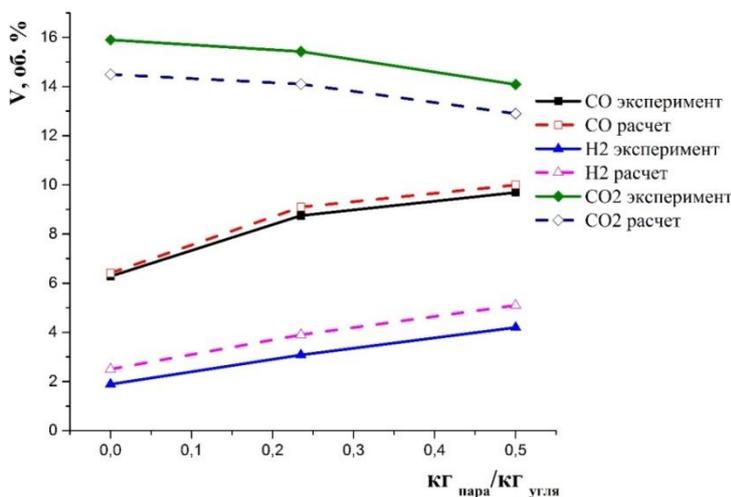


Рисунок 9 - Результаты термодинамического расчёта работы экспериментальной установки; концентрация компонентов сухого синтез-газа;

Численное моделирование учитывает недогорание углерода и нереагирование определённого количества водяного пара. Эти 2 аспекта позволяют расчётным путём получать результаты по составу синтез-газа, близкие к экспериментальным данным. Степень выгорания углерода экспериментальной установки относительно мала (45-60%), что соответствует режиму частичной газификации из-за недостаточной начальной температуры реагирующих сред, и малого времени пребывания.

### Двухступенчатое сжигание и газификация угля

Двухступенчатая горелка – реакционная камера является новым шагом в развитии технологии сжигания и газификации пылеугольных топлив. В данном разделе приведены результаты первых экспериментов в этом направлении на углях Кузнецкого месторождения марки ДР. Эксперименты проводились на установке (Рисунок 3) с практически соосной подачей топлива после дезинтегратора и штатной мельницы, где взаимодействие факела угля микропомола и после штатной мельницы не оптимально. По расчетам при такой схеме перемешивание происходит на расстоянии более 8-10 калибров канала, в экспериментах реализовалось быстрое воспламенение факела после смешивания потоков с достижением максимальной температуры 1300 – 1400 °С уже во второй и третьей секциях реакционной камеры при избытке воздуха в первой ступени  $\alpha = 0,9 \div 1,1$ .

При этом в процессе розжига при подаче угля микропомола в течение 150 - 200 секунд процесс горения выходит на автотермический режим. При подаче угля, полученного измельчением после штатной мельницы котлоагрегата процесс горения на 350 секунде после незначительного падения температуры в конце третьей секции предтопка выходит на стационарный режим на уровне 1400 °С.

Анализ газа показывает, что в конце камеры реагирования происходит практически полное выгорание кислорода, а концентрация СО и Н<sub>2</sub> - 16 и 8 % соответственно, т.е. реализуется процесс воздушной газификации.

При этом при подаче вторичного воздуха с  $\alpha > 1$  будет реализовываться стационарное двухступенчатое горение пылевзвеси углей, что позволит обоснованно подойти к созданию горелочных устройств для розжига и подсветки пылеугольного факела в котлах с минимизацией расходов на доизмельчение и активацию угля при создании безмазутных систем розжига и стабилизации горения.

Большой интерес представляет исследование процессов воздушной и паровоздушной газификации с использованием механоактивированных углей микропомола в одно – и двухступенчатых по приготовлению угольной пыли системах.

На Рисунках 12 представлены результаты двухступенчатого сжигания и газификации угля.

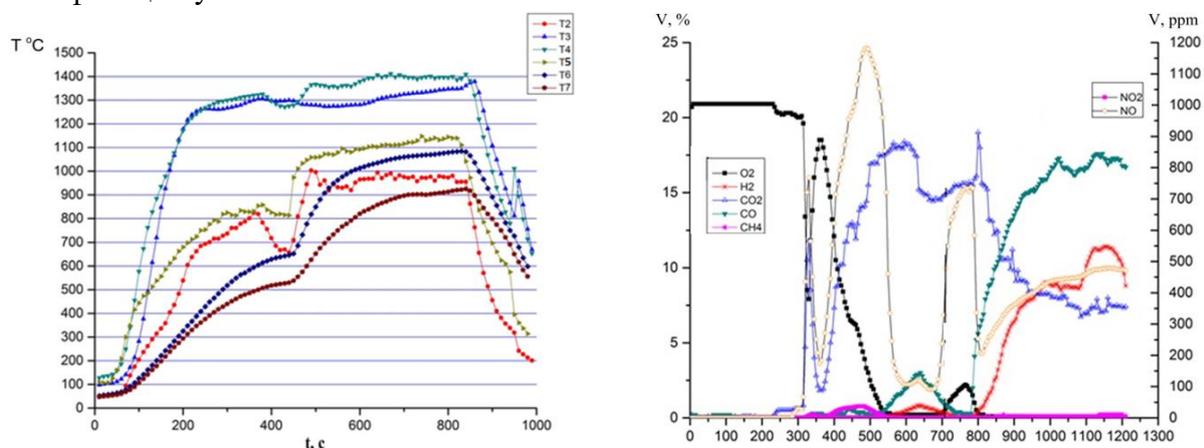


Рисунок 12 – Изменение температуры и концентрации газов в процессе воздушной двухступенчатой газификации угля

Процесс воспламенения пылевзвеси при ее подаче в камеру сгорания после включения газовой горелки ЗЗУ реализуется в течение 100 – 150 сек с выходом на

устойчивый режим горения на уровне 1300 °С. При подаче угля стандартного помола происходит кратковременное снижение температуры с выходом через 150 сек на стационарный уровень 1400 °С.

Рассмотрение газового анализа в данном эксперименте (Рисунок 13) подтверждает предполагаемый механизм протекающих процессов: после воспламенения факела механоактивированной пылевзвеси. Происходит падение до нуля концентрации кислорода с ростом до максимального значения концентрации CO<sub>2</sub>, которая постепенно снижается при подаче в камеру реагирования угля после штатной мельницы, достигает в процессе устойчивой газификации уровня порядка 10 %. При этом концентрации CO достигает уровня 12 % а H<sub>2</sub> равен 7,5 %.

Эти данные, естественно, не оптимальны, судя по характеру протекания процесса из анализа температур и концентрации газа. Для достижения максимальных уровней получения горючих компонент продуктов газификации необходимы дальнейшие исследования по оптимизации геометрических характеристик реакционной камеры, совершенствование системы смесеобразования двух пылеугольных потоков, а также оптимизации режимных параметров процесса.

### **Оценка эффективности Проекта по переводу котла ПК – 40 -1 Беловской ГРЭС ОАО «Кузбассэнерго» с мазутной системы розжига и подсветки на технологию замещения механоактивированным углем микропомола**

Рассматривается перевод 1-го корпуса котла ПК – 40 -1 производительностью 320 т пара /час с мазутного розжига и подсветки на безмазутную с применением технологии механоактивированного микропомола угля.

- Принципиальная схема технологии механоактивированного микропомола угля для розжига и подсветки пылеугольного факела предусматривает следующее дополнительное оборудование:
- устройства механоактивированного микропомола угля до 15 – 40 мкм - мельницы-дезинтеграторы ДМ-2 (3 шт., в т.ч. 1 резервная на 2 корпуса) производительностью 2 тнт/ч с удельными затратами электроэнергии на микропомол 30 кВт/час на 1 тнт;
- нестандартное дополнительное оборудование:
  - муфелизированные горелки (2 шт.);
  - различные узлы для подвода и подачи угольной пыли и воздуха.

Эффективность проекта определяется разницей дополнительных единовременных затрат (расходов) и экономии текущих затрат (доходов) при переводе котла с дорогого и дефицитного мазута на более дешевый уголь.

Дополнительные единовременные затраты (расходы) предусматриваются на следующие виды работ:

- переоснащение котла дополнительным оборудованием для организации подготовки микропомола угля и его сжигания;
- проектные работы;
- строительно - монтажные работы;
- шефмонтаж, пусконаладочные и испытательные работы;
- резерв средств на непредвиденные работы и затраты.

Текущими затратами являются:

- затраты на используемый для розжига и подсветки мазут;
- затраты на использование дополнительного объема механоактивированного угля микропомола, замещающего мазут (по тепловому эквиваленту);
- затраты электроэнергии на микропомол замещающего угля в мельницах – дезинтеграторах.

В Таблице 5 в интервале 10 – ти лет приведены показатели коммерческой эффективности Проекта, а на Рисунке 13 изображен финансовый профиль Проекта.

Таблица 5 - Показатели коммерческой эффективности, млн. руб.

Показатели	Всего	Годы										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Объем замещаемого мазута, тыс.тнт	13,3	0,70	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Затраты на мазут, млн. руб	104,2	5,49	10,97	10,97	10,97	10,97	10,97	10,97	10,97	10,97	10,97	10,97
Объем замещающего угля, тыс.т нт	26,2	1,38	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76
Затраты всего, млн. руб.	53,6	21,87	3,60	3,58	3,56	3,55	3,53	3,51	3,50	3,48	3,46	
в т.ч. капитальные	19,5	19,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
дополнительное оборудование для переоснащения котла	11,5	11,50										
проектные работы	1,2	1,20										
строительно-монтажные работы	3,6	3,60										
шефмонтаж, пусконаладочные и испытательные работы	1,2	1,20										
резерв средств на непредвиденные работы	2,0	2,00										
текущие	34,1	2,37	3,60	3,58	3,56	3,55	3,53	3,51	3,50	3,48	3,46	
на замещающий уголь	23,4	1,23	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	
на электроэнергию микропомолы угля	0,1	0,007	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	
амортизация нового оборудования	7,7	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	
налог на имущество	2,9	0,37	0,35	0,33	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,23	0,22	

Чистая экономия, млн. руб.	58,3	-15,62	8,14	8,16	8,18	8,19	8,21	8,23	8,24	8,26	8,28
Дисконтированная чистая экономия, млн. руб.	28,7	-14,20	6,73	6,13	5,58	5,09	4,63	4,22	3,85	3,50	3,19
Кумулятивная чистая экономия, млн. руб.	58,3	-15,62	-7,48	0,68	8,86	17,05	25,26	33,49	41,73	49,99	58,27
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), млн. руб.	28,7	-14,20	-7,47	-1,34	4,24	9,33	13,96	18,19	22,03	25,53	28,73
Индекс доходности (ИД)			<b>2,47</b>								
Внутренняя норма доходности (ВНД), %			<b>51%</b>								
Дисконтированный срок возврата инвестиций, лет			<b>3,24</b>								
Срок возврата инвестиций, лет			<b>2,92</b>								

Как видно из Таблицы, при принятых исходных данных за 10 лет эксплуатации удается обеспечить благоприятные значения показателей эффективности проекта: чистый дисконтированный доход ЧДД- 28,7 млн. руб., Индекс доходности ИД – 2,47, внутренняя норма доходности ВНД – 51%, дисконтированный срок окупаемости (срок возврата инвестиций) – 3,24 года, простой срок окупаемости – 2,92 года

Согласно Методическим рекомендациям по оценке инвестиционных проектов была проведена проверка реализуемости и оценка эффективности Проекта в зависимости от изменения параметров. На Рисунке 14 в виде лучевой диаграммы показано, как процентное изменение таких параметров как цена мазута, цена угля, размер капиталовложений и ставка дисконта влияют на величину ЧДД проекта.

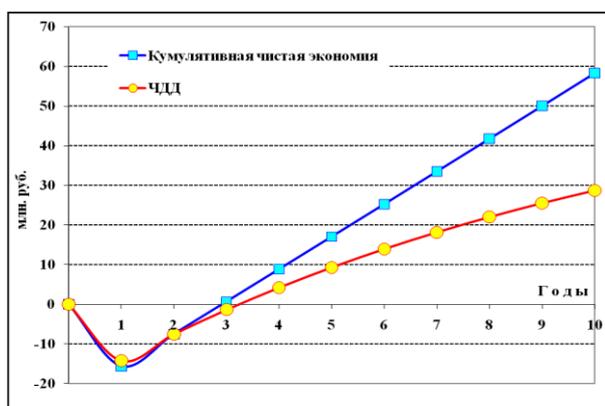


Рисунок 13 - Финансовый профиль проекта

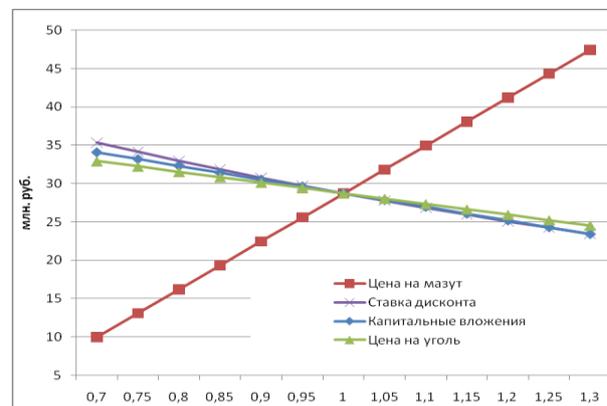


Рисунок 14 - Анализ чувствительности проекта (показатель ЧДД)

Видно, что наиболее сильное влияние оказывает цена на мазут, тогда как изменение цены на уголь и размера капиталовложений сказывается на величине ЧДД незначительно.

Проект «Технология механоактивированного микропомола углей для розжига и подсветки пылеугольного факела на котле ПК – 40-1 Беловской ГРЭС «Кузбассэнерго»», предусматривающий переход с мазутного розжига и подсветки котла на безмазутый с замещением на механоактивированный уголь микропомола может рассматриваться как экономически эффективный. При принятых расчетных данных за 10 лет эксплуатации обеспечиваются благоприятные значения показателей эффективности проекта: доход ЧДД- 28,7 млн. руб., Индекс доходности ИД – 2,47, внутренняя норма доходности ВНД – 51%, дисконтированный срок окупаемости (срок возврата инвестиций) – 3,24 года, простой срок окупаемости – 2,92 года.

#### **Опытно - промышленные испытания.**

С использованием результатов исследований по сжиганию углей микропомола, выполненных на укрупненном стенде ИТ СО РАН тепловой мощностью до 5 МВт при содействии наладочной фирмы ООО «Р.В.С.» (г. Москва) на Беловской ГРЭС ОАО «Кузбассэнерго» проведены первые опытно-промышленные испытания по использованию угля микропомола по технологии ИТ СО РАН для замещения мазута при розжиге котла ПК-40-1ст. 6 Б.

Используемый кузнецкий каменный уголь имел следующие характеристики: влажность рабочая W-12.6%; зольность рабочая A-19.3%; выход летучих на горячую массу  $V_{daf}$ -42.9% низшая рабочая теплота сгорания 5015 ккал/кг. Объем топочной камеры 2100м<sup>3</sup>, топка квадратная 8500÷8500 мм. Корпус котла оснащен 10-ю прямоточными пылеугольными горелками, расположенными в два яруса. Мазутные форсунки (6 шт.) встроены в каналы вторичного воздуха прямоточных горелок. На каждом корпусе котлоагрегата установлена индивидуальная система пылеприготовления с промежуточным бункером пыли емкостью 135 т, откуда пыль подается в пылепровод пыли высокой концентрации (ПВК) и направляется в горелки. На одной из горелок (№18) с помощью запальной системы поджигался подаваемый в горелку мазут, при помощи которого производится поджиг подаваемой от мельницы – дезинтегратора угольной пыли микропомола; после ее воспламенения подача мазута прекращалась.

Исследовались режимы горения пылеугольного факела при подаче от 1.75 до 2.5 т/час угля. Везде наблюдалось устойчивое горение факела. Была проведена также серия испытаний по влиянию расхода вторичного воздуха на размеры и светимость факела.

В целом система по использованию ультратонкой пыли на горелках котла при проведении испытаний проработала 4 часа 20 мин., что соответствует среднему времени растопки корпуса котла. При этом в течение всего времени при различных режимах наблюдался устойчивый факел горения пыли угля микропомола.

Химический анализ золы при сжигании угля микропомола в режиме растопки показал наличие мехнедожога, однако он не взрывоопасен. Полученные результаты в целом являются положительными.

В настоящее время планируются работы по оснащению 4-х горелочных устройств котла ПК-40-1 системами розжига на основе угля микропомола, что позволит провести полномасштабные испытания системы безмазутного розжига и подсветки на реальном энергетическом котле.

**В четвертой главе** представлена электроплазменная безотходная технология и приведены результаты экспериментального исследования лабораторной электроплазменной установки для газификации углеродосодержащих отходов производительностью 10-20 кг/ч.

Электроплазменная газификация является комплексной технологией, включающей в себя все стадии процесса плазменной переработки и утилизации отходов, начиная с

топливоподачи и заканчивая выработкой и очисткой синтез-газа от вредных примесей. Для изучения протекающих при плазменной газификации процессов и отработки технологии создавался высокотехнологичный экспериментальный стенд, включающий: плазменно-термическую электропечь, центробежно-барботажный аппарат (вихревой скруббер), дожигатель дымовых газов, охладитель газов, электрофильтр тонкой очистки, вентиляционную систему. Данный стенд является единственным в России и позволяет всецело подойти к решению задач переработки органических отходов.

Для бесперебойной работы установки требуется надежная длительная работа плазмотрона. В связи с этим был разработан и изготовлен плазмотрон мощностью 50 кВт. В основу конструкции однокамерного плазмотрона заложены медные трубчатые электроды с прямым и обратным уступом с целью расширения зоны выработки металла под действием опорных пятен дугового разряда. Полярность подключения электродов – обратная.

Проведены его экспериментальные исследования с подачей различного расхода плазмообразующего воздуха  $(3\div 6) \cdot 10^{-3}$  кг/с при изменении силы тока от 120 А до 200 А.

На Рисунке 15 представлены экспериментальные вольт-амперные характеристики дуги (ВАХ) в зависимости от расхода плазмообразующего газа. Видно, что, несмотря на наличие ступенчатых электродов, ВАХ дуги имеет падающий вид.

Одним из важных параметров, определяющих эффективность работы плазмотрона, является его тепловой КПД. По величине измеренных тепловых потоков определяется КПД плазмотрона. При этом определяются интегральные тепловые потоки, поступающие в электроды и другие водоохлаждаемые элементы конструкции, не разделяя их на составляющие. Методика измерения тепловых потоков стандартная: необходимо знать расход и перепад температур воды на входе в плазмотрон и на выходе из него.

На Рисунке 16 представлены экспериментальные данные теплового КПД плазмотрона в зависимости от тока дуги  $G=6 \cdot 10^{-3}$  кг/с. С учетом большой поверхности водоохлаждаемых элементов плазмотрона получены величины КПД  $\sim 80\%$ .

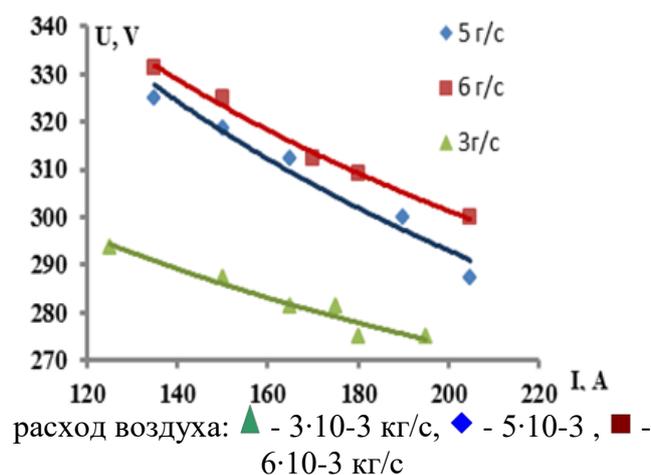


Рисунок 15- Вольт-амперные характеристики дуги плазмотрона.

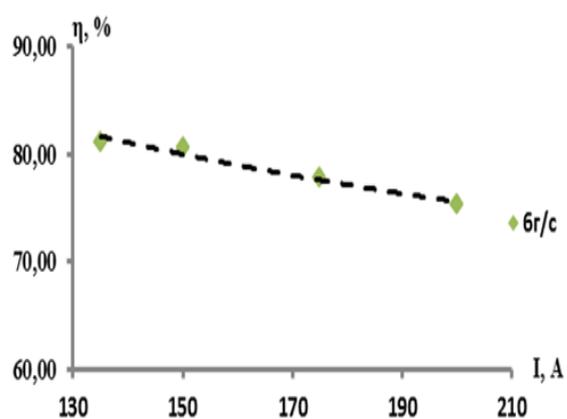


Рисунок 16 - Тепловой КПД плазмотрона в зависимости от тока дуги  $G=6 \cdot 10^{-3}$  кг/с

Экспериментальное исследование высокотемпературной (плазменной) газификации отходов на примере древесных опилок выполнены на лабораторной электроплазменной установке производительностью 20 кг/ч. Целью проведения исследований являются: проверка работоспособности всех элементов установки; достижение заданных параметров электроплазменной установки по производительности отходов и калорийности получаемого топливного газа; оптимизация системы очистки и сжигания отходящих (дымовых) газов.

Для экспериментов были выбраны углеродосодержащие отходы, а именно промасленные древесные опилки (содержание масел – менее 15%), элементный состав которых представлен в Таблице 6.

Таблица 6 - Элементный состав промасленных древесных опилок

Наименование показателя	Массовое содержание показателя, % на рабочую массу							
	C	H	N	O <sub>2</sub>	S	Cl	W	A
Величина	33,5-49,1	4,2-5,15	0,39-0,95	27,45-36,4	Менее 0,05	Менее 0,05	5,1-34,2	0,26-0,85

Предварительно камера разогревалась до 1200 °С газовой горелкой мощностью 42 кВт. Максимальное содержание CO<sub>2</sub> в продуктах горения газовой горелки – 13,8 %. Далее осуществлялась включение плазматрона мощностью 50 кВт, и в последующем поддержание  $t \geq 1200^{\circ}\text{C}$  при газификации осуществляется только плазмотроном. Среднемассовая температура воздушной плазмы, истекающей из плазматрона, составляет 4000 К. Древесные опилки подаются через загрузочный узел в камеру газификации в картонном контейнере размером 0,2\*0,2\*0,2 м<sup>3</sup>. Был установлен расход по отходам 20 кг/ч. Вес одного контейнера составлял 1,3 кг со средней плотностью 162,5 кг/м<sup>3</sup>. В газовом факеле происходила частичная газификация летучих компонентов, далее протекает процесс полной газификации отходов в плазменной струе. На выходе из камеры газификации осуществлялся отбор топливного газа, полученного при газификации древесных опилок Таблица 7.

Таблица 7 - Состав топливного газа

Место отбора газа	Объёмная доля компонентов в топливном газе					
	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Камера печи	3,26	29,60	18,32	13,20	35,62	0
Выход ЦБА	2,15	19,54	12,09	42,7	23,52	0
Дожигатель	8,1	≤50,mg/m <sup>3</sup>	0	20,3	63,5	8,1

Из Таблицы видно, что влажность газа увеличилась в 3,23 раза при прохождении через ЦБА. Осушенный после ЦБА топливный газ может быть использован в качестве топлива. Теплота сгорания, образующегося при переработке отходов топливного газа, находится в пределах  $Q_p=1500-2500\text{ккал/кг}$ , что зависит от состава поступающих отходов.

Полученный, очищенный и охлаждённый топливный газ подавался на сжигание в специальный вихревой дожигатель, где происходит его сгорание с большим избытком воздуха. Продукты горения топливного газа разбавляются большим количеством (до 2500нм<sup>3</sup>/ч) атмосферного воздуха до температуры не более 2000С, проходят через рукавный фильтр для улавливания остаточных механических частиц и сбрасываются в атмосферу.

**В заключении диссертации** сформулированы основные результаты работы:

1. Разработаны, спроектированы и модернизированы тепловые экспериментальные стенды как лабораторного, так и полупромышленного масштаба, оснащенные современным измерительным оборудованием, позволяющие выполнить широкий круг исследований процессов воспламенения, горения и газификации пылевидного твердого топлива.

2. Из анализа литературных данных и в результате экспериментальных исследований установлено, что среди высоконапряженных мельничных устройств оптимально с точки зрения максимального уровня механоактивации, а также возможностей создания промышленных образцов являются мельницы дезинтеграторного типа.

3. Впервые экспериментально исследованы эффекты повышения химической активности при воспламенении и горении механоактивированных углей микропомола различных стадий метаморфизма.

4. Проведены детальные экспериментальные исследования динамики процессов воспламенения и горения механоактивированных углей микропомола. Определены временные границы выхода процесса горения на автотермический режим в зависимости от параметров процесса – температур, расходов топлива и окислителя для углей различной степени метаморфизма на стендах тепловой мощностью до 5 МВт.

5. Получены экспериментальные результаты по воздушной газификации механоактивированного угля микропомола с плазменным управлением процесса и проведено сопоставление с данными численного моделирования. Установлено, что процесс воздушной газификации с плазменным управлением процесса является более перспективным.

6. Для паровоздушной газификации угля установлена зависимость состава и теплоты сгорания синтез-газа от коэффициента избытка воздуха (0,4-0,9) и расхода водяного пара (0-10 кг/ч) в поточном реакторе с различными режимами работы. Численные результаты моделирования близки к экспериментальным данным.

7. На двухступенчатом стенде тепловой мощностью до 5 МВт проведены первые успешные эксперименты по двухступенчатому горению и воздушной газификации на Кузнецком каменном механоактивированном угле марки Д. Соотношение расхода угольного топлива микропомола через первую ступень к расходу после штатной мельницы через вторую ступень составляло 1 к 4 и зависит от реакционных свойств углей. Полученные результаты позволяют рекомендовать двухступенчатую систему, позволяющую снизить затраты на микропомол в системах безмазутного розжига и подсветки.

8. Проведены успешные демонстрационные опытно-промышленные испытания по использованию механоактивированного угля микропомола в системе безмазутного розжига на котле ПК-40-1 производительностью 320 т/ч пара на Беловской ГРЭС ОАО «Кузбассэнерго», показавшие возможность замещения мазутного топлива механоактивированным углем микропомола при розжиге и стабилизации пылеугольного факела в котле. Также проведена оценка эффективности проекта по переводу котла ПК – 40 -1 Беловской ГРЭС ОАО «Кузбассэнерго» с мазутной системы на технологию механоактивированного микропомола углей для розжига и подсветки. Срок возврата инвестиций составил 3,24 года, а срок окупаемости – 2,92 года.

9. Разработана, изготовлена и испытана комплектная экспериментальная электроплазменная установка для экологически чистой и безотходной переработки и утилизации органических отходов с получением высококалорийного синтез-газа для производства электроэнергии производительностью по отходам 10 – 20 кг/ч.

10. Разработан и исследован однокамерный электродуговой плазмотрон со ступенчатыми электродами для нагрева воздуха мощностью 50 кВт и ресурсом работ 500 – 1000 часов.

11. Результаты экспериментальных исследований электроплазменной установки при газификации углеродосодержащих отходов вполне удовлетворительно совпадают с термодинамическими расчетами

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

#### ***Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК***

1. Чернецкий М.Ю., Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Ануфриев И.С., Стрижак П.А. Исследование воспламенения угольной пыли, полученной при различной механической обработке, в условиях высокоскоростного нагрева // Физика горения и взрыва. – 2016. - № 3. – С. 79-81.

2. Kuznetsov, A.V., Butakov, E.B. Investigation of mechanical activation influence on coal fuel combustion// Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering Volume 327, Issue 6, 2016, Pages 37-44

3. Burdukov A.P., Butakov E. B., Popov V.I., Chernetskiy M. Yu., Chernetskaya N. S. The use of mechanically activated micronized coal in thermal power engineering // Thermal Science. – 2016. - Vol. 20. – P. 23 – 33.

4. Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Чернецкий М.Ю., Чернова Г.В. Исследование реакционной способности механоактивированных твердых топлив// "Современные проблемы науки и образования", № 1 за 2015 год

*Материалы международных и всероссийских конференций*

1. Бурдуков А.П., Шторк С.И., Чернецкий М.Ю., Бутаков Е.Б., Назаров А.В. Разработка разномасштабных стендов для моделирования двухступенчатого сжигания воздушной и паровоздушной газификации углей // Материалы III Международной научно-технической конференция “Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла”, Москва, 28 - 29 июня, 2016. – С. 315 – 320.

2. Абаимов Н.А., Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Осипов П.В., Рыжков А.Ф., Шестаков Н.С., Шурчалин А.А. Экспериментальная обработка методов получения синтез-газа в одно - и двухступенчатом газификаторе // Труды XV Минского международного форума по теплообмену, Минск, Белоруссия, 23 - 26 мая, 2016. – Т. 2. - С. 3-7.

3. Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Магдеева О.Л., Чернецкий М.Ю. Изучение реакционных свойств угольной пыли при различной механической обработке в условиях высокоскоростного нагрева // XXXII Сибирский теплофизический семинар, 19–20 ноября 2015, Новосибирск. – С. 234 – 235

4. Бурдуков А.П., Бутаков Е. Б., Кузнецов А.В., Чернецкий М.Ю. Исследование химической активности углей микропомола // Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: Теория, эксперимент, приложения», ИТ СО РАН, Новосибирск, 16–18 ноября 2015. – 8 с.

5. Бурдуков А.П., Бутаков Е. Б., Попов В.И., Чернецкий М.Ю. Исследование двухступенчатого сжигания углей механоактивационного и стандартного помола // Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: Теория, эксперимент, приложения», ИТ СО РАН, Новосибирск, 16 – 18 ноября 2015. – 8 с.

6. Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Чернецкий М.Ю., Чернова Г.В. Исследование химической активности механоактивированных твердых топлив и разработка технологий их сжигания // Сборник докладов II Международной научно–технической конференции «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла», Москва, 27–29 октября 2014 г. – С. 281–291.

7. Кузнецов А.В., Бутаков Е.Б., Исследование влияния механической активации на горение угольного топлива // Труды 2-й Российской молодежной научной школы-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи», ТПУ, Томск, 29-31 октября 2014 г. –С. 217-220.

8. Бутаков Е.Б. Экспериментальное исследование горения механоактивированных углей микропомола в моделях камер сгорания ГТУ // Тезисы всероссийской школы семинара молодых учёных с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», ИТ СО РАН, Новосибирск, 20-23 ноября 2014. – С. 28-29.

9. 52 – Международная научная студенческая конференция «студент и научно – технический прогресс» / г. Новосибирск, ИТ СО РАН, 11-18 апреля 2014. – С. 51

10. 51 – Международная научная студенческая конференция «студент и научно – технический прогресс» / г. Новосибирск, ИТ СО РАН, 11-18 апреля 2013. – С. 41

Подписано к печати 27 сентября 2017 г. Заказ № 37.

Формат 60x84/16. Объем 1 уч.-изд. лист. Тираж 110 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.