

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Сибирского отделения Российской академии наук



На правах рукописи

Бутаков Евгений Борисович

**Исследование горения и газификации органических топлив с механо – и
плазмохимической активацией применительно к энергетике и получению
топливного газа**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор

Бурдуков Анатолий Петрович

Новосибирск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ	13
1.1 Углеродосодержащие твердые топлива	13
1.1.1 Уголь	19
1.1.2 Углеродосодержащие отходы	23
1.2 Технология механохимической активации	25
1.2.1 Типы механического воздействия и виды мельничных реакторов.....	26
1.2.2 Влияние механической обработки на физические и химические свойства твердых веществ	32
1.2.3 Исследования механоактивации угольного топлива	35
1.3 Технология плазмохимической активации	39
1.3.1 Плазменное оборудование и технологии на его основе	39
1.3.2 Утилизация твердых техногенных отходов.....	42
1.3.3 Преимущества плазменных технологий перед огневой переработкой отходов.....	46
1.3.4 Безотходная и экологически чистая переработка органических отходов	47
1.4. Выводы по главе 1	49
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ПО СЖИГАНИЮ И ГАЗИФИКАЦИИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА	51
2.1 Тепловой стенд мощностью до 1 МВт.....	51
2.2 Тепловой стенд мощностью до 5 МВт.....	53
2.2.1 Одноступенчатая схема работы	54
2.2.2 Двухступенчатая схема работы	56
2.3 Измерительное оборудование.....	57
2.3.1 Газоанализатора ТЕСТ-1	57
2.3.2 Термоанемометр Dwyer AVU-3-V.....	59
2.3.3 Модуль ввода аналоговый МВА8.....	59

2.4 Выводы по главе 2.....	60
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛЕВЗВЕСИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ МЕТАМОРФИЗМА	62
3.1 Исследование горения и газификации угольного топлива измельченного на высоконапряженных мельницах типа дезинтегратор и виброцентробежной мельнице на тепловом стенде 1 МВт	65
3.2 Исследование горения и газификации механоактивированного угольного топлива различной степени метаморфизма на стенде 5 МВт	70
3.3 Исследования воздушной газификации углей механоактивированного микропомола с плазменным управлением процесса	73
3.4 Экспериментальное и численное исследование паровоздушной газификации механоактивированного угля.....	80
3.5 Двухступенчатое сжигание и газификация угля.....	87
3.6 Опытно - промышленные испытания.....	90
3.7 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.....	92
3.8 Выводы по главе 3.....	101
ГЛАВА 4 ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННАЯ БЕЗОТХОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ТОПЛИВНОГО ГАЗА ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ	103
4.1 Экспериментальный стенд и электроплазменное оборудование	104
4.2 Экспериментальные исследования лабораторной электроплазменной установки для газификации углеродсодержащих отходов производительностью 10-20 кг/ч.....	119
4.2.1 Исследование энергетических характеристик электродугового плазмотрона мощностью 50 кВт	119
4.2.2 Исследование плазменной газификации органических отходов	121

4.3	Термодинамический анализ газификации возобновляемых углеродосодержащих материалов в плазменной электропечи.....	124
4.4.	Выводы по главе 4.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		129
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....		132
ПРИЛОЖЕНИЕ А		142
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....		143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Одним из глобальных направлений развития 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 технологий 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 [1,2].

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. В связи с тем, что котлы спроектированы на топливо совершенно конкретных качественных характеристик, электростанции испытывают серьезные технологические трудности при сжигании непроектного твердого топлива. Ряд угольных бассейнов в Сибири отличается как большим разнообразием углей по маркам, так и значительным колебанием качественных характеристик угля в пределах одной марки углей. В первую очередь это относится к влажности, зольности и “производной” от них калорийности. При этом необходимо отметить, что

оборудование электростанций Востока России изначально не было приспособлено к сжиганию топлива с отклонениями по качеству в широком диапазоне относительно проектного.

Вторая – это необходимость сжигания огромного количества дополнительного высокорекреационного топлива (мазут, керосин, 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. Отсюда очевидна необходимость снижения доли мазута при розжиге и подсветке пылеугольного факела на пылеугольных котлах ТЭС [3].

Применение термохимической технологии с использованием плазмотронов при утилизации техногенных, в том числе и органических отходов, показало свою эффективность и востребованность. Одним из современных путей решения этой проблемы является газификация отходов в шахтных плазменных электропечах. Однако они имеют один существенный недостаток - высокое энергопотребление (до 1МВт*ч на 1 тонну отходов) и малый ресурс работы электродов плазмотрона. Поэтому 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 для теплоэнергетики.

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

Диссертационная работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы (ФЦП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от

28 ноября 2013 г. № 1096, по Соглашениям Минобрнауки РФ и Института теплофизики им С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН):

- № 14.613.21.005 от 22.08.2014 г. на тему «Разработка и исследование технологии газификации, воспламенения и сжигания твердых топлив, подвергнутых механохимической и плазменной активации»;

- № 14.607.21.0118 от 27.10.2015 г. на тему: «Разработка и исследование электроплазменной установки для экологически чистой и безотходной переработки органических отходов и получения топливного газа для сжигания в электрогенерирующих агрегатах» (шифр заявки «2015-14-579-0173-195» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0118).

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 при изменении соотношения топливо-воздух; исследование условий выхода на автотермический режим горения;

3. Экспериментальное моделирование на укрупненных стендах и разработка двухступенчатой системы горения и газификации механоактивированного пылеугольного топлива 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 для теплоэнергетики.

Научная новизна работы.

1. Впервые проведены экспериментальные исследования по воспламенению и горению механоактивированных углей различной степени метаморфизма на лабораторных и полупромышленных стендах.

2. Получены сравнительные данные по горению и газификации угольного топлива, измельченного на высоконапряженных мельницах - дезинтеграторе и виброцентробежной мельнице - 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 расходов пылеугольного топлива.

4. Проведены экспериментальные исследования по воздушной и паровоздушной газификации механоактивированных углей микропомола с ЗЗУ и плазменным стартом, и приведено сопоставление 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.

6. Разработана и создана единственная в России экспериментальная электроплазменная установка для газификации органических отходов производительностью 10-20 кг/ч.

7. 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. Исследования на укрупненных стендах позволяют разрабатывать системы безмазутного розжига и стабилизации горения пылеугольных котлов, а также схемы и технические решения по замещению высокорекреационного топлива механоактивированным углем микропомола в объектах промэнергетики.

2. Исследовано горение и воспламенение углей различной степени метаморфизма при их механоактивационном измельчении.

3. Полученные результаты позволили объективно оценить техническую и экономическую целесообразность внедрения системы безмазутного розжига в т.ч. организация системы безмазутного розжига с использованием механоактивированной угольной пыли микропомола, полученной из углей используемых на котлах: ПК-38 ст.№2Б Красноярской ГРЭС-2 филиала ПАО «ОГК-2», Беловской ГРЭС и др. При использовании вихревого растопочного горелочного устройства возможно достижение высокой полноты выгорания топлива (порядка 99%).

4. На котлах 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.

5. Полученные данные по воспламенению, горению и газификации пылевзвеси углей 2-х степеней 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.

6. Результаты термодинамического анализа газификации углеродосодержащих отходов свидетельствуют об определяющем влиянии

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

7. Результаты экспериментальных исследований лабораторной электроплазменной установки для переработки углеродосодержащих отходов производительностью 20 кг/ч являются исходными данными для создания полупромышленных альтернативных источников электроэнергии на возобновляемых органических отходах.

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, используются на «Сибирском заводе электрохимического оборудования» ОАО «Сибэлектротерм» (Приложение А).

Методология и методы исследования:

Значительное внимание было уделено моделированию технологических процессов горения и газификации твердых топлив. Полученные 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 горелочном устройстве производительностью до 100 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.

Экспериментальные исследования выполнены на современном аттестованном оборудовании, что позволило получить важнейшие параметры новых технологий: состав газовых сред после газификации, температуру газов, тепловые потери в системе, наличие/отсутствие вредных веществ, степень очистки высокотемпературных потоков и другое.

Полученные экспериментальные данные на лабораторной электроплазменной установке по переработке органических отходов производительностью 10-20 кг/ч являются основой разработки опытно-промышленной плазменной установки производительностью 500 кг/ч.

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.

ГЛАВА 1 ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

1.1 Углеродосодержащие твердые топлива

Под топливом понимают горючие вещества, составной частью которых является углерод, и применяемые с целью получения тепловой энергии при их сжигании. Топлива делятся: по агрегатному состоянию на твердые, жидкие и газообразные; по происхождению на природные и искусственные. Углеродсодержащие отходы могут рассматриваться как искусственное возобновляемое топливо. Основная характеристика топлива — теплота сгорания. Для сопоставления различных видов топлива и суммарного учета его запасов используется понятие «условное топливо», для которого низшая теплота сгорания принята 29,3 МДж/кг. Зола - это несгораемый остаток, образующийся из минеральных составляющих топлива при его сгорании. По химическому составу зола состоит из окислов SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Fe_2O_3 и др. Зола уменьшает теплоту сгорания топлива [4].

Для сравнительного анализа энергетических характеристик твердых бытовых отходов (ТБО) были выбраны бурые угли с различными значениями теплоты сгорания из трех угольных бассейнов, имеющих месторождения бурого угля с разными свойствами (Таблица 1.1), и ТБО отдельных регионов (Таблица 1.2). В Таблице 1.1 приведен элементный состав бурых углей Канско-Ачинского, Днепровского и Подмосквовного угольных бассейнов [5], в Таблице 1.2 - ТБО различных регионов мира [4], а в Таблице 1.3 - некоторых отходов различного происхождения.

Показатели, характеризующие бурые угли и углеродсодержащие отходы, рассмотрены в Таблицах сверху вниз в порядке уменьшения теплоты сгорания на

единицу рабочей массы. Для удобства пользования данными Таблиц каждое топливо имеет свой номер. В числителе приведены значения, отнесенные к рабочей массе, в знаменателе — к горючей массе топлива.

Анализ Таблицы 1.1 показывает, что уменьшение теплоты сгорания бурых углей, отнесенных к рабочей массе (числитель), связано с содержанием углерода и водорода в их составе. Такая же зависимость наблюдается в Таблице 1.2 для ТБО.

В Таблице 1.4 приведена общая для бурых углей и углеродсодержащих отходов последовательность уменьшения теплоты сгорания на рабочую массу: слева направо и приведены соответствующие значения суммы процентного содержания углерода и водорода. На Рисунке 1.1 изображены в графическом виде характеристики Таблицы 1.4. Эти показатели свидетельствуют о том, что калорийность (теплота сгорания) бурых углей линейно зависит от процентного содержания углерода и водорода и что отходы естественным образом вписываются в эту зависимость. При этом, ТБО №7, №8, №9, №10, отходы №16 и №17 оказываются лучше по величине теплоты сгорания, чем бурые угли У5 и У6, а ТБО №11 и №12 лучше, чем бурый уголь У6. Наилучшие по величине теплоты сгорания показатели оказались у отходов №15, №14 и №13. №13 по величине теплоты сгорания лучше, чем бурый уголь У3.

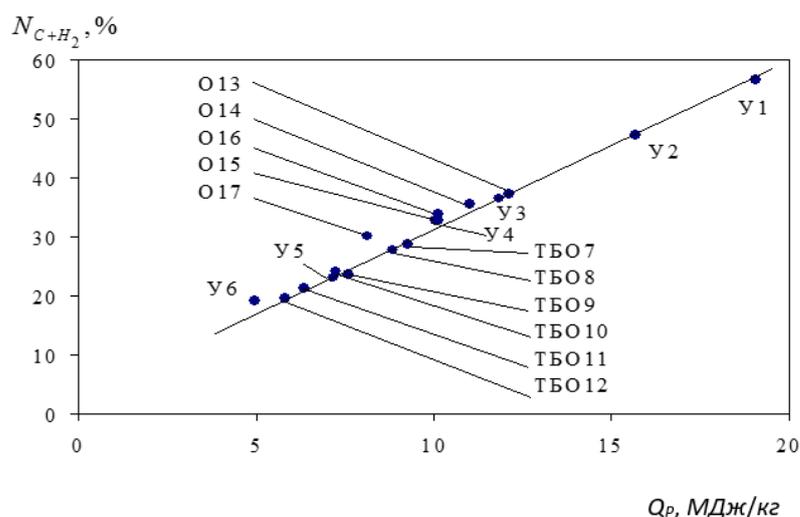


Рисунок 1.1 - Зависимость теплоты сгорания различных видов топлива от массовой доли углерода и водорода

Таблица 1.1 – Элементный состав бурых углей

Топливо	№	C %	H %	O %	N %	S %	Зола, %	Влага, %	Выход летучих , %	Теплота сгорания	
										МДж/к г	Ккал/к г
Канско-Ачинский бассейн, Месторождение Большесырское, Бурый уголь марки БЗ	У1	$\frac{52,91}{74}$	$\frac{3,718}{5,2}$	$\frac{14,08}{5}$ 19,7	$\frac{0,572}{0,8}$	$\frac{0,215}{0}$ 0,3	<u>4,5</u>	24	44	$\frac{19,05}{29,35}$	$\frac{4550}{7021}$
Канско-Ачинский бассейн, Месторождение Березовское, Бурый уголь марки Б2	У2	$\frac{44,24}{71}$	$\frac{3,053}{4,9}$	$\frac{14,39}{23,1}$	$\frac{0,436}{0,7}$	$\frac{0,186}{9}$ 0,3	<u>4,69</u>	33	48	$\frac{15,66}{27,63}$	$\frac{3740}{6610}$
Канско-Ачинский бассейн, Месторождение Боготольское, Бурый уголь марки Б1	У3	$\frac{34,24}{9}$ 69,5	$\frac{2,414}{4,9}$	$\frac{11,77}{9}$ 23,9	$\frac{0,344}{9}$ 0,7	$\frac{0,492}{8}$ 1	<u>6,72</u>	44	48	$\frac{11,81}{27,42}$	$\frac{2820}{6560}$
Днепровский бассейн, Месторождение Ново- Дмитровское, Бурый уголь марки Б1Р	У4	$\frac{30,22}{69}$	$\frac{2,61}{6}$	$\frac{8,7}{20}$	$\frac{0,45}{1}$	$\frac{1,52}{4,0}$	<u>6,5</u>	50	60	$\frac{10,05}{29,3}$	$\frac{2400}{7009}$
Днепровский бассейн, Морозовский разрез, Бурый уголь марки Б1Р	У5	$\frac{21,2}{66,2}$	$\frac{1,85}{5,8}$	$\frac{6,68}{20,9}$	$\frac{0,22}{0,7}$	$\frac{2,05}{6,4}$	<u>18</u>	50	60,4	$\frac{7,16}{28,3}$	$\frac{1710}{6770}$
Днепровский бассейн, Головковский разрез, Бурый уголь марки Б1Р	У6	$\frac{17,55}{61,6}$	$\frac{1,65}{5,8}$	$\frac{7,353}{25,8}$	$\frac{0,23}{0,8}$	$\frac{1,71}{6}$	<u>14,8</u>	56,7	нет данных	$\frac{4,97}{24,4}$	$\frac{1190}{5837}$

Таблица 1.2 – Элементный состав твердых бытовых отходов различных регионов мира

Регион	Массовая доля компонентов, %								Выход летучих, %	Теплота сгорания МДж/кг
	Порядковый № топлива	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>Зола</i>	Влага		
КАНАДА	ТБО7	<u>25,57</u> 53,6	<u>3,18</u> 6,67	<u>18,40</u> 38,56	<u>0,42</u> 0,88	<u>0,13</u> 0,25	25,36	27,03	57,8	<u>9,280</u> 20,87
США	ТБО8	<u>24,66</u> 53,24	<u>3,11</u> 6,65	<u>18,97</u> 40,17	<u>0,35</u> 0,74	<u>0,13</u> 0,27	27,64	25,14	55,5	<u>8,86</u> 20,06
НИДЕРЛАНДЫ	ТБО9	<u>22,17</u> 68,15	<u>1,51</u> 4,64	<u>8,34</u> 25,64	<u>0,23</u> 0,71	<u>0,28</u> 0,86	43,27	24,2	31,2	<u>7,57</u> 25,08
г. Москва	ТБО10	<u>21,36</u> 50,35	<u>2,8</u> 6,6	<u>17,52</u> 41,3	<u>0,61</u> 1,43	<u>0,13</u> 0,31	17,93	36,65	65,3	<u>7,23</u> 19,35
г. Мадрид	ТБО11	<u>19,38</u> 58,55	<u>1,95</u> 5,89	<u>11,09</u> 33,6	<u>0,47</u> 1,42	<u>0,21</u> 0,63	26,65	40,25	48,3	<u>6,35</u> 22,24
г. Свердловск	ТБО12	<u>17,74</u> 50,95	<u>2,24</u> 6,56	<u>13,85</u> 40,56	<u>0,55</u> 1,61	<u>0,11</u> 0,32	31,09	34,76	54,3	<u>5,81</u> 19,56

Таблица 1.3 – Элементный состав некоторых отходов различного происхождения

Регион	Массовая доля компонентов, %								Выход летучих, %	Теплота сгорания МДж/кг
	Порядковый № топлива	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>Зола</i>	Влага		
Животная мука	О13	$\frac{33,7}{51,85}$	$\frac{3,5}{5,38}$	$\frac{26,1}{40,15}$	$\frac{0,8}{1,23}$	$\frac{0,9}{1,38}$	30	5	-	$\frac{12,112}{18,8}$
Рисовая лузга	О14	$\frac{31,8}{48,56}$	$\frac{3,73}{5,70}$	$\frac{29,53}{45,10}$	$\frac{0,38}{0,58}$	$\frac{0,02}{0,03}$	20,52	14	-	$\frac{11,0}{17,4}$
Промышленные отходы	О15	$\frac{29,00}{48,33}$	$\frac{3,8}{6,33}$	$\frac{27,2}{45,33}$	-	-	15	25	-	$\frac{10,1}{17,9}$
Зараженная древесина	О16	$\frac{30,3}{51,01}$	$\frac{3,6}{6,06}$	$\frac{25,1}{42,26}$	-	-	0,6	40	-	$\frac{10,1}{18,7}$
Бумажные отходы	О17	$\frac{27,7}{46,17}$	$\frac{2,4}{4}$	$\frac{28,3}{47,7}$	$\frac{0,2}{0,33}$	$\frac{0,5}{0,83}$	10	30	-	$\frac{8,1}{14,7}$

Таблица 1.4 – Зависимость теплоты сгорания топлива, отнесенной к рабочей массе, от содержания ($C+H_2$)

Характеристика	Топливо																
	У1	У2	О13	У3	О14	О16	О15	У4	ТБО7	ТБО8	О17	ТБО9	ТБО10	У5	ТБО11	ТБО12	У6
Место в ряду	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Теплота сгорания, Q_p , МДж/кг	19,05	15,66	12,11 2	11,81	11,0	10,1	10,1	10,05	9,28	8,86	8,1	7,57	7,23	7,16	6,36	5,81	4,97
Массовая доля ($C+H_2$), N_{C+H_2} , %	56,6	47,3	37,2	36,6	35,53	33,9	32,8	32,83	28,75	27,77	30,1	23,68	24,16	23,05	21,33	19,64	19,2

Таблица 1.5 – Зависимость теплоты сгорания топлива, отнесенной к горючей массе, от содержания кислорода

Характеристик а	Топливо											
	У1	У4	У5	У2	У3	ТБО9	У6	ТБО11	ТБО7	ТБО8	ТБО12	ТБО10
Место в ряду	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Теплота сгорания, Q_p , МДж/кг	29,35	29,3	28,3	27,63	27,42	25,08	24,4	22,24	20,87	20,06	19,56	19,35
Массовая доля O_2 , %	19,7	20	20,9	23,1	23,9	25,64	25,8	33,6	38,56	40,17	40,56	41,3

Анализ Таблиц 1.1, 1.2 и 1.3 показывает также, что уменьшение теплоты сгорания, отнесенной к горючей массе (знаменатель), связано с увеличением содержания кислорода в составе топлива. В Таблице 1.5 рассматриваемые топлива расположены по мере убывания теплоты сгорания слева направо и приведены значения количества кислорода в процентах на горючую массу. Из характеристики этой Таблицы можно сделать вывод, что и по теплоте сгорания на горючую массу ТБО являются естественным продолжением свойств бурых углей и ТБО некоторых регионов (например, ТБО № 9) превосходит по теплоте сгорания на горючую массу некоторые сорта бурого угля (например, У №6).

Таким образом, сравнение элементного состава и энергетических характеристик бурых углей и отходов показывает, что они подчиняются одинаковым зависимостям теплоты сгорания от содержания углерода и водорода, а углеродсодержащие отходы можно отнести к возобновляемым топливам. Теплота сгорания, отнесенная к горючей массе, у ТБО в среднем меньше, чем у бурых углей марки У1 из-за большего количества связанного кислорода в составе горючей массы. Кислород, будучи окислителем, «балластирует» горючую массу, понижая теплоту сгорания.

Далее отдельно представлены тенденции использования и характеристики угольного топлива и углеродосодержащих отходов

1.1.1 Уголь

Уголь – самый распространенный в мире энергетический ресурс. Уголь стал первым видом ископаемого топлива, используемым человеком. По-видимому, самое первое упоминание о сжигании угля происходит из Китая около 1000 лет до нашей эры [6], тогда как в Европе римляне и греки начали сжигать уголь примерно в 200 – м году до нашей эры. Торговать углем начали в Англии в 13 –м веке [7]. В начале 1600- х годов уголь использовали

для плавления железа, а к концу 18 века – для производства газа для осветительных ламп [8]. Топка с цепной решеткой была изобретена в 1833 г., сжигать уголь в виде пылеугольного факела начали в ранние 1900 – е годы [8]. Эта технология интенсивно развивалась в 1920- е годы, и к 1930-му году факельное сжигание угля стало доминирующей технологией, используемой на тепловых электростанциях (ТЭС).

Уголь является естественным продуктом медленного разложения органических веществ, в основном растительного происхождения в природных условиях [9]. В России и странах СНГ в зависимости от степени метаморфизма (углефикации) различают бурые угли, каменные угли, антрациты и графиты. Интересно, что в западных странах имеет место несколько иная классификация: соответственно, лигниты, суббитуминозные угли, битуминозные угли, антрациты и графиты.

Характеристики основных типов твердых топлив, приведены в Таблице 1.6 [10 - 12].

Таблица 1.6 - Теплотехнические характеристики твердых топлив

Тип угля	W^w	A^d	V^{daf}	Q_i^w (ккал/кг)
Сланец	40-50	75-80	48-50	1600-2000
Лигнит	32-40	28-35	23-27	1900-2100
Бурый	25-35	15-20	35-50	3000-3800
Каменный	5-12	20-56	15-40	4000-5000
Антрацит	5-8	25-35	4-10	4300-6200
Петрококс	1-2	2-3	3-4	8800-9700
Угольная смесь	10.4	48.5	38.2	3150

Несмотря на продолжительный период использования угля, последний остается топливом, которое вызывает трудности в эффективном и экологически чистом его сжигании [7]. Однако этот недостаток, вызванный сложной структурой строения угля и изменениями свойств от одного типа углей к другому, не препятствует активному использованию угля, благодаря следующим его преимуществам.

Уголь является универсальным топливом, поскольку его можно сжечь, подвергнуть пиролизу и ожижению, газифицировать или даже использовать в качестве сырья для химической промышленности [13]. Уголь – это топливо, удобное для добычи, транспортировки, складирования и использования, в том числе в виде пыли [14]. Его компактность и высокая плотность энергии (около 30 МДж/кг) интенсифицирует процесс горения [15]. Нет проблем протечек и разбрызгивания, связанных с другими ископаемыми топливами, в то время как взрывы и самовоспламенения не столь опасны по сравнению с мазутом или газом [16]. Повсеместная доступность и значительные запасы угля делают его цену стабильной и привлекательной [17].

Применение угля в современном мире многообразно. Его используют для получения тепловой и электрической энергии (энергетический уголь), как сырье для металлургической (коксуемый уголь) и химической промышленности, получения редкоземельных элементов, производства графита.

Прогнозные ресурсы угля на Земле в настоящее время составляют более 14,8 трлн. т, а мировые промышленные запасы угля - свыше 1 трлн. т, что значительно превосходят запасы и ресурсы всех других энергоносителей [18]. Мировой рынок угля более конкурентоспособен, чем нефтяной и газовый, поскольку месторождения угля имеются на всех континентах, почти во всех странах, а добыча ведется практически во всех регионах мира.

Подавляющее число долгосрочных прогнозов мирового топливного энергетического баланса (ТЭБ) подтверждает, что уголь останется наиболее значительным из доступных невозобновляемых источников энергии до 2050

года [19]. При современном уровне потребления этих запасов хватит на 250 лет. Для сравнения, природного газа хватит на 65 лет, а нефти на 45 лет. Мировое потребление угля возрастает примерно на 2 % в год и при этом цены на уголь, в отличие от нефти и газа, отличаются высокой стабильностью [20]. В Таблице 1.7 по данным [20] приведен баланс мирового потребления топлив и его прогноз до 2020 г.

Таблица 1.7 - Мировой топливный баланс

Топливо	Миллион тонн условного топлива			
	1990	2000	2010	2020
Уголь	3142	3610	4199	5645
Нефть	4582	5455	6346	7665
Природный газ	2422	2605	2813	4035
Прочие	1767	1650	1533	1629
Итого	11913	13320	16803	21466

Как видно из Таблицы 1.7, потребление угля в 2020 году может возрасти на 34 % по сравнению с 2010 г. Увеличение доли угля в топливном балансе требует в свою очередь разработки и внедрения энергетически эффективных и экологически чистых технологий его использования.

Россия - крупнейшая угольная держава и один из мировых лидеров по производству и торговле углем. В недрах России сосредоточена треть мировых ресурсов угля (173 млрд. т), и пятая часть разведанных запасов. Из них 70% приходится на запасы бурого угля. Общие кондиционные ресурсы углей России превышают 4 трлн. т, в том числе балансовые запасы промышленных категорий - около 0,2 трлн. т. В 2007 г рост добычи угля в России составил 1,4% и достиг 314.5 млн. т. За 2008 год добыча угля в России составила уже 326 млн. т, то есть увеличилась на 3,9% по сравнению с 2007 годом [21, 22]. При текущем годовом уровне добычи угля обеспеченность угольной промышленности Российской Федерации разведанными запасами составляет более 400 лет. Российские угольные

месторождения достаточно доступны и их освоение при использовании современных технологий практически не имеет ограничений. При этом Россия располагает качественным энергетическим углем, в том числе и по экологическим характеристикам.

Существующие методы повышения эффективности топливоиспользования в основном себя исчерпали. В настоящее время осваиваются новые энергоэффективные, экологически более чистые технологии, в т.ч. основанные на механо - и плазмохимической подготовке углей к сжиганию.

1.1.2 Углеродосодержащие отходы

В связи с ростом объемов не утилизированных отходов в настоящее время довольно остро стала проблема утилизации отходов. Во всем мире опасные для населения и окружающей среды техногенные отходы (твердые бытовые отходы, биоорганические отходы) ежегодно увеличиваются на 2-3 млрд. тонн в год [23, 24].

В последние годы проблема утилизации отходов различного происхождения стала актуальной не только в России, она совпадает и с общемировой оценкой ее важности. Наиболее распространенным способом переработки органических отходов является их сжигание. Для этих целей широко применяются промышленные тепловые агрегаты, например паровые котлы, циркуляционные печи с псевдоожиженным слоем, вращающиеся обжиговые печи. При температуре в таких печах и устройствах 1000 – 1200 °С дожигание образующихся летучих органических соединений проводят во вторичных камерах с дополнительной подачей топлива и окислителя. В некоторых случаях для повышения температуры в горелках воздух обогащают кислородом.

Проведенные исследования требуют критического отношения к огневому обезвреживанию отходов в связи с возможностью вторичных процессов образования чрезвычайно вредных соединений: диоксинов и фуранов [25]. Недостатком огневого обезвреживания является также использование дополнительного топлива (обычно природного газа), что значительно увеличивает объемы отходящих газов, а соответственно значительно возрастает нагрузка на систему газоочистки, ее размеры, материалоемкость и стоимость. В этой связи интенсивно разрабатываются технологии переработки углеродсодержащих отходов методом газификации, позволяющей повысить степень конверсии углерода и экологические показатели процесса [26, 27].

Из известных способов наименьший вред окружающей среде наносит высокотемпературный (плазменный) метод переработки отходов. Основой данной технологии является термохимическое разложение органической составляющей материала отходов (высокотемпературный пиролиз) до атомарного уровня, а неорганическая составляющая при этом переводится в расплав и остекловывается. Электрическая дуга, генерирующая электродуговую – термическую плазму, может достигать от 6000 до 20000 К, а среднemasсовая температура плазменного потока 3000-6000 К [24]. Важное преимущество такого процесса - его практическая универсальность. Проведенные исследования и испытания показали высокую эффективность данной технологии для переработки отходов различного происхождения.

Особый интерес вызывают плазменные технологии переработки муниципальных отходов. Несмотря на попытки внедрения систем управления отходами, объем образующихся муниципальных отходов в промышленно развитых странах мира остается высоким. Так, по данным USEPA, в 2000 г. годовой объем твердых бытовых отходов в США превысил 128 млн. т. (свыше 400 кг, в год на одного жителя). Только около 25% из них были утилизированы на мусоросжигательных заводах, при этом образовалось около 9 млн. т. золы, содержащей крайне токсичные вещества (диоксины,

фураны, тяжелые металлы). Остальные отходы и вся зола от сжигания мусора были складированы на свалках и хранилищах. Таким образом, проблема утилизации отходов в рамках использования традиционных технологий не решена даже в самых развитых странах мира и становится все более угрожающей. Поэтому не прекращаются попытки разработки более совершенных технологий переработки техногенных отходов, к числу перспективных направлений которых относят использование низкотемпературной плазмы. Многие специалисты считают, что к настоящему времени базовые исследования в этой области в основном выполнены. Плазменные технологии переработки отходов прошли стадию экспериментальной отработки, вышли на этап опытно-промышленной реализации и вплотную приблизились к стадии промышленного внедрения [28-33].

В настоящее время в Институте теплофизики СО РАН создана экспериментальная электроплазменная установка для экологически чистой и безотходной переработки органических отходов с целью получения топливного газа (синтез-газа, $\text{CO} + \text{H}_2$) для электрогенерирующих агрегатов.

Производительность установки по отходам составляет 10-20 кг/ч. Результаты исследований газификации углеродосодержащих отходов (УСО) позволяет получить исходные данные по калорийности синтез-газа, удельным энергозатратам, ресурсу работы плазменного оборудования для разработки опытно-промышленного образца электроплазменной установки производительностью по отходам 500 кг/ч.

1.2 Технология механохимической активации

Поиски новых путей в химической технологии твердого топлива и повышении его реакционной способности заставляют более внимательно

отнестись к изучению процессов, протекающих при механических воздействиях на уголь [34].

Известно, что механические воздействия на уголь и углеграфитовые материалы приводят к распаду отдельных химических связей и образованию свободных макрорадикалов, которые инициируют развитие различных химических реакций и позволяют изменять как химические, так и физические свойства этих материалов [35, 36].

При любом механическом воздействии на уголь как твердое тело, органическая составляющая которого представляет высокомолекулярное образование вследствие его деформаций, следовательно, и деформации макромолекул в общем случае происходит изменение конформации молекулярных цепей, изменение межатомных и межмолекулярных расстояний. Все эти изменения сопровождаются ослаблением внутри- и межмолекулярных связей и соответствующим увеличением свободной энергии вещества [37-39].

1.2.1 Типы механического воздействия и виды мельничных реакторов

Мельничным реактором обычно называют реакционный аппарат, в котором химические реакции твердых веществ протекают при проведении к ним механической энергии. Число возможных конструкций таких аппаратов велико.

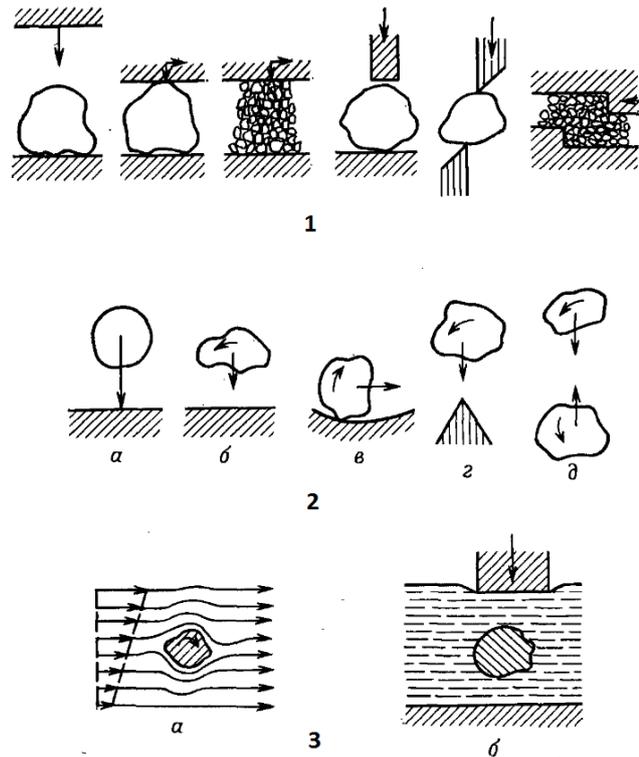
Для достижения высокой степени превращения вещества применяется оборудование, в котором измельчения материала происходит до образования большей поверхности. Для этой цели хорошо зарекомендовали себя, в частности, мельницы, дающие тонкий помол (шаровые, вибрационные, струйные, планетарные, дезинтеграторы).

Способы воздействия на частицы материала в этих мельницах можно подразделить в соответствие с тремя возможными механизмами [42].

1) Частицы реагирующего материала подвергаются действию напряжений между двумя размалывающими поверхностями. Если это напряжение направлено по нормали к поверхности, то имеет место напряжение сжатия, а при касательном относительном движении размалывающих поверхностей – напряжение сдвига. На практике оба напряжения возникают совместно. Если напряжение возникает при столкновении с относительной скоростью одной из поверхностей с частицей материала, покоящейся на другой поверхности, то такое взаимодействие называется двойным ударом (Рисунок 1.2, 1) [42].

2) Частицы, свободно перемещающиеся в покоящейся или движущей среде-носителе, ударяются либо о размалывающую поверхность, либо друг о друга. Этот тип воздействия называется ударом. Прототипом напряжения удара является вертикальное соударения шара с поверхностью (Рисунок 1,2, 2, а) или со вторым шаром. Так как частицы материала могут не только двигаться поступательно, но вращаться, помимо напряжения удара возникает также напряжения скольжения и вращения (Рисунок 1.2, 2, б - д) [43].

3) Механическая обработка твердых тел может также осуществляться в окружающей жидкой или газовой среде, например в струе газов, ускоренных приблизительно до звуковой скорости (Рисунок 1.2, 2, 3) Воздействие в этом случае может происходить путем образования капель жидкости, отскакивающих от поверхности твердого тела и уносящих большой импульс.



1 – напряжение между двумя плоскостями; 2 – взаимодействие свободно движущихся частиц с плоскостью или друг с другом (а-д см. в тексте); 3 – действия внешней среды; а – нормальные и тангенциальные силы на поверхности частиц, б – ударная нагрузка

Рисунок. 1.2 - Различные механизмы возникновения напряжений при механическом воздействии на частицы твердого тела [42]

Механические напряжения в шаровых, вибрационных и планетарных мельницах создаются по механизму 1. Основными аппаратами, работающими по принципу 2, являются ударно-дисковые и струйные мельницы. Ниже приведено краткое описание наиболее важных типов мельниц.

Шаровые мельницы

Типовая шаровая мельница представляет собой цилиндр, частично заполненный размалывающими телами, например шарами, и обрабатываемым материалом (Рисунок 1.6, 1). Цилиндр вращается вокруг горизонтальной оси. В соответствии со скоростью вращения цилиндра шаровая загрузка будет подниматься на различную высоту по его стенке. При

небольшой скорости вращения верхние шары будут скатываться назад на наклонно расположенный нижний слой, и таким образом будут перемешиваться целые шаровые слои. При увеличении скорости верхние шары будут отделяться от стенок цилиндра и падать назад на более глубоко расположенные нижние слои по параболическим траекториям. Именно благодаря ударам этих шаров и происходит механическая обработка измельчаемого материала[43].

Шаровые мельницы применяются наиболее широко при измельчении угля в энергетических котлах. Однако их эффективность ниже, чем у вибрационных и планетарных мельниц.

Вибрационные мельницы.

Внешняя конструкция реакционного барабана вибрационной мельницы в основном такая же, как и шаровой. Закрытая цилиндрическая труба, ось которой горизонтальна, частично заполнена размалывающими телами и измельчаемым материалом. Труба установлена таким образом, что может качаться по кругу в плоскости, перпендикулярной ее оси. Загрузка начинает двигаться вверх с ускорением вместе с трубой. В определенной точке загрузка отделяется от стенки трубы и далее движется свободно в поле силы тяжести, тогда как труба продолжает движение по круговой траектории. Через определенное время загрузка вновь соприкасается со стенкой и происходит интенсивный двойной удар. Эти операции повторяются в течение каждого периода колебаний. Измельчаемый материал находится в свободно взвешенном состоянии и подвержен действию в основном ударных напряжений (Рисунок 1.5, 2) [44]. Вибрационные мельницы имеют хорошую эффективность и широко используются в промышленности. Однако в энергетике они практически не используются из-за относительно низкой удельной производительности.

Планетарные мельницы

Реакционный сосуд в виде трубы, заполненный измельчаемым материалом и шарами, установлен так, что его ось направлена вертикально. Он вращается вокруг оси, центр которой расположен вне трубы и одновременно в противоположном направлении вокруг своей собственной оси. В определенный момент шары отделяются от стенки сосуда и с высокой энергией падают назад в другую его точку [45]. Путем подбора геометрических размеров мельницы и времени вращения можно добиться ускорений, в 60 раз превышающих гравитационное. Мельницы этого типа используются для лабораторных и малопроизводительных процессов.

Ударно-дисковые мельницы.

В ударно-дисковой мельнице механические напряжения возникают при ударах частиц измельчаемого материала о «пальцы», установленные на двух параллельных дисках. На каждом диске пальцы расположены вокруг оси вращения по концентрическим окружностям в несколько рядов. Ряды пальцев на одном из дисков заходят в пространство между рядами другого. Диски вращаются с большой скоростью в противоположных направлениях, с высокой относительной скоростью пальцев на соседних рядах и, следовательно, имеют высокие интенсивности механической обработки. (Рисунок 1.5, 3). Этот принцип применяется в дезинтеграторе, который доказал свою незаменимость в активации твердых тел, в частности строительных материалов [46]. Схема дезинтегратора и принцип его работы представлены на Рисунке 1.4 и 1.4. Дезинтегратор состоит из двух вращающихся во взаимно- противоположные стороны дисков с круглыми пальцами (билами), расположенными на каждом диске концентрическими кругами в несколько рядов перпендикулярно к плоскости вращения, образуя корзины. Пальцы одной корзины располагаются между двумя рядами пальцев другой. Диски корзины насажены на валы, расположенные на одной геометрической оси, каждый с самостоятельным приводом[47-49].

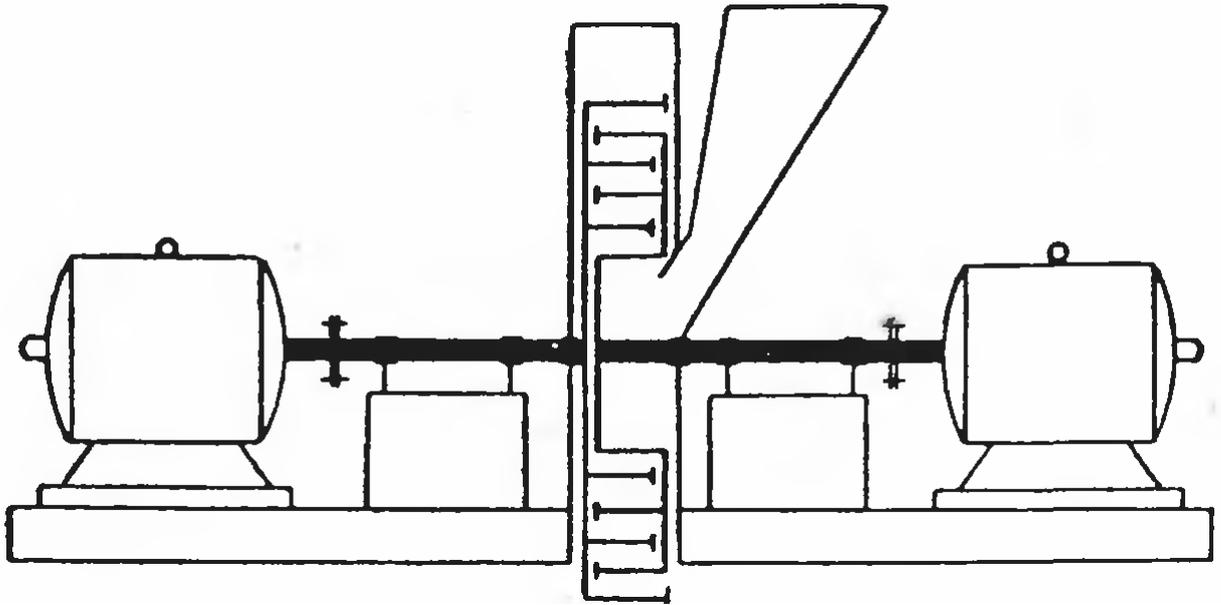


Рисунок 1.3 – Схема мельницы -дезинтегратора

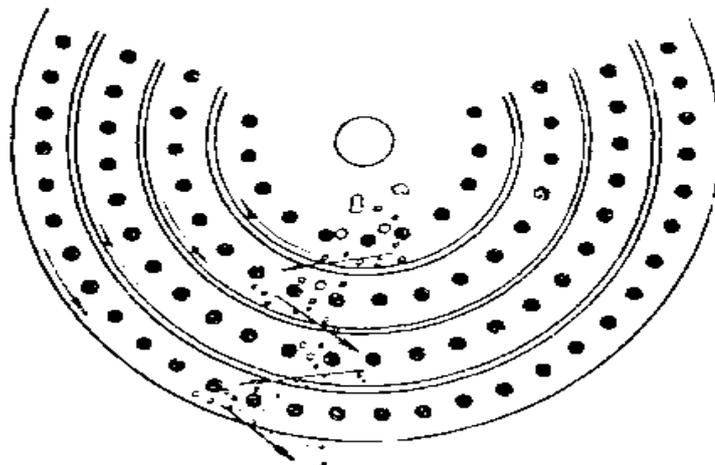
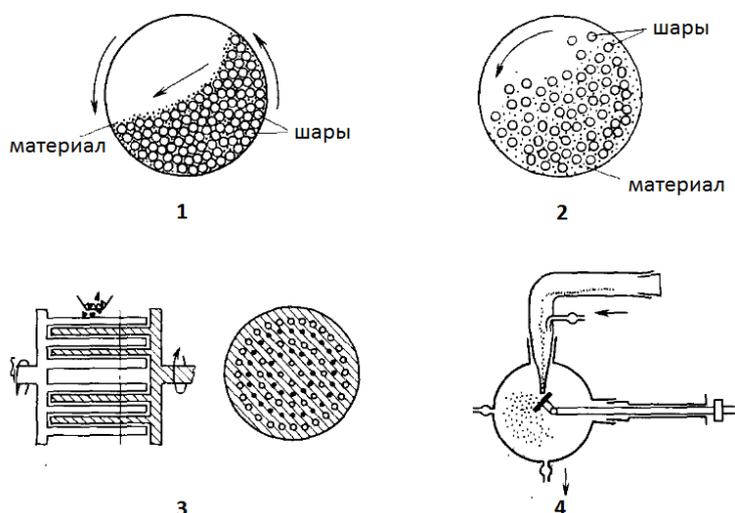


Рисунок 1.4 – Принцип работы мельницы - дезинтегратор

Струйные мельницы.

В струйной мельнице в поток газа, вытекающий из сопла и имеющий обычно избыточное давление около 0,6 МПа, до или после сопла вводятся частицы обрабатываемого материала. Конечная скорость потока газа достигает 450 м/с. Механическая обработка материала происходит главным образом при соударениях отдельных частиц материала друг с другом в потоке газа или при ударах о стенку (Рисунок 1.5, 4). Благодаря высокой интенсивности механической обработки частиц измельчаемого материала в

струйных мельницах можно получить высокую степень однородности частиц, главным образом для мягких и твердых веществ. Однако мельницы этого типа имеют очень высокие удельные энергозатраты на помол.



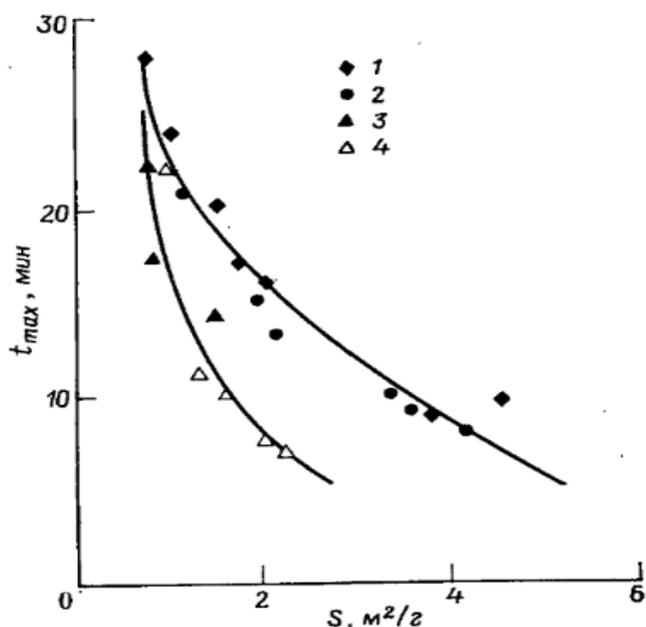
1 – шаровая мельница, 2 –вибрационная мельница, 3- ударно-дисковая мельница, дезинтегратор, 4- струйная мельница

Рисунок 1.5 - Схематическое изображение работы мельничных реакторов различных типов. [46]

1.2.2 Влияние механической обработки на физические и химические свойства твердых веществ

В процессе механической обработки в мельничных устройствах возникают изменения в структуре и реакционной способности (химической активности) твердых веществ. В настоящее время показано, что шаровые и вибрационные мельницы, с одной стороны, и дезинтеграторы и струйные мельницы – с другой, вызывают разные изменения в свойствах материала. На Рисунке 1.6 представлена зависимость скорости растворения измельченного кварца в плавиковой кислоте от удельной поверхности материала, а на Рисунке 1.7 – изменение относительной интенсивности его рентгеновских

линий. Видно, что зависимости для отмеченных типов мельниц не совпадают.

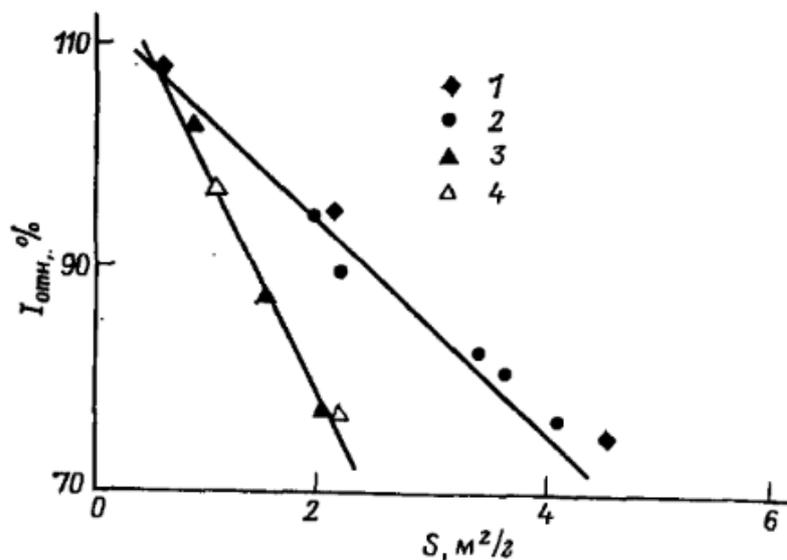


1 – шаровая мельница; 2 – вибрационная мельница; 3 – дезинтегратор; 4 – струйная мельница.

Рисунок 1.6 - Зависимость максимального времени растворения t_{max} механически обработанного кварца в плавиковой кислоте от величины удельной поверхности S [50]

Более резкое уменьшение относительной интенсивности рентгеновских линий и возрастание растворимости в плавиковой кислоте при ударных воздействиях по сравнению с ударно-сдвиговыми напряжениями в шаровых и вибрационных мельницах могут быть обусловлены более высокой интенсивностью рабочего процесса в дезинтеграторах и струйных мельницах. Тем не менее, как показало изучение растворимости в NaOH кварца, обработанного в вибромельнице, во внешних слоях частиц возникает высокая степень разупорядочения, в то время как во внутренних слоях степень разупорядочения может быть меньше. Этот факт является следствием того, что в мельницах отдельная частица чаще подвергается действию ударно-сдвиговых напряжений, хотя и меньшей интенсивности.

Поэтому механизм воздействия в значительной степени определяет изменения микроструктуры.



1 – шаровая мельница; 2 – вибрационная мельница; 3 – дезинтегратор; 4 – струйная мельница

Рисунок 1.7 - Зависимость относительной интенсивности рентгеновских линий $I_{отн}$ механически обработанного кварца от величины удельной поверхности S [50]

При использовании мельниц необходимо принимать во внимание механизмы передачи энергии твердым телам. Трудно только оценить роль этих механизмов в каждом конкретном случае. Эффективность и характер передачи механической энергии в значительной степени зависят от конструкции мельницы, а также от условий измельчения. Однако такой подход позволяет выбирать мельницы для получения заданных физических и химических свойств твердых веществ и их структуры, а также определять характеристики условий измельчения.

1.2.3 Исследования механоактивации угольного топлива

При создании системы механоактивационного измельчения топлив решающим фактором является выбор наиболее эффективного и технически достаточно простого реализуемого способа измельчения, позволяющего максимально увеличить их химическую активность. Для решения этой проблемы было проведено исследование влияния способов измельчения углей различных стадий метаморфизма в энергонапряженных мельницах различного типа – виброцентробежных, планетарных, дезинтеграторах.

В настоящее время известны методики определения реакционных свойств углей непосредственно в процессе их измельчения, которые позволили бы достоверно описать химическую активность. Используются методы дифференциально-термического анализа (ДТА), позволяющие исследовать в процессе термического разложения реакционные свойства углей, подвергнутых механохимической обработке [52-53].

Этот метод позволяет анализировать процессы термоокислительной деструкции (ТОД) угольного вещества, нагреваемого со скоростью 10-30 °С в минуту.

В качестве объектов исследования использованы пробы углей Кузнецкого угольного бассейна марок длиннопламенного (Д) и тощего (Т) с зольностью $A^c = 6.46\%$ и 6.15% и выходом летучих компонентов $V^{daf} = 41\%$ и 12.4% , соответственно. Пробы подвергались сверхтонкому диспергированию в мельницах, отличающихся видом механических воздействий. Использовался дезинтегратор, для которого характерно ударное разрушение и центробежно-планетарная мельница типа М-3 с истирающе-раздавливающим видом воздействия при отношении массы мелющих тел к углю 10:1.

Данные экспериментов свидетельствуют о том, что основная потеря массы образцов активированного угля марки Т, связанная с процессами

горения как периферийной, так и ядерной частей, сдвигается в более низкотемпературную область. При этом также как и для угля марки Д снижается конечная температура выгорания с 770 °С до 720 °С, сужается температурный интервал максимального разложения.

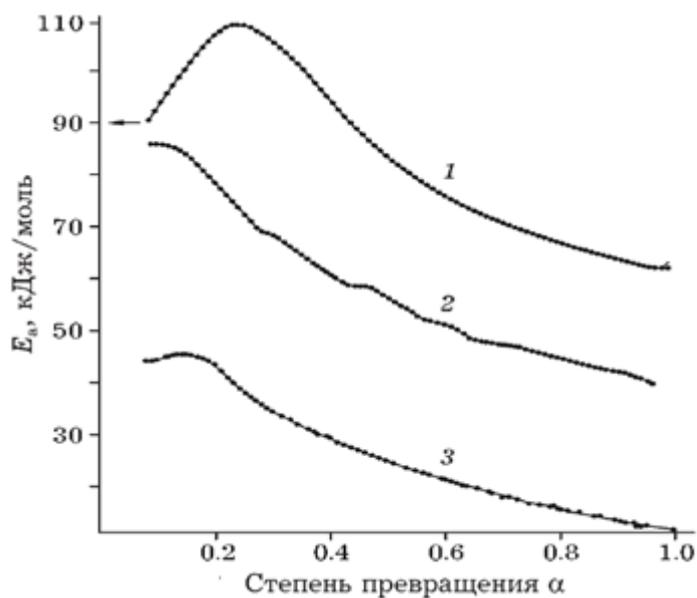
Механическое активирование угольного вещества приводит также к снижению температурных показателей процесса ТОД длиннопламенного угля: конечной температуры выгорания; температуры, соответствующей максимальной скорости потери массы и сужению температурного интервала горения, что также свидетельствует об увеличении их реакционной способности.

Работа по исследованию ТОД углей проводилась под руководством д.т.н. профессора Т.С. Юсупова (Институт Геологии и минералогии СО РАН). В экспериментах по ТОД показано, что механическая активация длиннопламенного и тощего угля снижает температурные показатели процесса горения, что хорошо видно по термогравиметрическим кривым. Для активированных углей они сдвигаются в более низкотемпературную область [41].

На Рисунках 1.8 - 1.10 приведены кривые изменения энергии активации процесса ТОД. Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод, что интенсивная механическая обработка высокометаморфизованного тощего угля повышает его реакционную способность, проявляющуюся в снижении величины энергии активации по всему температурному интервалу термоокислительной деструкции. Однако степень снижения величины этого показателя по сравнению с низкометаморфизованным длиннопламенным углем существенно ниже.

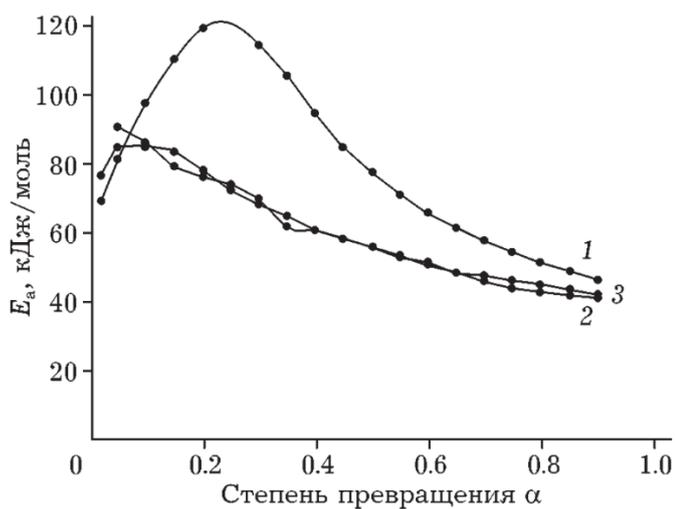
Проведенными исследованиями установлено, что наиболее реакционноспособными при горении в воздушной среде являются образцы низкометаморфизованного длиннопламенного угля, подвергнутые механическим воздействиям, сочетающим сдвиговые и ударные нагрузки, для которых характерно наиболее значительное снижение энергии

активации, что объясняется механодеструкцией макромолекул угольного вещества.



1 – исходный длиннопламенный уголь, 2 – легкая фракция ($d < 1.4 \text{ г/см}^3$), 3 – активированная в мельнице дезинтегратор легкая фракция [51]

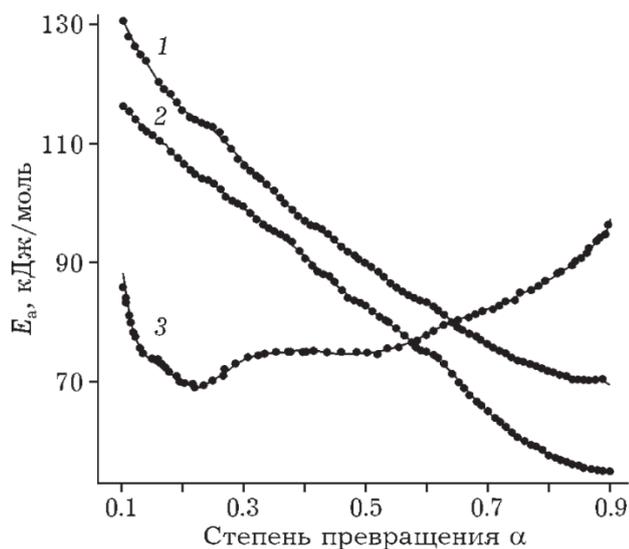
Рисунок 1.8 - Зависимость величины энергии активации от степени превращения



1- исходный образец; 2 – обработанный в дезинтеграторе; 3 - легкая фракция ($d < 1.4 \text{ г/см}^3$)

Рисунок 1.9 - Изменение энергии активации длиннопламенного угля в процессе термоокислительной деструкции [51]

Анализ процесса горения по данным ДТА позволил установить наличие двух образцов, близких по кинетике окисления: легкая фракция длиннопламенного угля и тот же уголь, обработанный в дезинтеграторе.



1-исходный образец; 2- легкая фракция ($d < 1.4 \text{ г/см}^3$); 3 - активированный в центробежной мельнице тощий уголь

Рисунок 1.10 - Изменение энергии активации процесса термоокислительной деструкции тощего угля[51]

Анализируя данные дифференциально-термического анализа углей различных стадий метаморфизма, следует отметить, что в начальной стадии термического разложения значения энергии активации в ряде случаев у исходного и механоактивированного углей могут быть близки. Существенное изменение энергии активации наблюдается после 20 % степени термического разложения. В связи с этим оценка влияния эффекта механоактивации углей должна производиться по результатам реагирования не только в начальной стадии процесса, но и в значительной части (до 50%) процесса выгорания пылевзвеси.

1.3 Технология плазмохимической активации

При плазмохимической подготовке углеродосодержащих топлив, его молекулярная структура подвергается разрушению или перестраивается в той или иной степени. Это деструктивные реакции со свободным или связанным кислородом, а также с водяным паром. Этим реакциям могут способствовать определенные органические и неорганические соединения, присутствующие в топливе и добавляемые извне. Иначе, под плазмохимической подготовкой топлив к сжиганию понимается комбинированное воздействие на подвергающееся деструкции топливо тепловой энергии и химических реагентов. В этом случае термохимические превращения затрагивают лишь органическую массу углеродосодержащих топлив, практически не влияя на их минеральную часть [55-58].

Использование электродуговой плазмы для плазменной активации твердого топлива во многих случаях энергетически более эффективно, чем применение традиционных огневых методов, поскольку плазма с высокой концентрацией энергии, характеризующаяся присутствием в ней большого количества химически активных атомов, радикалов, ионов и электронов способствует многократному ускорению термохимических превращений, а, следовательно, и более полному протеканию реакции.

1.3.1 Плазменное оборудование и технологии на его основе

В основе плазменного технологического оборудования лежат генераторы низкотемпературной плазмы (плазмотроны).

Устройство для получения низкотемпературной плазмы с помощью дугового, высокочастотного (ВЧ) - и сверхвысокочастотного (СВЧ) - разрядов называется плазмотроном. В рассматриваемых ниже технологиях

используются в основном электродуговые нагреватели газов (дуговые плазмотроны). При атмосферном давлении и выше устанавливается единая температура компонент плазмы (электронная, ионная, возбуждения и нейтральных частиц). Такая плазма называется термической.

При всем многообразии конструкций дуговые плазмотроны можно разделить на два типа:

- 1- плазмотроны косвенного действия (струйные), в которых дуга горит внутри разрядной камеры между электродами, которые являются элементами его конструкции;
- 2- плазмотроны прямого действия (плавильные). В них одно из опорных пятен дуги вынесено на нагреваемый объект (расплавленный металл или металлические изделия при сварке и резке).

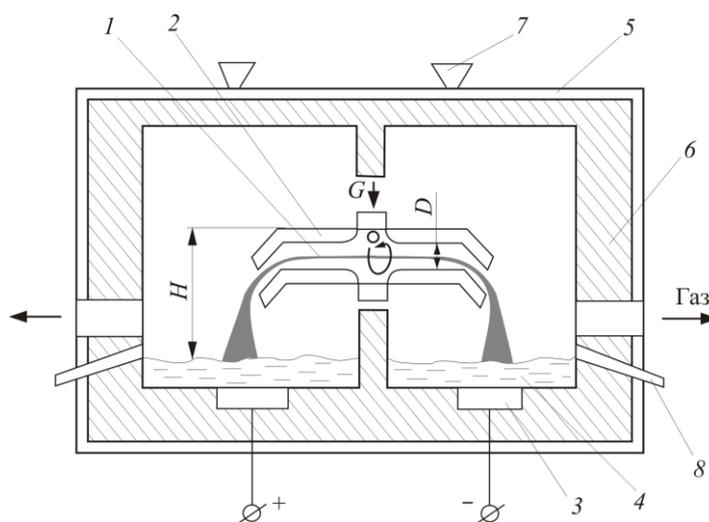
Мощности технологических плазмотронов в зависимости от целей применения составляют от 10-50 кВт (лабораторные исследования) до 500-1000 кВт (опытно-промышленные установки) [59].

Наибольшее распространение в научных исследованиях и опытных технологических испытаниях получили конструктивные схемы струйных плазмотронов с газовихревой стабилизацией дугового разряда. Подробное описание различных схем плазмотронов приведено в работе [60].

Разработкой плазмотронов, струйных и плавильных, активно занимаются в России (в частности, Сибирское отделение РАН и Сибирский завод электротермического оборудования – ОАО «Сибэлектротерм»), Беларуси (ИТМО им. Лыкова А.В. НАН Б), Казахстане (Институт проблем горения). Известны конструктивные решения генераторов плазмы в США (Westinghouse Plasma Corp., Retec, Plasma Energy Corp. и др.) для космических целей, металлургии, переработки отходов (например, вместе с компанией Alter NRG (Канада)).

По ходу дальнейшего изложения материала будут приведены конструкции плазменных электропечей и реакторов для реализации конкретных технологий. Для примера остановимся на высокоэффективном

плазмохимическом реакторе с жидкометаллическими (расплавляемыми) электродами (Рисунок 1.11) [30]. Несомненным преимуществом его перед другими является практически неограниченный ресурс электродов. Кроме того, плазмообразующим газом может быть любой (водяной пар, водород, кислород и др.), поскольку в стабилизирующем устройстве 2 нет опорных дуговых пятен, разрушающих материал. Производительность реактора определяется мощностью дугового разряда $U \cdot I$, а сила тока может составлять килоамперы.



1 – электрическая дуга; 2 – стабилизирующее устройство; 3 – подовый электрод; 4 – расплав металла; 5 – водоохлаждаемый металлический корпус; 6 – огнеупорная футеровка; 7 – загрузочное устройство; 8 – слив шлака.

Рисунок 1.11 - Схема плазмохимического реактора с жидкометаллическими электродами

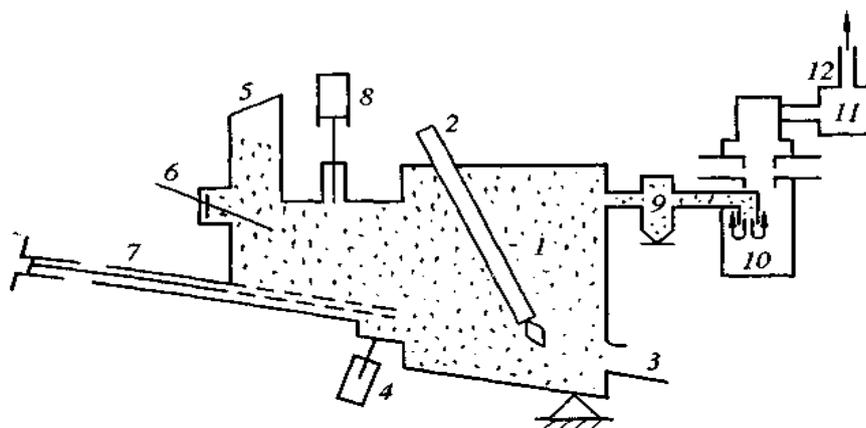
Ключевым отличием технологий плазменной газификации от обычных технологий переработки отходов является высокий уровень температур в плазменном реакторе или плазменной печи (3000—8000 К), что обеспечивает практически полный перевод содержащегося в отходах углерода в оксид углерода (СО), и позволяет нейтрализовать любые опасные вещества. Образующийся в результате газификации синтез-газ состоит из водорода (35—45%), СО (25—35%), а также содержит небольшие количества метана, ацетилена и этилена. Теплотворная способность полученного газа

может составлять 30—35% и более теплотворной способности природного газа. Это делает возможным его использование для работы газовых турбин и газо-поршневых электроагрегатов, для генерирования электроэнергии на низкокалорийных газовых потоках.

1.3.2 Утилизация твердых техногенных отходов

Рассмотрим некоторые известные технические решения и разработанное оборудование для реализации технологий переработки твердых отходов, обеспечивающие современные требования по экологии и их перспективной направленности в разных странах.

В газогенераторе, разработанном канадской фирмой Canada Resorption Ltd. (Канада) [61], в качестве источника нагрева используется генератор низкотемпературной плазмы (плазмотрон) (Рисунок 1.12).



1 - реактор пиролиза; 2 - плазмотрон; 3 - слив жидкого шлака; 4 - механизм наклона реактора; 5 - бункер загрузки с крышкой; 6 - шуровочный механизм; 7 - механизм загрузки из бункера в реактор; 8 - шибер; 9 - электрофильтр; 10 - скруббер; 11 - котел-утилизатор; 12 - выброс газов в атмосферу.

Рисунок 1.12 - Схема установки фирмы Canada Resorption Ltd. [61]

Эта пилотная установка была оборудована электродуговым плазмотроном мощностью 150 кВт. С помощью специальной системы

загрузки твердые отходы подаются непосредственно в зону нагрева, имеющую температуру порядка 1200 °С.

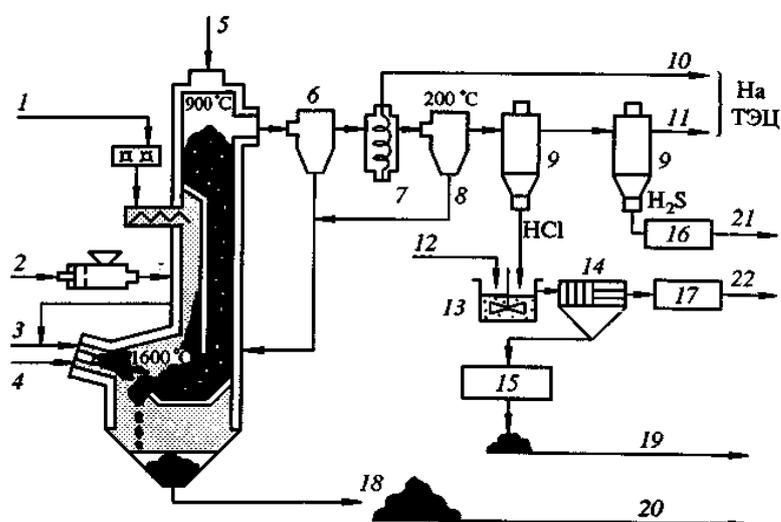
Производительность установки составляет 200 кг/ч. Применение плазмотрона позволило удалять шлак в жидкой фазе из зоны реактора, утилизируя всю неорганическую часть обрабатываемых отходов (стекло, металлы, окислы металлов, шлак и т.д.).

Классическим примером получения топливного газа является газификация угля. Воспламенение угольной аэросмеси идет наиболее эффективно в процессе газификации угля. Эксперименты, выполненные на теплоэнергетическом стенде тепловой мощности 1 МВт (Институт теплофизики СО РАН) показали, что отношение мощностей плазмотрона и угольной горелки составляют от 5 до 7 %.

Фирма "Voest Alpine" (Австрия) осуществила процесс высокотемпературной газификации в двухзонном реакторе (Рисунок 1.13) [43].

В одну из непосредственно нагреваемых зон шахты реактора подается сырье. Сырьем могут быть твердые отходы, тестообразные отходы, в том числе шлак. Нагрев производится плазменной горелкой, в плазменную струю которой дополнительно подается жидкое или пылевидное топливо. В другую зону реактора загружается металлургический кокс, который газифицируется совместно с подаваемыми отходами, тем самым поддерживается процесс газификации и требуется меньше топлива. Температура в зоне нагрева достигает 1600 °С. Образующийся жидкий шлак постоянно сливается в водяную ванну и гранулируется, после чего направляется в дорожное строительство. После грубой очистки газ поступает в теплообменник. Затем происходит тонкая очистка газа и его охлаждение до температуры 200 °С. Собранная дисперсная фаза направляется в реактор для повторной переработки. После этого газ поступает в скрубберы, в которых происходит очистка газа от хлористого водорода и сернистого водорода. Шламы

отделяются, нейтрализуются и, так же как и очищенная вода, направляются для последующего использования.



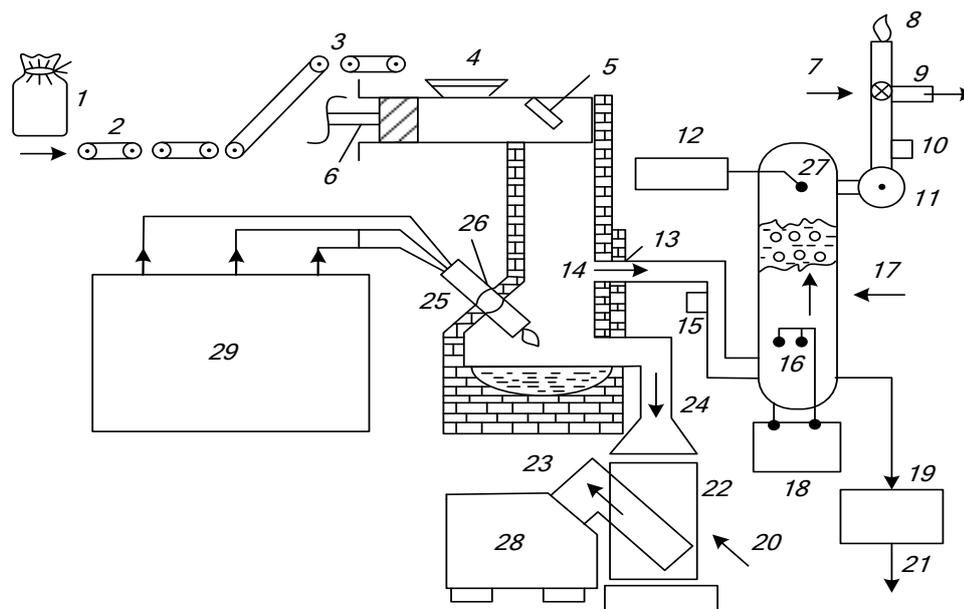
1 - твердые отходы; 2 - тестообразные отходы; 3 – плазменное горелочное устройство; 4 - порошкообразное топливо; 5 - кокс; 6 - фильтр грубой очистки; 7 - теплообменник; 8 - фильтр тонкой очистки; 9 - скруббер; 10 - пар; 11 - газ; 12 - обожженная известь; 13 - нейтрализатор; 14 - прессфильтр; 15 - осадок; 16 - сера; 17 - жесткая вода; 18 - гранулы; 19 - на свалку; 20 - на дорожное строительство; 21 - на серный завод; 22 - сточные воды.

Рисунок 1.13 - Структурная схема установки фирмы "Voest Alpine" для высокотемпературной газификации отходов [62]

Объемные доли компонентов газа составляют: окись углерода – 23 %, двуокись углерода - 5%, водород - 10%, углеводороды - 2%, азот - 60%. Внутренняя теплота сгорания 3870 кДж/нм³. Отходящий газ используется для получения тепла и электроэнергии. Установка, оборудованная реактором диаметром 1 м и высотой 6 м, имеет производительность 650 кг/ч обрабатываемых отходов.

Американской фирмой "Mason and Hanger National, Inc" (США, Атланта) и Институтом теплофизики СО РАН разработаны технологические установки различных типов для плазменной переработки техногенных отходов [44]. Приведенная на Рисунке 1.14 технологическая схема дает ясное

представление о конструкции плазменной печи, системе загрузки твердых отходов, сервисных системах обеспечения работы плазмотрона, системе очистки синтез-газа в скруббере, сборе шлаков и шлама. Полученный синтез-газ может быть использован для получения метанола или электроэнергии (с помощью газовой турбины). Объемная доля компонентов синтез-газа: H_2 - 41%, CO - 3%, N_2 - 16%, CO_2 - 8%, другие - 5%.



1 – отходы; 2 – падающий конвейер; 3 – загрузочный механизм; 4 – бункер; 5 – заслонка; 6 – поршень; 7 – вентиль; 8 – факел; 9 – газ на хранение; 10, 15 – место забора проб; 11 – вентилятор; 12- каустическая сода; 13 – печь пиролиза; 14 – отходящий газ; 16 – закалка газа; 17 – очистка газа; 18 – тепло-обменник; 19 – шлам; 20 – подача в отвал; 21 – дренаж шлака; 22 – водяная ванна; 23 – транспортер; 24 – шлак; 25 – плазменная горелка; 26 – уплотнитель; 27 – скруббер; 28 – бункер для шлака; 29 – сервисные системы электро-, газо- и водоснабжения плазменной горелки.

Рисунок 1.14 – Плазмотермическая система переработки отходов

1.3.3 Преимущества плазменных технологий перед огневой переработкой отходов

Представленный выше обзор современной научно-технической литературы в области переработки органических отходов показал, что огневая переработка отходов является одной из наиболее распространенных технологий, позволяющих значительно сокращать объем отходов. На сжигание направляются выделенные в результате сортировки горючие (органические) и негорючие компоненты отходов. Однако недостатком технологии сжигания отходов обычными низкотемпературными способами является образование пылящего и непригодного для вторичного использования продукта - золы, которая концентрирует в себе токсичные элементы.

В настоящее время разработаны десятки плазменных технологий переработки отходов и сотни опытных плазменных установок для их осуществления. Это связано с высокой энергетической и эколого-экономической эффективностью плазменных технологий. Современные плазменные методы прямой переработки отходов позволяют получать зольный остаток в виде продукта, пригодного для складирования, транспортировки или повторного использования.

По сравнению с традиционными огневыми печами, даже применяющими интенсивные газодинамические режимы обработки (псевдоожиганный слой, кислородное дутье и др.), при использовании плазменного нагрева достигается ряд существенных преимуществ. Объем печи уменьшается в 6-8 раз (при сохранении производительности по сырью), соответственно снижается площадь необходимых производственных помещений. Уменьшается примерно на порядок объем отходящих газов и увеличивается температура в реакционной зоне печи до 1800 – 2000 К.

Многолетние научные исследования и опытные работы, по моделированию и испытанию плазменных процессов позволяют сформировать технические условия для оптимальной реализации процесса плазменной переработки углеродсодержащих отходов (УСО) с получением энергетического синтез-газа. Технические условия применения плазмотронов для переработки УСО лежат в основе плазменной технологии, позволяющей проводить глубокую термическую переработку отходов различного происхождения, содержащих как горючие, так и негорючие (до 40-50 масс. %) компоненты, с получением чрезвычайно устойчивого к агрессивным воздействиям и механически прочного конечного продукта - плавленного шлака (возможность фиксации в шлаковом компаунде не менее 90 % токсичных компонентов). Это делает разрабатываемую плазменную технологию привлекательной не только в техническом и экологическом, но также и в экономическом планах.

1.3.4 Безотходная и экологически чистая переработка органических отходов

Среди большого числа рассмотренных вариантов возможных решений задачи эффективной переработки органических отходов оптимальным представляется безотходная энергоэффективная электроплазменная технология и установка утилизации УСО с получением синтез-газа, основой которой является шахтная электропечь с плазмотронами. Преимуществами плазменного шахтного процесса перед традиционным сжиганием отходов являются:

- отсутствие необходимости в тщательной сортировке отходов;
- возможность получения конечного продукта необходимого качества в одной установке без промежуточных стадий;

- существенное сокращение (в 2 - 5 раз) объема отходящих газов в результате применения плазменных источников нагрева вместо топливных устройств;
- исключение токсичных выбросов при утилизации отходов;
- оперативность вывода электроплазменной установки на рабочий режим.

Существенными отличиями разрабатываемой электроплазменной технологии от других российских и иностранных вариантов реализации плазменных процессов являются:

- использование плазмотронов оптимальной конструкции и необходимой мощности, не имеющих аналогов в мире;
- проведение процесса в окислительной среде, без добавления углеводородного топлива;
- низкая степень уноса токсичных компонентов с отходящими газами;
- получение шлакового расплава без использования стеклообразующих флюсов;
- использование тепла горения топливного газа для поддержания необходимого теплового режима в камере дожигания;
- эффективное использование средств автоматического контроля и регистрации показателей технологических параметров в управлении процессом.

В основе технологической схемы плазмохимического процесса переработки органических отходов лежит электроплазменная технология газификации отходов, которая позволяет получать высококалорийный синтез-газ с выходом $\text{CO} + \text{H}_2$ до 90 об.% и теплотворной способностью 8-12 МДж/м³. Использование синтез-газа в качестве экологически чистого топлива в энергетических котлах, газотурбинных установках (ГТУ) и в электрогенераторах нового поколения на основе твердооксидных топливных

элементов позволяет вырабатывать тепловую и/или электрическую энергию с КПД, превышающим таковой для существующих тепловых электростанций [45].

Высокие температуры в реакционной зоне электроплазменной печи (1600-2000⁰ К) блокируют образование канцерогенных веществ (диоксины, фураны) и обеспечивают получение жидкого шлака с последующим его гранулированием (остекловыванием) с инертными свойствами, позволяющими использовать его в строительной и автодорожной отраслях.

1.4. Выводы по главе 1

Уголь и углеродосодержащие отходы являются одними из самых распространенных среди энергетических ресурсов топливом 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.

Анализ отечественной и мировой литературы показал, что 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, подвергнутые 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 органических отходов производства и потребления наиболее эффективным способом утилизации является высокотемпературная (плазменная) технология. Наиболее распространенная в настоящее время огневая переработка органических отходов обладает набором негативных явлений для окружающей среды и человека.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ПО СЖИГАНИЮ И ГАЗИФИКАЦИИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Для исследования процессов воспламенения, горения и газификации использовались огневые стенды тепловой мощностью 1 и 5 МВт, существующие в ИТ СО РАН и модернизированные под поставленные задачи.

2.1 Тепловой стенд мощностью до 1 МВт

Экспериментальные исследования проводились на тепловом стенде мощностью до 1 МВт, представленном на Рисунке 2.1.

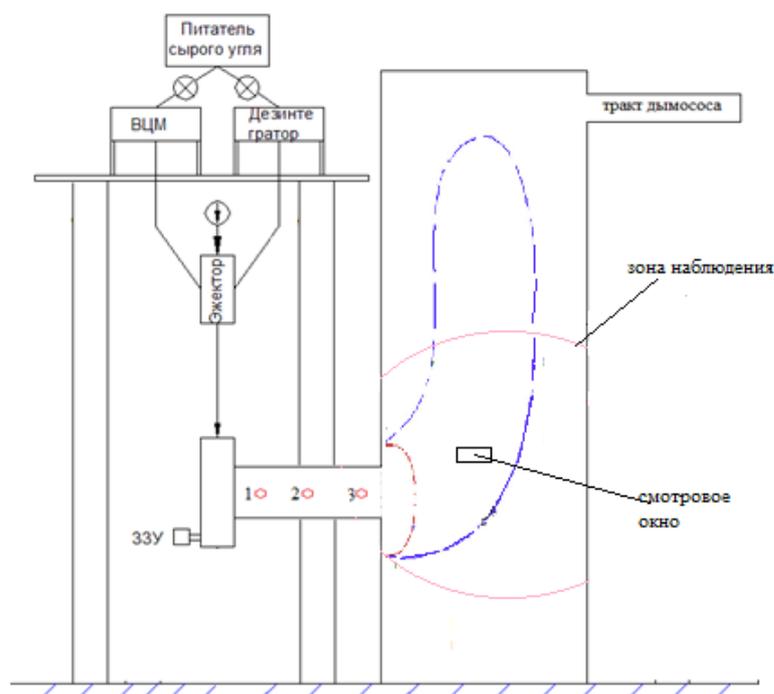


Рисунок 2.1 - Тепловой стенд мощностью до 1 МВт

Проектный 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 посредством разрежения, создаваемого эжектором, поступает в смесительную камеру эжектора, где происходит смешение с потоком воздуха. Воздух подается воздуходувкой и регулируется частотным преобразователем и контролируется с помощью расходомерной шайбы. Образованная пылевоздушная смесь подается в улиточный вход квадратного сечения с гранью 108 мм, 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 измеряется 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 сгоревшие продукты 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. На Рисунке 2.2 представлена схема расположения температурных датчиков и забора газа на тепловом стенде 1 МВт .

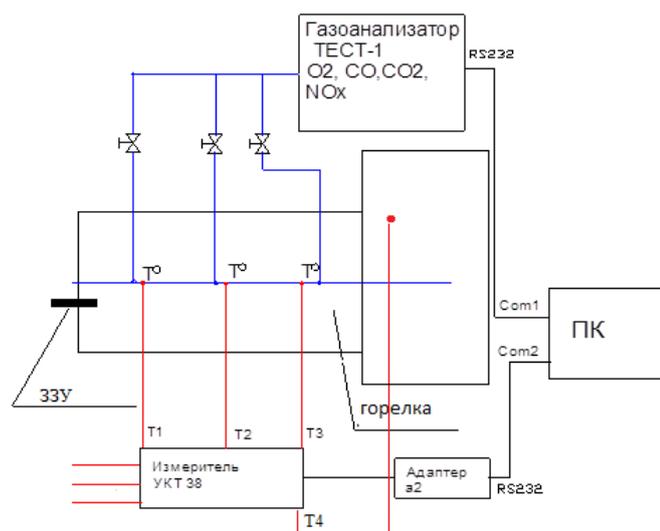


Рисунок 2.2 - Схема размещения датчиков контроля температуры и заборных зондов для контроля газового состава на стенде 1 МВт

2.2 Тепловой стенд мощностью до 5 МВт

Предусмотрен одно- и двухступенчатый режим работы экспериментального стенда 5 МВт.

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

Двухступенчатая система 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.

мельницу и обеспечивает транспорт полученной в мельнице пыли к горелке. Поскольку испытательный стенд находится под разрежением, создаваемым эжектором и дымососом, расход первичного воздуха, идущего через мельницу, регулируется шибером, установленном на входе в канал. Мельница-дезинтегратор оборудована двумя электродвигателями мощностью 35 кВт каждый. Максимальная производительность мельницы составляет 2.5 т/ч. Подача топлива в мельницу осуществляется через патрубок в средней части мельницы. Отвод готовой пыли производится через патрубок, расположенный в нижней части мельницы. После мельницы готовая пылеугольная аэросмесь поступает в смеситель, где смешивается с дополнительным первичным воздухом. Подвод дополнительного воздуха (стальная труба $\text{Ø}141 \times 3 \text{ мм}$) расположен в нижней части стенда. В подводящем канале установлены 4 дутьевых вентилятора, после которых дополнительный воздух собирается в общем коллекторе и подается в эжектор. Дутьевые вентиляторы позволяют плавно изменять расход первичного воздуха.

Температура и состав газов по длине горелочного устройства контролируется термопарами и специальным многокомпонентным газоанализатором. На Рисунке 2.3 представлена схема расположения температурных датчиков и забора газа на тепловом стенде 5 МВт.

После эжектора аэросмесь подается через улиточный закручивающий аппарат аэросмеси 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».

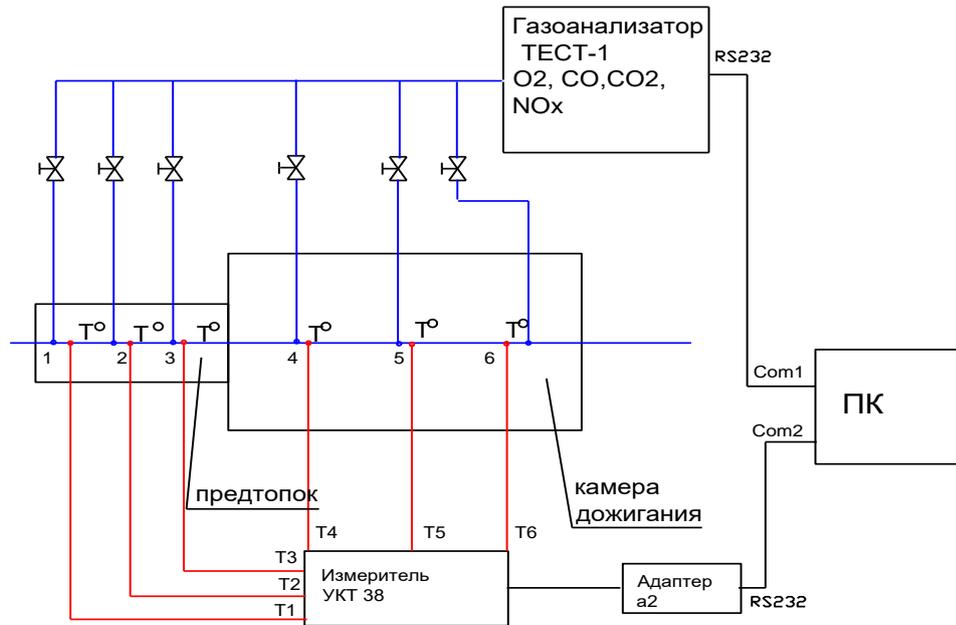


Рисунок 2.4 - Схема размещения датчиков контроля температуры и заборных зондов для контроля газового состава на стенде 5 МВт

2.2.2 Двухступенчатая схема работы

Двухступенчатое сжигание – осуществляется подача в горелочное устройство, угля микропомола от мельницы-измельчителя (1-я ступень) и угля после штатной мельницы котла, ШБМ (2-я ступень), Рисунок 2.5.

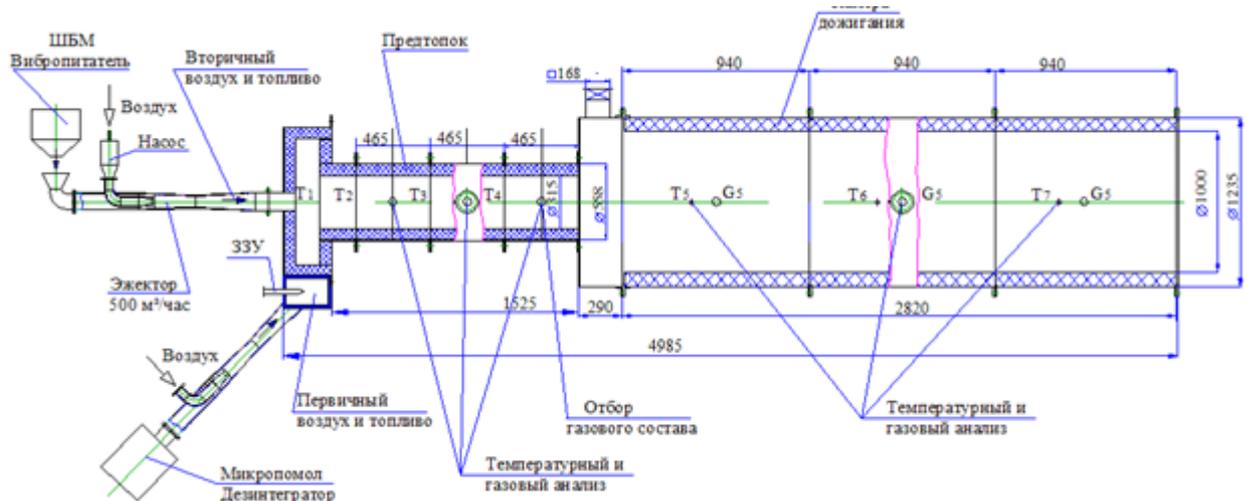


Рисунок 2.5 - Модифицированный тепловой стенд 5 МВт с двухступенчатой подачей угольного топлива

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.

2.3 Измерительное оборудование

2.3.1 Газоанализатора ТЕСТ-1

Для измерения газового состава продуктов горения используется система на основе многокомпонентного газоанализатора ТЕСТ-1, Рисунок 2.7. Технические характеристики представлены в Таблице 2.1.



Рисунок 2.6 - Газоанализатор ТЕСТ-1

Таблица 2.1 – технические характеристики газоанализатора ТЕСТ-1

	Диапазон измерения концентрации	O ₂	0 - 21% об.
		H ₂	0 – 40 % об.
		CO	0 – 60 % об.
		CO ₂	0 - 30 % об.
		CH ₄	0 – 30 % об.
		NO	0 – 3000 ppm
		SO ₂	0 – 3000 ppm
	Предел допускаемой основной относительной погрешности	±5%	
3	Время установления показаний	5 с	
4	Время прогрева	45 мин	
5	Напряжение питания	220В	
6	Токовое потребление	Среднее	400mA
		Максимальное	2А
7	Цифровой выход	RS232	
8	Габаритные размеры (мм)	460x340x170	
9	Масса, кг	не более 7 кг	

2.3.2 Термоанемометр Dwyer AVU-3-V

Передачик серии AVU работает, измеряя тепловые потери от одного из двух чувствительных элементов в потоке воздуха, а затем рассчитывая скорость воздуха (Рисунок 2.7). Устройства практически невосприимчивы к дрейфу из-за конструкции чувствительного элемента, что делает передатчик точным во всем диапазоне скоростей воздуха.

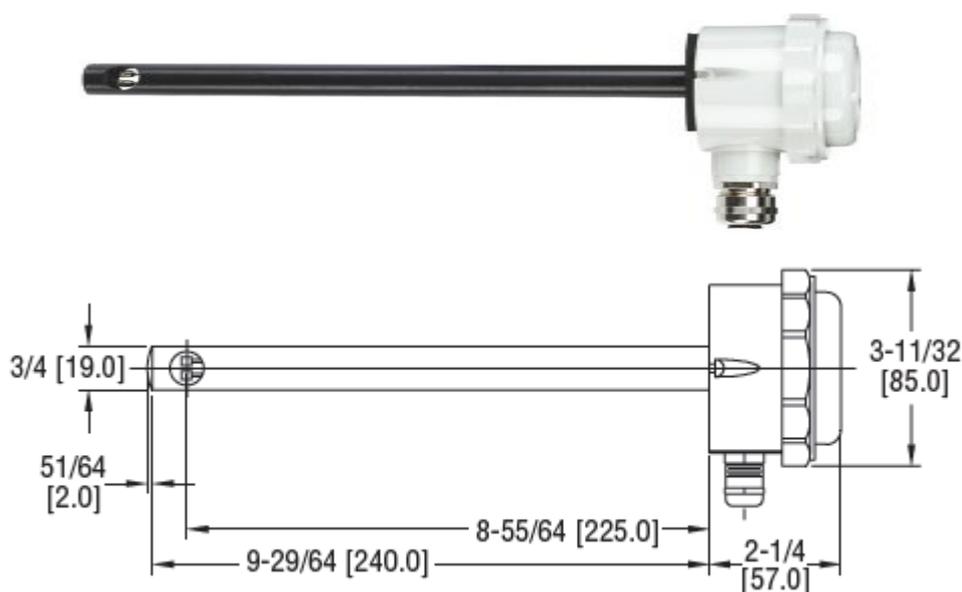


Рисунок 2.7 - Термоанемометр Dwyer AVU-3-V

Основные характеристики:

- выходные сигналы от 4 до 20 мА или от 0 до 10 В;
- степень защиты корпуса NEMA 6 (IP67);
- питание от сети переменного или постоянного тока;
- точность 5% - 8% .

2.3.3 Модуль ввода аналоговый МВА8

Восьмиканальный универсальный измерительный модуль ввода для распределенных систем управления в сети RS-485, Рисунок 2.8.



Рисунок 2.8 - Модуль ввода аналоговый MVA8

Основные функции модуля ввода:

- восемь универсальных входов для подключения широкого спектра датчиков температуры, давления, влажности, расхода, уровня и других физических величин;
- цифровая фильтрация и коррекция входных сигналов, масштабирование показаний датчиков с унифицированным выходным сигналом (активных датчиков);
- передача измеренных значений по интерфейсу RS-485.

2.4 Выводы по главе 2

Разработаны, спроектированы и модернизированы тепловые экспериментальные стенды как лабораторного, так и полупромышленного масштаба (до 5 МВт), оснащенные современным измерительным оборудованием, позволяющие проводить экспериментальные исследования процессов воспламенения, горения и газификации пылевидного твердого топлива.

Осуществлена отладка аппаратуры и разработаны программы и методики проведения измерений параметров и аэродинамической структуры газовых и пылеугольных факелов с использованием горелочных устройств тепловой мощностью до 5 МВт;

Разработаны, спроектированы и изготовлены детали модифицированного горелочного устройства со стабилизацией горения.

Изготовлены горелочные устройства на стенд тепловой мощностью 5 МВт.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛЕВЗВЕСИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ МЕТАМОРФИЗМА

Горение пылеугольного факела представляет собой сложный физико-химический процесс, включающий в себя целый ряд аэродинамических, теплофизических и химических явлений. Поэтому при практическом рассмотрении горения индивидуальных частиц, как базового принципа пылеугольного факела, приходится схематизировать процессы. Для качественной оценки отдельных стадий и процесса в целом их существенно упрощают. Имеется много литературных данных по экспериментальному исследованию отдельных стадий горения угольной частицы, которые пригодны чаще всего к использованию определенного вида угля и при определенных условиях: скорости нагрева, размера частиц и температурного уровня процесса. Время выхода летучих коррелирует с временем прогрева частицы [66]. Однако имеется большое количество экспериментов, подтверждающих, что горение летучих захватывает значительную часть времени горения коксового остатка. Горение коксового остатка, в свою очередь, определяется целым рядом факторов: зольностью угля, реакционной способностью полукокса, пористостью частицы, аэродинамической обстановкой в камере сгорания, уровнем температур. Основные химические реакции горения углеродного остатка представляются в виде:



В целом, согласно диффузионно-кинетической теории горения угля суммарная скорость гетерогенной реакции

$$q = K^1 C_w = \frac{K C_0}{1 + K/\beta} = \frac{C_0}{1/K + K/\beta}, \quad (3.4)$$

где сопротивление переходу вещества из окружающей среды к реагирующей частице равно:

$$\frac{1}{K^1} = \frac{1}{K} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{K} + \frac{d}{NuD}, \quad (3.5)$$

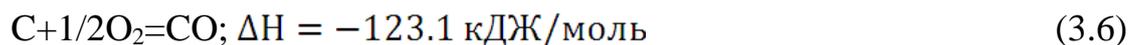
т.е. состоит из химического $1/K$ и диффузионного d/NuD сопротивлений. Здесь величина K^1 – суммарная константа скорости химической реакции, β – коэффициент массоотдачи, K – константа скорости реакции, C_0 и C_w – концентрации окислителя в объеме и на поверхности, D – коэффициент диффузии окислителя в газе, ($Nu = Bd/D \approx 2$ при пылеугольном горении) – число Нуссельта. Константа скорости реакции обычно определяется по соотношению Аррениуса $K = K_0 \exp(-E/RT)$, где E – энергия активации, T – температура, R – газовая постоянная, K_0 – предэкспоненциальный множитель. Из выражения (3.4) следует, что в случае горения при высоких температурах, основное сопротивление в процессе – диффузия d/NuD , при малых размерах частиц или низких температурах основное сопротивление – химическое. Поэтому выделяются два предельных режима процесса горения: диффузионный и кинетический. 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 внешнего кинетического до внешнего переходного и внешне - и внутренне диффузионного. Детальное экспериментальное исследование всех стадий процесса горения полидисперсных частиц представляется достаточно сложной задачей. Однако даже упрощенный анализ соотношений (3.4) и (3.5) позволяет сделать очевидные выводы: для увеличения скорости сгорания частиц угля следует повышать температуру процесса и уменьшать диффузионное сопротивление. Повышение

температуры сопряжено с рядом технологических и экологических проблем, связанных с материаловедением, плавкостью золы, образованием окислов азота и т.д. Поэтому в реальных топочных устройствах максимальная температура в объеме не превышает 1500-1700 °С.

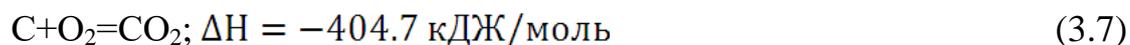
Химические реакции, составляющие процесс газификации угля, относятся к классу гетерогенных реакций типа газ - твердое топливо и сопровождаются достаточно большими перетоками энергии. Поэтому при разработке способа газификации угля ведущую роль играют вопросы тепломассообмена. Это крайне трудная технологическая проблема: согласовать таким образом динамику химических реакций и связанных с ними процессов тепломассообмена со свойствами используемого угля, конструкционными материалами, а также стационарными и динамическими режимами работы реактора, чтобы получаемый сырой газ по возможности ближе соответствовал предполагаемому назначению или путем относительно простых операций переработки или превращения приводился к требуемому составу. Очевидно, что ввиду сложности суммарного процесса для достижения поставленной цели приходится идти на множество компромиссов, которые могут определяться внешними граничными условиями. Этим самым объясняется наличие большого числа самых различных способов газификации, которые были уже опробованы или еще находятся на стадии разработки [67-69].

Газификацию угля можно упрощенно описать пятью основными химическими реакциями.

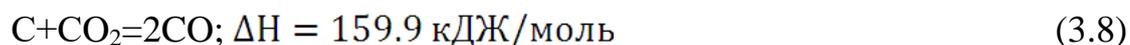
Газификация кислородом или воздухом (неполное горение):



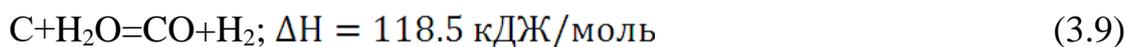
Горение в кислороде:



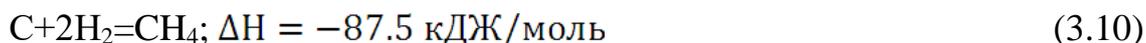
Газификация углекислым газом (реакция Будуара):



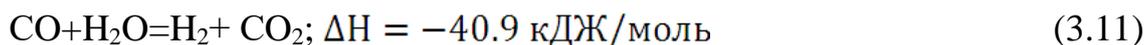
Газификация водяным паром (реакция водяного газа):



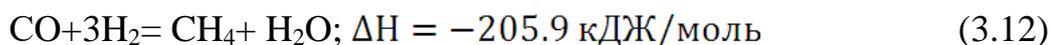
Газификация водородом (гидрогазификация):



При получении газовой смеси с определенными соотношениями CO/H₂ для последующего использования в реакциях синтеза имеет значение следующая реакция:



Повышение теплоты сгорания газа достигается путем метанизации:



Приведенные уравнения (3.6) - (3.12) заключают в себе информацию о стехиометрии и энергетике реакций при газификации, но ничего не говорят об их полноте и характере протекания. Такие сведения могут быть получены только путем учета термодинамических и кинетических закономерностей, а также условий стационарного режима [70-73].

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.

3.1 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 2.1. Для измельчения использовались мельницы – виброцентробежного и дезинтераторного типа.

Эксперименты проводились на Переясловском буром угле (ЗБР), данные по техническим характеристикам которого приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 Характеристика Переясловского бурого угля (ЗБР)

Типы углей	Влажность W_{r1} , %	Зольность A_r , %	Сера S_{dl} , %	Выход летучих веществ V_a , %	Высшая теплота сгорания Q_{daf} , ккал/кг
ЗБР	26,0	5,3	0,27	47,0	6900

На Рисунке 3.1 приведены данные по спектру размеров частиц, полученных на 2-х типах мельниц –виброцентробежной и дезинтераторного типа. Видно, что размер частиц, полученных на разных мельницах для бурого угля, примерно одинаков.

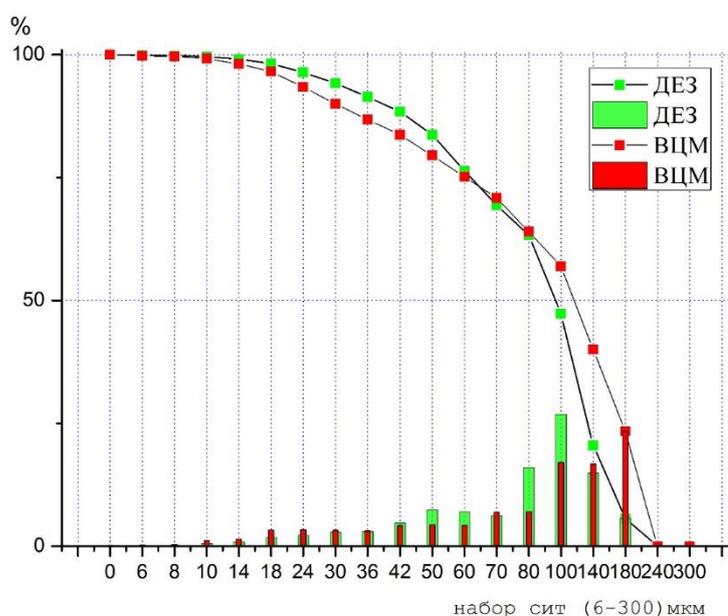


Рисунок 3.1 – Спектральный размер частиц бурого Переясловского угля после измельчения на мельнице -дезинтеграторе и ВЦМ

Анализ данных по скорости воспламенения и горения пылеугольного факела, представленных на Рисунках 3.2 – 3.3, а также общий вид факела одного и того же по степени метаморфизма бурого угля (Рисунок 3.4) при разных способах помола существенно различны. Факел на угле после помола

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

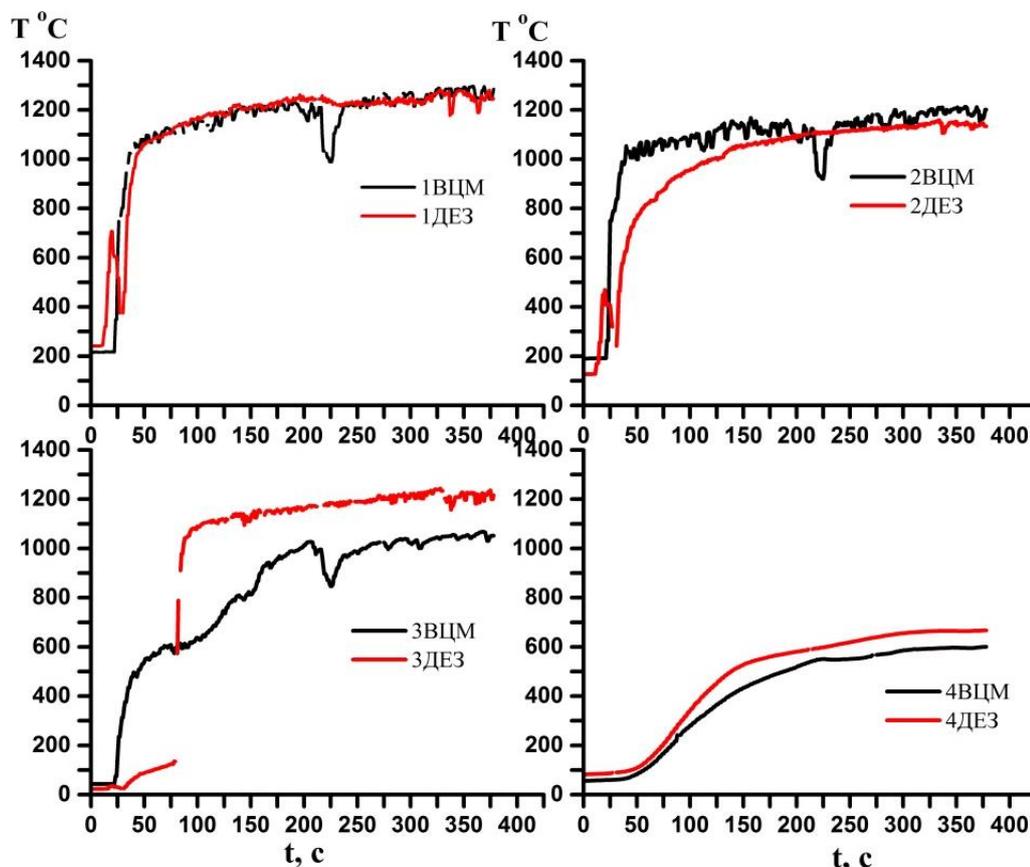


Рисунок 3.2 - Распределение температуры по длине в зависимости от времени на стенде 1 МВт при сжигание угольной пыли, измельченной на мельнице- дезинтеграторе и на ВЦМ

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, установка работала в режиме воздушной газификации.

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 °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 ТЗ, расположенной на расстоянии 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.

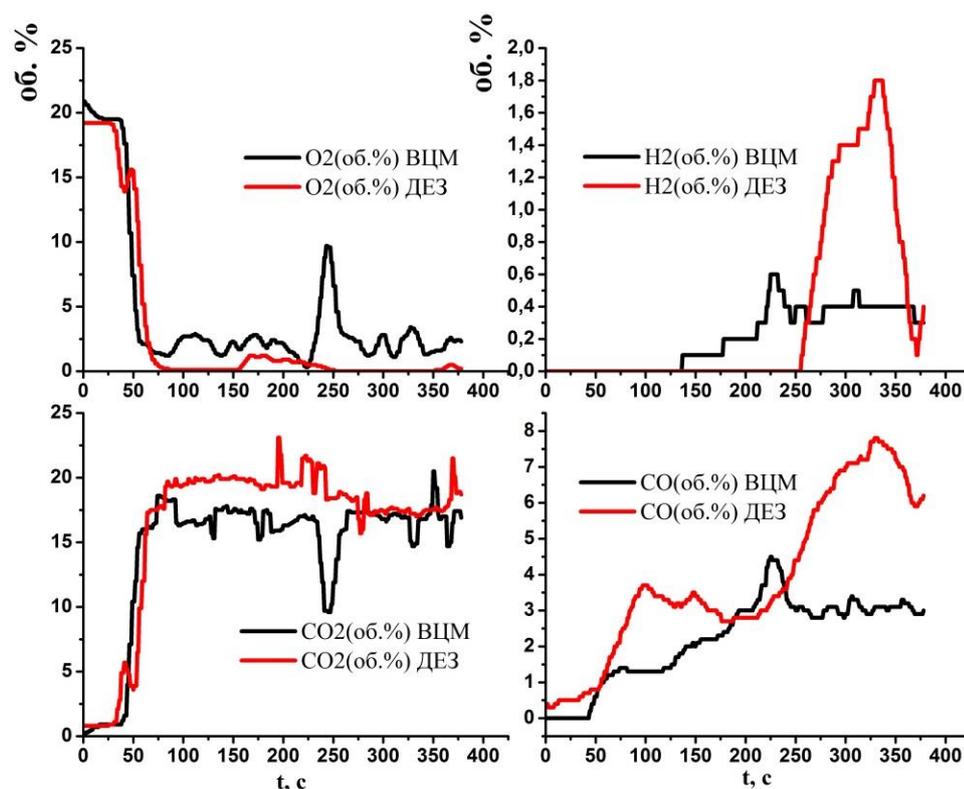
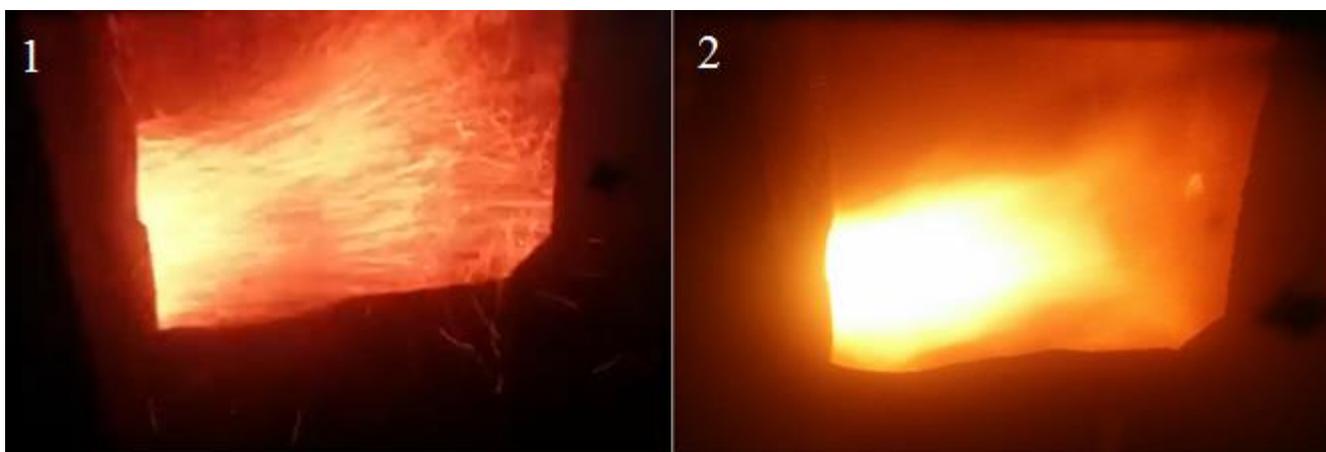


Рисунок 3.3 - Распределение концентраций газов по длине в зависимости от времени на стенде 1 МВт при сжигание угольной пыли, измельченной на мельнице - дезинтеграторе и ВЦМ

В эксперименте с измельчением угля на дезинтеграторе значение H₂ - 1,8 об.% и CO - 8 об. %, при измельчении в ВЦМ значения H₂ - 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 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.



1 - ВЦМ; 2 - Дезинтегратор

Рисунок 3.4 – Вид факела при горении угля после измельчения на различных мельницах

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.

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

3.2 Исследование горения и газификации механоактивированного угольного топлива различной степени метаморфизма на стенде 5 МВт

Эксперименты проводились на полупромышленном стенде тепловой мощностью 5 МВт (Рисунок 2.3). В процессе всего эксперимента измерялись температуры по всей длине экспериментального стенда и газовый анализ на выходе из камеры сгорания. В Таблице 3.2 приведены характеристики исследуемых углей.

Таблица 3.2 – Характеристики кузнецких углей марки Г и СС

Каменный уголь, Марка	Влажность W _{r1} , %	Зольность A _r , %	Сера S _{d1} , %	Выход летучих веществ V _a , %	Высшая теплота сгорания Q _{daf} , 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 на горелку. Пылеугольная смесь образуется перед поступлением в улиточный завихритель пылеугольной горелки, где в дальнейшем инициируется воспламенение и горение пылевоздушной смеси с помощью ЗЗУ, и она горит в условиях недостатка воздуха в муфелизированной камере сгорания, т.е. происходят воспламенение и частичная газификация угля с выходом летучих веществ (СО и Н₂ 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

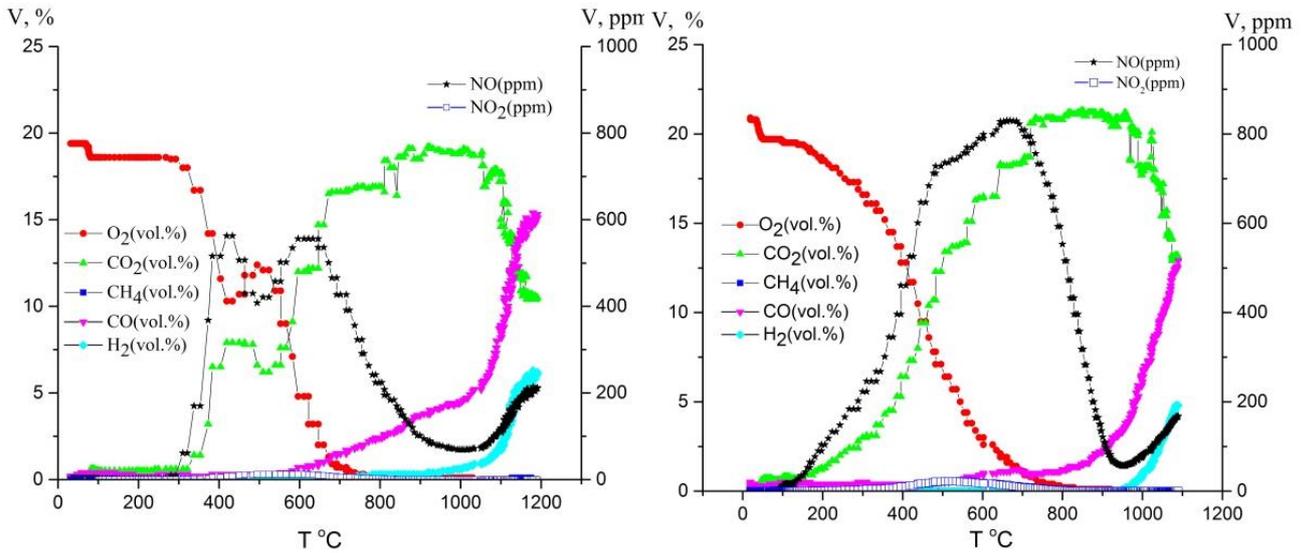
эксперимента замерялась температура и проводился газовый анализ продуктов сгорания. Трубка забора газа располагалась в конце камеры сгорания, забор осуществлялся в центре сечения камеры. В ходе испытаний определялось минимальное время выхода в автотермический режим горения, время замерялось от начала 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.

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 камеры сгорания проводились основные температурные и газоаналитические измерения.

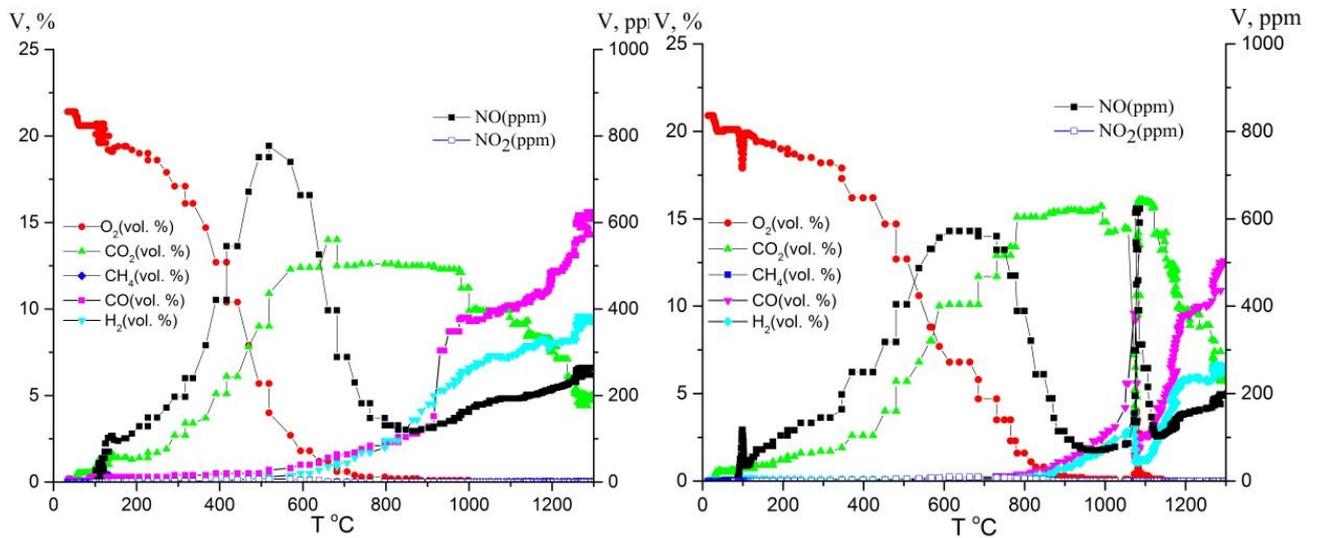
Результаты эксперимента по воспламенению и газификации каменных углей марки Г и СС представлены на Рисунке 3.5.

Во всех случаях реализуется полное выгорание O_2 , т.е. на 3 калибрах происходит выгорания 50 - 70 % угольного топлива. Когда O_2 достигает ~ 3%, концентрации CO и H_2 начинают увеличиваться. Концентрация CO_2 растёт и имеет максимум при полном выгорании O_2 , в дальнейшем начинает уменьшаться за счет протекания реакции газификации в углекислом газе [74, 75].



1(a)

1(б)



2(a)

2(б)

Рисунок 3.5 – Температурная зависимость концентраций компонентов газовой фазы при газификации механоактивированного каменного угольного топлива марки: 1 – Г, 2 – СС; а – $\alpha = 0,5$; б – $\alpha = 0,7$;

Изменение коэффициента избытка воздуха α с 0,7 до 0,5 приводит к увеличению максимальной концентрации H_2 и CO . В случае с углем марки: Г концентрация $H_2 = 4,8 - 6,3\%$ и $CO = 12,9 - 15,3\%$. Для угля марки СС $H_2 = 6,6 - 9,5\%$ и $CO = 12,5 - 15,6\%$; Уменьшение концентрации кислорода влечет за собой рост концентрации NO и CO_2 , при этом CO_2 начинает уменьшаться при 1000 - 1100 °С, а уменьшение концентрации NO происходит при 650 – 750 °С и до 900 – 1000 °С [76].

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.

3.3 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, содержащем максимальное количество летучих и занимающем одно из главных мест среди угольных месторождений Сибири. Результаты проведённого технического анализа угля приведены в Таблице 3.3.

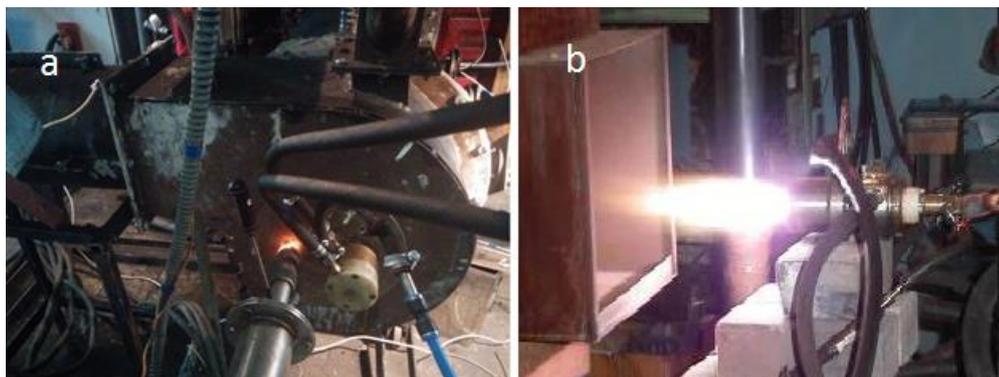
Таблица 3.3 Технический анализ угля

Параметр	Значение
Влага рабочая W^r , %	19,0
Зола, сухое состояние, A^d , %	17,6
Зола, рабочее состояние, A^r , %	14,3
Выход летучих веществ, сухое беззольное состояние V^{daff} , %	43,5
Содержание серы, сухое состояние, S^d , %	0,30
Содержание серы, рабочее состояние, S^r , %	0,24
Высшая теплота сгорания, сухое беззольное состояние, Q_s^{daf} , МДж/кг	30,7
Низшая теплота сгорания, рабочее состояние, Q^r , МДж/кг	19,3

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. Состав газа по длине реакционной камеры измеряется оптико-абсорбционным газоанализатором в трех точках, температура измеряется в этих же сечениях камеры при помощи платино-платинородиевых термопар. Расход подаваемого воздуха измеряется расходомерными шайбами и ротаметрами. 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.

На Рисунке 3.6 представлен тепловой стенд тепловой мощностью 1 МВт для сжигания и газификации угольного топлива, с расположенными по длине измерителями температуры и газового анализа, Рисунок 2.2. Уголь полученный после измельчения в штатной мельнице котла подается

питателем на дезинтегратор, после которого с транспортным воздухом поступает в улиточный вход горелки-реактора.



- а) тепловой стенд 1 МВт с плазменным управлением процесса;
 б) внешний вид работающего плазмотрона

Рисунок 3.6 –Фотографии экспериментального стенда с плазменным управлением процесса

Расчетные исследования проводились с использованием численного моделирования турбулентного течения несжимаемой жидкости в объеме горелочного устройства с применением уравнения Рейнольдса с учетом межфазного взаимодействия. Уравнения Рейнольдса замыкались с помощью двухпараметрической модели турбулентности: стандартной $k-\varepsilon$ модели. Для описания процессов движения частицы используется метод Лагранжа. Движение частицы описывается уравнениями динамики материальной точки с учетом силы сопротивления и силы тяжести. Учет турбулентности потока при движении частицы производится введением случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения для частиц. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на P1 аппроксимации метода сферических гармоник для серой двухфазной двухтемпературной среды. Процесс горения угольной частицы рассматривается в виде следующих последовательных этапов: испарение влаги из топлива, выход и горение летучих компонент и горение коксового остатка [77]. Учет механохимической активации углей осуществляется за счет добавленной в математическую модель многостадийности протекания химических реакций

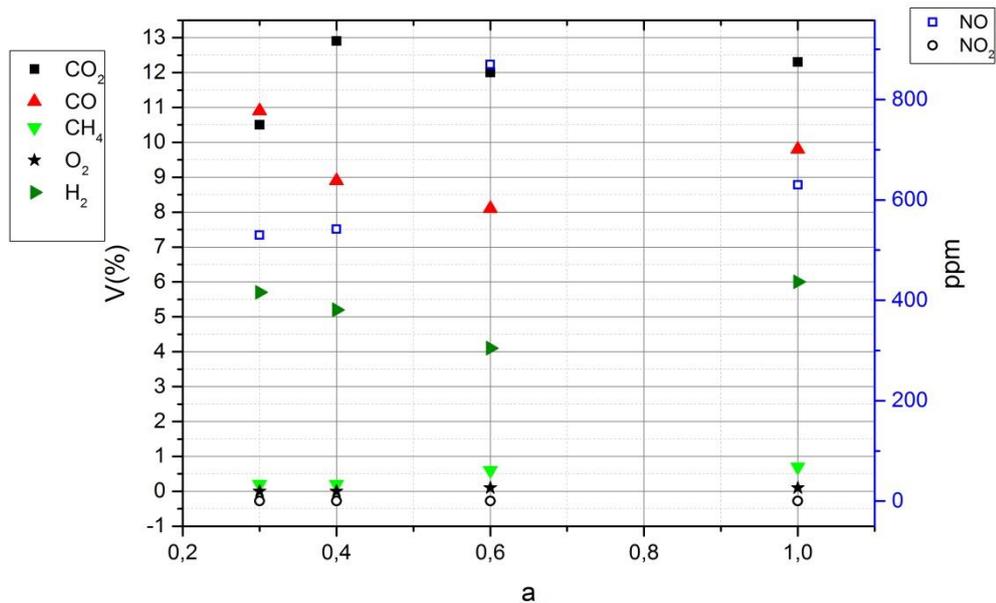
с частичным перекрытием стадий. При этом кинетические константы берутся из данных термогравиметрического анализа для механоактивированных углей [78]. Учет плазменной активации угольной пыли и появление дополнительного плазменного источника тепла учтен в виде внутреннего источника тепла с тепловыделением, характерным для мощности плазматрона. Данный источник представляет собой энергетический вклад от электрической дуги. В модель добавлено формирование источниковых членов для компонент газа при прохождении углеродного остатка через высокотемпературную область плазменной струи. Дополнительно к реакциям газификации, учитываются химические реакции углерода, характерные для плазменной активации угля. Данная модель реализована в пакете прикладных программ CFD SigmaFlow [79].

Эксперименты проводились при постоянном расходе топлива – 17 кг/ч при избытках воздуха 0.3; 0.4; 0.6; 1,0, т.е., соответственно, 35.7; 47.6; 71.4; 119 м³/час и мощности плазматрона 10 кВт.

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 α в объеме камеры и не приводит к заметному росту температуры потока. Этот же эффект влияет на изменение концентрации СО за счет реакции восстановления СО₂, т.к. последняя требует большего времени по сравнению с реакцией окисления углерода, протекающей с большой скоростью.

Следует отметить, что концентрация кислорода в камере при всех α близка к нулю, т.е. на всех этапах горения кислород расходуется полностью (Рисунок 3.7). Концентрация окисла углерода в зависимости от

коэффициента избытка воздуха изменялась в пределах 12 - 15%, а водорода – 7.5 - 10%, причем концентрация CO с ростом α снижается, а водорода – возрастает, при этом концентрация CO₂ с ростом α уменьшается с 12 до 10%. Отмеченные эффекты связаны с изменением температуры, а также временем пребывания пылевзвеси угля в камере реагирования [80].



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

Рисунок 3.7 - 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 CO и H₂ 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 микропомола 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 3.4), что наблюдается удовлетворительное соответствие с результатами эксперимента.

Таблица 3.4 – Состав газов на выходе из камеры второй ступени при коэффициентах избытка воздуха $\alpha=0.6$

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

Далее были выполнены расчетные исследования при различных коэффициентах избытка воздуха. По результатам расчета, при коэффициенте избытка $\alpha=1$ наблюдается полное выгорание угольного топлива, форма факела характеризует улиточный ввод топлива и окислителя в ступень горелки. Локальные максимальные температуры в камере достигают 1700 С. При снижении коэффициента избытка воздуха до 0.6, температуры в камере снижаются, что объясняется неполным сгоранием топлива и протеканием эндотермических реакций газификации. Максимальные локальные температуры не превышают 1400 °С. При уменьшении коэффициента избытка воздуха в камере до 0.3 наблюдается дальнейшее снижение температур с увеличением продуктов процесса газификации. При $\alpha=1$ на выходе отсутствуют оксид углерода и водород. При снижении до $\alpha=0.6$ можно видеть значительную концентрацию CO уже в первой части камеры и более медленное повышение концентрации водорода по длине камеры второй ступени. При снижении коэффициента избытка воздуха до 0.3, наблюдается значительное повышение концентрации CO и H₂ ,до 31% и 8.9 % соответственно. В Таблице 3.5 приведены результаты численных исследований в виде состава продуктов газификации на выходе из второй

ступени горелочного устройства. Можно видеть, что при снижении коэффициента избытка воздуха уменьшается концентрация продуктов сгорания и увеличивается концентрация CO и H₂.

Таблица 3.5 – Состав газов на выходе из камеры второй ступени при различных коэффициентах избытка воздуха

Состав газа (% об.)	CH ₄	CO	H ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂
$\alpha=1$	0	0.5	0	8.6	16.3	74.6
$\alpha=0.6$	0.6	6.3	3.1	9.0	15	66
$\alpha=0.3$	4.9	31.7	8.9	1.3	1.7	50.8

В Таблице 3.6 даны результаты численных исследований по влиянию наличия плазмотрона на процесс газификации угольной пыли. Учет плазмотрона был выполнен добавлением плазменного источника тепла в виде внутреннего источника тепла с тепловыделением, характерным для мощности плазмотрона 10 кВт. По результатам расчета можно видеть, что плазменная активация механоактивированного угольного топлива приводит к улучшению состава газа на выходе. Так концентрация CO повышается с 31.7 до 33 %, а концентрация водорода с 8.9 до 10.5 % [81].

Таблица 3.6 – Состав газов на выходе из камеры второй ступени при коэффициентах избытка воздуха $\alpha=0.3$ с учетом плазменного источника тепла мощностью 10 кВт

Состав газа (% об.)	CH ₄	CO	H ₂ ,	H ₂ O	CO ₂	N ₂	O ₂
Воздушная газификация	4.9	31.7	8.9	1.3	1.7	51.5	0
Воздушная газификация с плазматроном	4.4	33	10.5	0.8	1.5	49.8	0

3.4 Экспериментальное и численное исследование паровоздушной газификации механоактивированного угля

Для повышения реакционной способности угля осуществлён его микропомол в мельнице дезинтеграторного типа [82]. Фракционный состав пыли угля, полученной на мельнице-дезинтеграторе, определён оптически-цифровым методом в диапазоне диаметров частиц 0 - 180 мкм [83]. Максимальный размер частиц не превышал 70 мкм.

Из мельницы угольная пыль посредством разрежения, создаваемого эжектором, поступает в улиточный вход квадратного сечения с гранью 108 мм, где пылевоздушный поток закручивается и воспламеняется с помощью запально-защитного устройства (ЗЗУ), встроенного в улиточный завихритель. Закрученный поток газов и угля поступает в камеру газификации диаметром 150 мм и длиной 1,1 м. Затем поток поступает в камеру дожигания, где горючие компоненты синтез-газа догорают на «свече». Регулируя количество подаваемого воздуха и угля можно работать в режимах как газификации так и полного сгорания.

Расход пара регулировался по расходу питательной воды в парогенератор, оснащенный уровнемером. Температура пара регулируется в пределах 100 - 250 °С.

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.

Три термопары установлены в камере газификации на расстояниях 300, 500 и 800 мм (T_1 , T_2 , T_3) от торца завихрителя и одна в камере догорания (T_4). Первая термопара имеет программное ограничение измеряемой температуры – 1300°C . Огнеупорная державка термопары выполнена из нержавеющей трубки с изолирующей керамической вставкой. Для измерения газового состава продуктов реагирования использовалась система на основе многокомпонентного газоанализатора ТЕСТ-1.

Перед проведением каждого эксперимента тарировались питатель топлива и датчики расхода воздуха, проводилось тестирование системы газового и температурного анализа.

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 $\text{м}^3/\text{ч}$ (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 3.7. Температура и состав газа соответствуют точке T_3 .

Таблица 3.7 - Результаты экспериментов

№	α	Расход пара, кг/ч	Температура в точке T ₃ , °C	O ₂ , об. %	H ₂ , об. %	CO ₂ , об. %	CO, об. %	CH ₄ , об. %	Теплота сгорания сухого газа, МДж/м ³
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

На Рисунке 3.8 представлены изменения температуры и состава сухого газа в процессе воспламенения, горения и газификации механоактивированного пылеугольного топлива в паровоздушной среде[84].

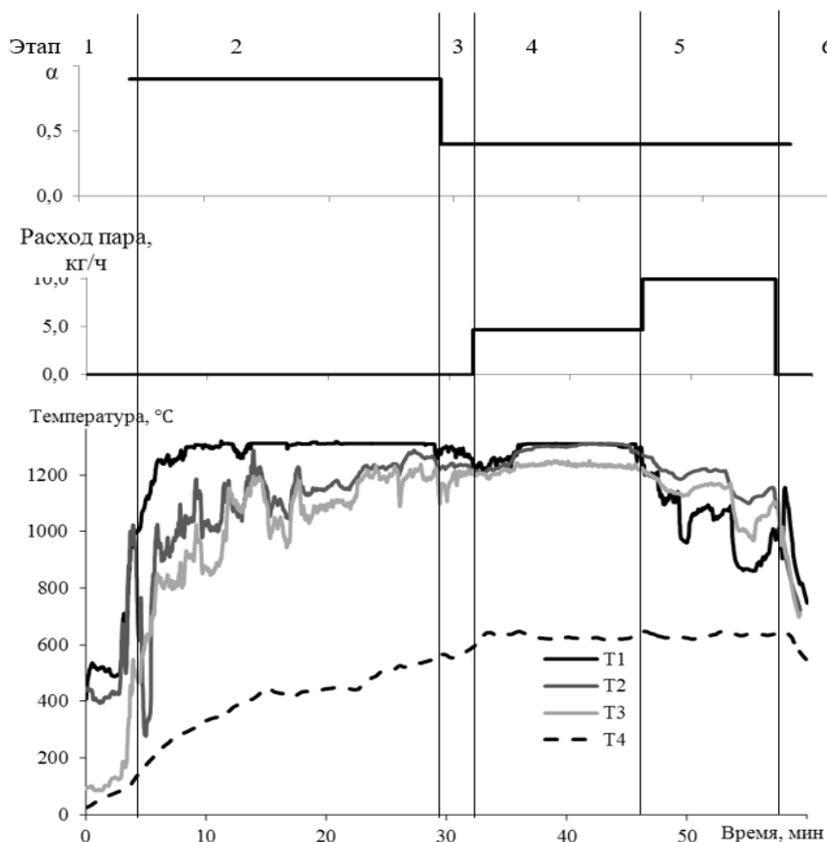


Рисунок 3.8 – Результаты эксперимента: коэффициент избытка воздуха; расход пара; температуры в точках забора газа.

Из Рисунка 3.8 видно, что чем дальше термопара расположена от завихрителя, тем ниже её температура, что обусловлено расположением максимальных температур (факела) в области завихрителя. Исключением является лишь режим 4, в котором температура первой термопары ниже, чем у второй и третьей из-за резкого охлаждения начального участка установки большим расходом пара (10 кг/ч). Благодаря высокой $\alpha=0,9$ первый режим характеризуется постепенным ростом температуры во всех точках замера. При переходе ко второму режиму (снижении α 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.

Первый этап (разогрев камеры с помощью ЗЗУ) характеризуется постепенным увеличением температуры во всех точках. При переходе ко второму этапу (подача угля при $\alpha=0,9$) температура резко возрастает благодаря большому тепловыделению при горении угля. Третий этап ($\alpha=0,4$) характеризуется снижением температуры из-за повышения скорости образования CO относительно CO₂. Соответственно количество выделяющей теплоты снижается. Начало подачи пара с расходом 4,7 кг/ч (4 этап) приводит к кратковременному снижению температуры, но затем она возрастает и достигает своего максимума, что объясняется прогревом стенок камеры. При повышении расхода пара в два раза (до 10 кг/ч, 5 этап) температура начинает снижаться. На этом этапе температура в камере дожигания T4 практически не изменяется, что косвенно свидетельствует о стабилизации температуры стенки газификатора. На 6 этапе (выключение установки) температуры снижаются до температуры окружающей среды.

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 [85]. Моделирование проводилось на неструктурированной сетке с 550 тысячами расчетных элементов. Размер сетки выбирался по следующей процедуре: сравнивался состав, полученный на сетках с размерами от 100 до 1000 тысяч расчётных элементов. Удовлетворительным считался размер сетки, при котором дальнейшее увеличение сетки не влияет на состав синтез-газа более, чем на 5%. К базовым подмоделям CFD-моделирования относятся следующие уравнения: неразрывности, энергии, переноса компонентов среды, равновесия сил для дискретной фазы, закон сохранения импульса и т.д. Использовалась подмодель турбулентности $k-\epsilon$ (стандартного вида), верификация которой приведена в работе [86]. В качестве модели радиации (переноса энергии излучением) использована дискретная подмодель излучения (32 луча) с подмоделью “серых” газов. Количество рассчитываемых траекторий движения частиц топлива равнялось 2000. На выходе из установки задавались условия открытого пространства, заполненного азотом с температурами от 1000 до 1200 °С. На стенках установки выполнялось условие прилипания. Температура стенки при расчётах экспериментальных режимов определялась путём сопоставления экспериментальных и расчётных данных, а при неэкспериментальных режимах считалась адиабатной. В качестве расчётного алгоритма выбран так называемый полностью сопряженный метод решения (Fully Coupled Solver) при котором скорость и давление в расчётном элементе определяются одновременно. На каждый расчет требовалось 500–1000 итераций. Максимальное значение среднеквадратичной невязки составляло 0,001, небаланс по переменным не превышал 5%, что обусловлено определённой нестационарностью процесса ввиду асимметрии конструкции.

Температура внутренней стенки реактора во время проведения эксперимента не контролировалась, поэтому её величина определялась в ходе численного моделирования. Температура внутренней стенки установки с

течением времени постепенно возрастала подобно температуре в камере дожигания.

Отдельные элементы данной модели были ранее верифицированы с использованием экспериментальных данных по полному сгоранию угля. В настоящей работе определение степени применимости модели для моделирования подобного рода задач осуществлялось путём сравнения полученных экспериментальных данных с результатами моделирования.

Сравнение результатов термодинамического расчёта с экспериментальными данными приведены на Рисунке 3.9 – 3.11.

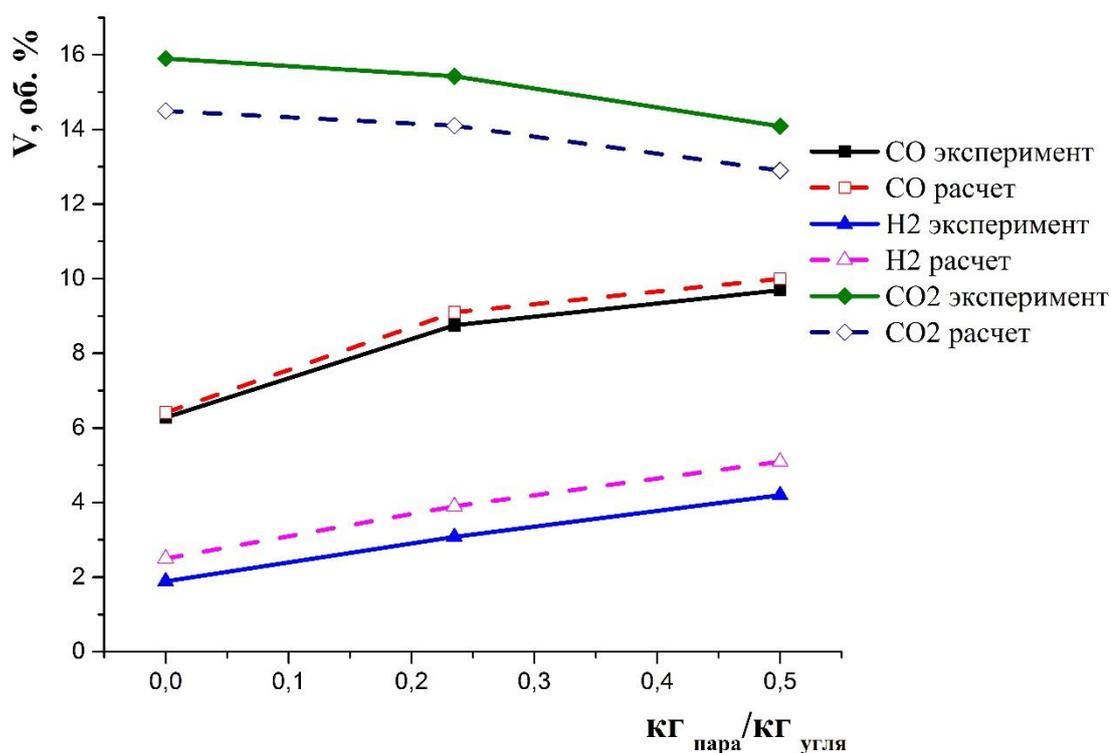


Рисунок 3.9 - Результаты термодинамического расчёта работы экспериментальной установки концентрация компонентов сухого синтез-газа;

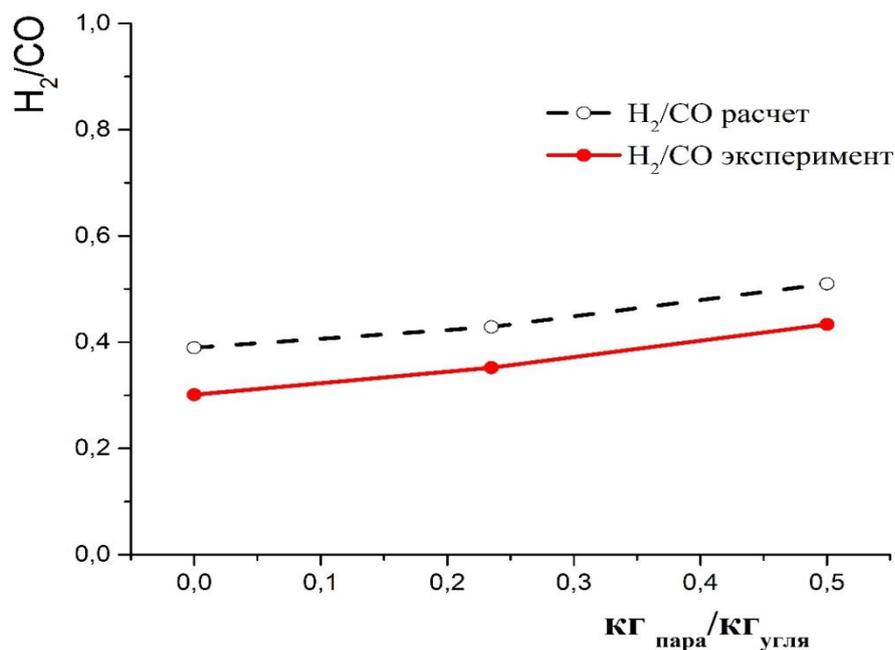


Рисунок 3.10 - Результаты термодинамического расчёта работы экспериментальной установки. Отношение концентраций H_2/CO

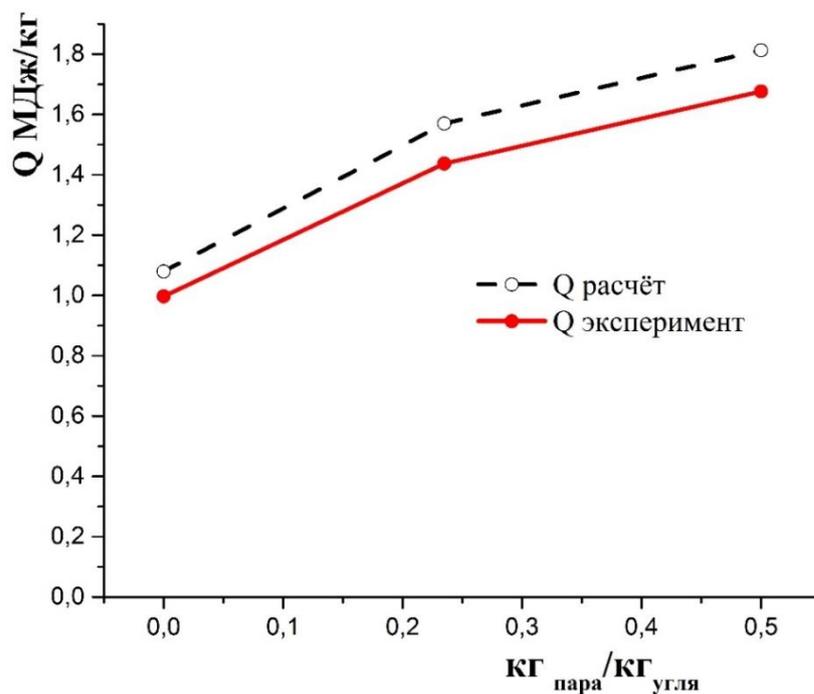


Рисунок 3.11 - Результаты термодинамического расчёта работы экспериментальной установки. Теплота сгорания синтез-газа

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, малого времени пребывания и больших потерь теплоты в окружающую среду.

3.5 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 2.5) 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 $\alpha = 0,9 \div 1,1$ [87].

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 CO и H₂ достигает 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 3.12, 3.13 представлены результаты двухступенчатого сжигания и газификации угля.

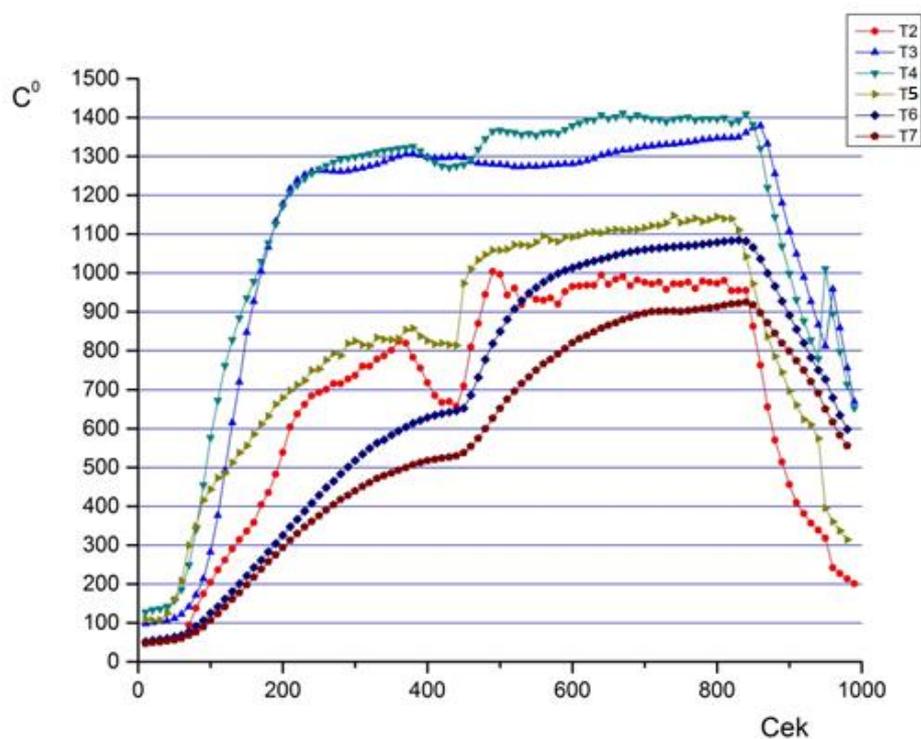


Рисунок 3.12 – Изменение температуры в процессе воздушной двухступенчатой газификации угля

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 1300⁰С. При подаче угля стандартного помола происходит кратковременное снижение температуры с выходом через 150 сек на стационарный уровень 1400⁰С.

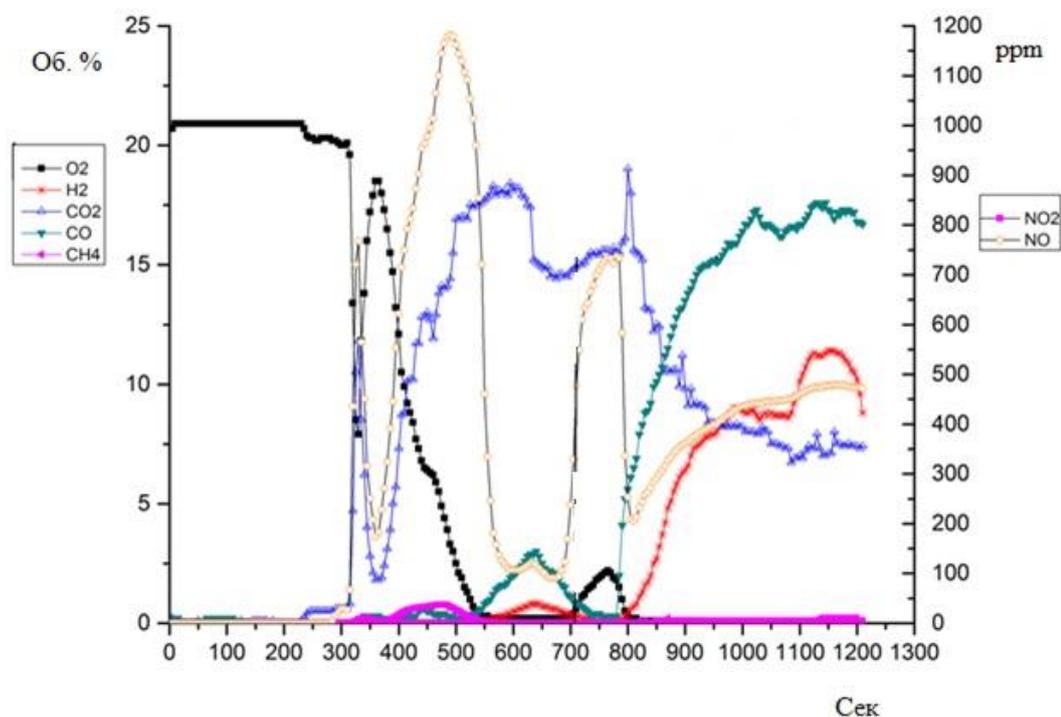


Рисунок 3.13 – Изменение концентрации газов при воздушной газификации в двухступенчатом процессе

Рассмотрение газового анализа в данном эксперименте (Рисунок 3.13) подтверждает предполагаемый механизм протекающих процессов: после воспламенения факела механоактивированной пылевзвеси. Происходит падение до нуля концентрации кислорода с ростом до максимального значения концентрации CO₂, 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 H₂ равен 7,5 % [88].

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.

3.6 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-40-1 ст. 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^3 , топка квадратная $8500\div 8500$ 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.

3.7 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:
- муфельизированные 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;
- строительные - 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.

1. Единовременные затраты

Суммарные единовременные затраты на переоснащение котла приведены в Таблице 3.8.

Таблица 3.8 - Суммарные единовременные затраты на переоснащение котла при переводе с мазутного розжига и подсветки на механоактивированный уголь микропомола, оценочные в ценах 2014 г.

	Перечень дополнительных затрат	тыс. руб	Организации, предоставившие информацию
1	Дополнительное оборудование для переоснащения котла.	11 500	
2	Проектные работы	1 200	ОАО “ЗИО-КОТЭС”
3	Строительно-монтажные работы	3 600	ОАО “СибЭНТЦ”, НО ТЭП
4	Шефмонтаж, пусконаладочные и испытательные работы	1 200	ОАО “ЗИО-КОТЭС”, ИТ СО РАН
5	Резерв средств на непредвиденные работы и затраты	2 000	ИТ СО РАН
	ИТОГО	19 500	

В Таблице 3.9 приведены капитальные затраты на дополнительное оборудование.

Таблица 3.9 - Капитальные затраты на дополнительное оборудование переоснащения котла, оценочные в ценах 2014 г.

Дополнительные капитальные затраты	1 шт., тыс.руб.	Всего, тыс.р уб	Организация, представившая информацию
1.Оборудование механоактивированного микропомола угля – мельницы ДМ – 2 , всего 3 шт, в т.ч. 1 резервная (на 2 корпуса)	1000	2 500	Инженерно-производственное предприятие «Продсельмаш».
2) Нестандартные элементы, всего		4 500	
в т. ч.			
• муфельные горелки, 2 шт.	750	1 500	ОАО «СибЭНТЦ», НО ТЭП
• различные узлы подачи угольной пыли и воздуха		3 000	ОАО «СибЭНТЦ», НО ТЭП
Итого капитальные затраты		11 500	

2. Текущие затраты

Для определения показателей текущих затрат к технико-экономическому обоснованию - экономической и финансовой состоятельности Проекта – использовались данные, предоставленные службой ПТО Беловской ГРЭС «Кузбассэнерго» для 12-ти котлов ПК – 40 (шесть 2-х корпусных). Показатели текущих затрат приведены в Таблице 3.10.

Таблица 3.10 - Показатели текущих затрат для котла ПК- 40-1 (1 корпус) по состоянию на 31.12.2014 г.

Мазут	
годовой расход, тнт	1 400
калорийность, ккал	9784
поставщик	*
цена 1 тнт (без НДС), руб.	6642,29
цена 1 тнт (с НДС), руб	7837,90
Уголь	
марка используемых углей	Кузнецки й каменный **
калорийность, ккал	4967
количество сожженного угля, тнт	224 924
цена 1 тнт (без НДС),руб.	757,47
цена 1 тнт (с НДС), руб.	893,81
Электроэнергия:	
стоимость на собственные нужды, руб./кВтч	0,583

* Мазут приходит от 8 поставщиков: «Сибэнергоугольснаб»; «Инвестэнерго»; ст. «Комбинатская»; Новоуфимский н/з-д; ООО «Арбачаков компания»; «Газпромнефть»; ООО «Север»; ООО «ГСМ – ГРУПП».

**Всего за отчетный год электростанция сожгла 9 марок угля от 15 поставщиков (в 2008 г. от 18 поставщиков), в основном это марки ДР (58,829 %), Г - смесь (22,608 %, в составе смеси: ДР – 14,684 %; ГР – 1,77 %; ГОМСШ – 0,102; пр/пр – 0,468 %; шлам – 5,584 %), ГР (8,511 %), ДГР (5,633 %), ГСШ (3,722 %), ДГОМСШ (0,697 %).

Текущие затраты при мазутной растопке учитывали стоимость расходуемого мазута ($Z_{\text{маз}}$), рассчитываемую по формуле (3.13).

$$Z_{\text{маз}} = C_{\text{маз}} \times V_{\text{маз}}, \quad (3.13)$$

где $C_{\text{маз}}$ - цена 1 тнт мазута, $V_{\text{маз}}$ – объем используемого мазута, тнт.

Затраты на применение мазута не учитывались.

Текущие затраты при технологии механоактивированного угля микропомола учитывали стоимость угля, замещающего мазут по тепловому эквиваленту ($Z_{\text{уг.зам}}$) – формула (3.14), и затраты электроэнергии на его помол ($Z_{\text{э/э, уг.зам}}$) – формула (3.16).

$$Z_{\text{уг.зам}} = C_{\text{уг}} \times V_{\text{уг.зам}}, \quad (3.14)$$

где $C_{\text{уг.зам}}$ – цена угля,

$V_{\text{уг.зам}}$ – объем замещающего мазут угля тнт

$$V_{\text{уг.зам}} = (V_{\text{маз}} \times K_{\text{маз}}) / K_{\text{уг}}, \quad (3.15)$$

где $K_{\text{маз}}$ - калорийность мазута, $K_{\text{уг}}$ – калорийность угля.

$$Z_{\text{э/э, уг.зам}} = T_{\text{сн}} \times K_{\text{ээуг}} \times K_{\text{ум}} \times V_{\text{уг.зам}}, \quad (3.16)$$

где $T_{\text{сн}}$ - тариф на электроэнергию на собственные нужды, руб/кВтч,

$K_{\text{ээуг}}$ – удельный расход электроэнергии на помол угля, равный 30 кВтч/тнт,

$K_{\text{ум}} = 0,3$ – учитывающий снижение необходимого объема угля для микропомола в связи со схемой сжигания.

Суммарная экономия $\Delta_{\text{тек}}$ предприятия на текущих затратах будет состоять из разницы затрат на мазут $Z_{\text{маз}}$ и затрат на замещающий мазут уголь и его микропомол ($Z_{\text{уг.зам}} + Z_{\text{э/э, уг.зам}}$), формулы (3.17).

$$\Delta_{\text{тек}} = Z_{\text{маз}} - (Z_{\text{уг.зам}} + Z_{\text{э/э, уг.зам}}) \quad (3.17)$$

3. Общеэкономические параметры.

Принятые в расчете общеэкономические показатели приведены в Таблице 3.11.

Продолжение таблицы 3.12

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									
<i>текущие</i>	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 микропомола 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)	2,47
Внутренняя норма доходности (ВНД), %	51%
Дисконтированный срок возврата инвестиций, лет	3,24
Срок возврата инвестиций, лет	2,92

Согласно Методическим рекомендациям по оценке инвестиционных проектов была проведена проверка реализуемости и оценка эффективности Проекта в зависимости от изменения параметров.

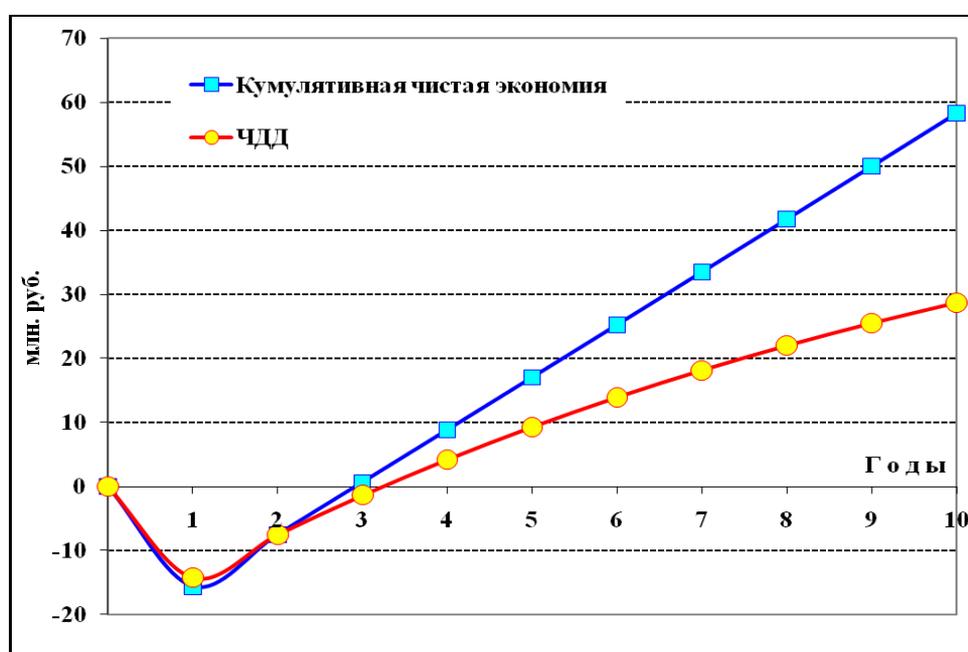


Рисунок 3.14 - Финансовый профиль проекта

На Рисунке 3.15 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.

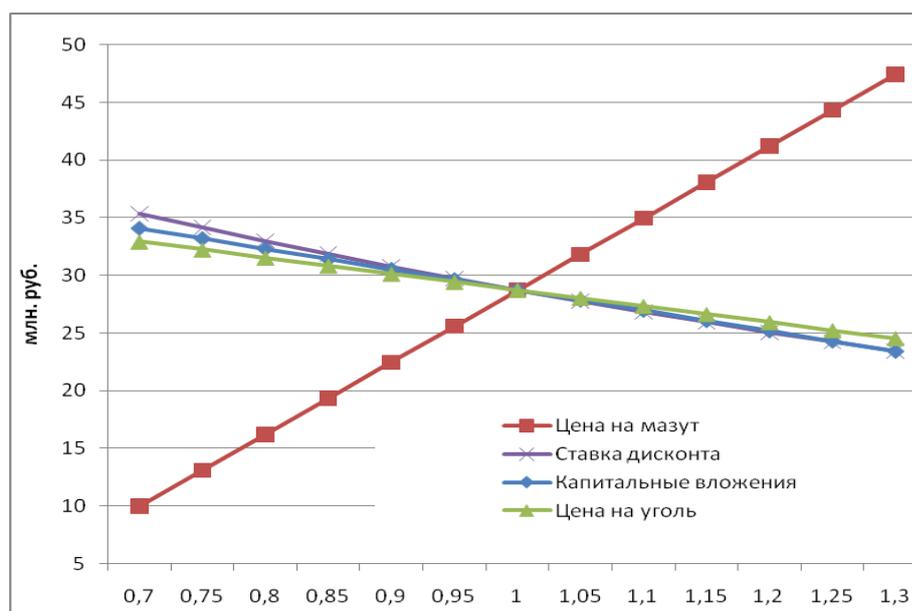


Рисунок 3.15 - Анализ чувствительности проекта (показатель ЧДД)

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.

3.8 Выводы по главе 3

На двухступенчатом стенде тепловой мощностью до 5 мВт проведены первые успешные эксперименты по двухступенчатому горению и воздушной газификации на Кузнецком каменном угле марки Д.

Получено устойчивое автотермическое горение пылевзвеси кузнецких углей двух марок – Г и СС с применением 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.

Испытан запуск установки с использованием плазмотрона, а также вод плазменной струи в реакционную камеру для управления тепловым режимом процесса газификации. С использованием расчетных исследований показано, что плазменная активация механоактивированного угольного топлива, приводит к улучшению состава генераторного газа на выходе.

Проведенные экспериментальные исследования паровоздушной газификации угля в поточном реакторе с различными режимами работы позволили установить зависимость состава и теплоты сгорания синтез-газа от коэффициента избытка воздуха (0,4-0,9) и расхода водяного пара (0-10 кг/ч) в установке. С использованием полученных экспериментальных данных верифицирована подмодель термохимических процессов (ТХП), являющаяся ключевой при моделировании газификации. Осуществлено численное исследование паровоздушной газификации угля в применяемом реакторе, проанализированы особенности его работы.

Проведенные 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» продемонстрировали положительные результаты замещения мазута механоактивированным углем микропомола. Розжиг котла был осуществлен механоактивированным углем микропомола, осуществленным мельницей дезинтегратором.

ГЛАВА 4 ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННАЯ БЕЗОТХОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ТОПЛИВНОГО ГАЗА ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Электроплазменная газификация является комплексной технологией, включающая 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.

В основе технологии переработки отходов лежит высокотемпературная (плазменная) газификация твердых органических (углеродсодержащих) отходов с получением высококалорийного (6-10 МДж/нм³) синтез-газа (смесь CO + H₂), который предназначен для производства электроэнергии. Неорганическая составляющая отходов (зола) под действием высокой температуры (1600-1700 °С) переходит в шлаковый расплав и с последующей грануляцией приобретает нейтральные свойства к окружающей среде и может быть использована в строительной индустрии.

4.1 Экспериментальный стенд и электроплазменное оборудование

Оборудование электроплазменной установки размещено в экспериментальном стенде для исследования электродуговых плазмотронов. Мощности исследуемых плазмогенераторов составляют от 10 до 200 кВт. В качестве источников электропитания используются тиристорные выпрямители тока АПР-404 с параметрами $U_{\text{хх}}=320$ В, $I_{\text{ном}}=400$ А, $P \approx 125$ кВт. Два источника, соединенных последовательно, обеспечивают $U_{\text{хх}}=640$ В, $I_{\text{ном}}=400$ А и мощность P около 250 кВт. Для изменения силы тока дугового разряда в электрическую схему включено балластное сопротивление от 0,6 до 8 Ом в виде водяного реостата (труба в трубе). Поджиг дуги в плазмотроне осуществляется ВЧ-осциллятором.

Электрическая схема экспериментального стенда с измерениями тока и напряжения дуги приведена на Рисунке 4.1(а,б,в).

Плазмообразующими газами на стенде являются сжатый воздух из общеинститутской магистрали, аргон, азот, гелий, природный газ из баллонов высокого давления. Их расходные характеристики обеспечивают требуемые параметры для плазмотронов различных конструктивных схем и назначения.

Схема газоснабжения стенда приведена на Рисунке 4.2 (а,б).

Для охлаждения электродов плазмотрона и элементов плазменной электропечи используется обратное водоснабжение из общеинститутского коллектора. Расходы воды с давлением до 10 атм обеспечивают потребности стенда и электроплазменной установки в полном объеме. Схема водоснабжения экспериментального стенда приведена на Рисунке 4.3.

Расходы охлаждающей воды и плазмообразующего газа, тока и напряжения дугового разряда измерялись с точностью не более $\pm 1\%$.

Электроплазменная установка для газификации отходов и получения синтез-газа (топливного газа) состоит из набора уникальных теплофизических устройств и элементов:

- плазменно-термическая электропечь;
- центробежно-барботажный аппарат (вихревой скруббер);
- дожигатель дымовых газов;
- охладитель газов;
- электрофильтр тонкой очистки;
- вентиляционная система.

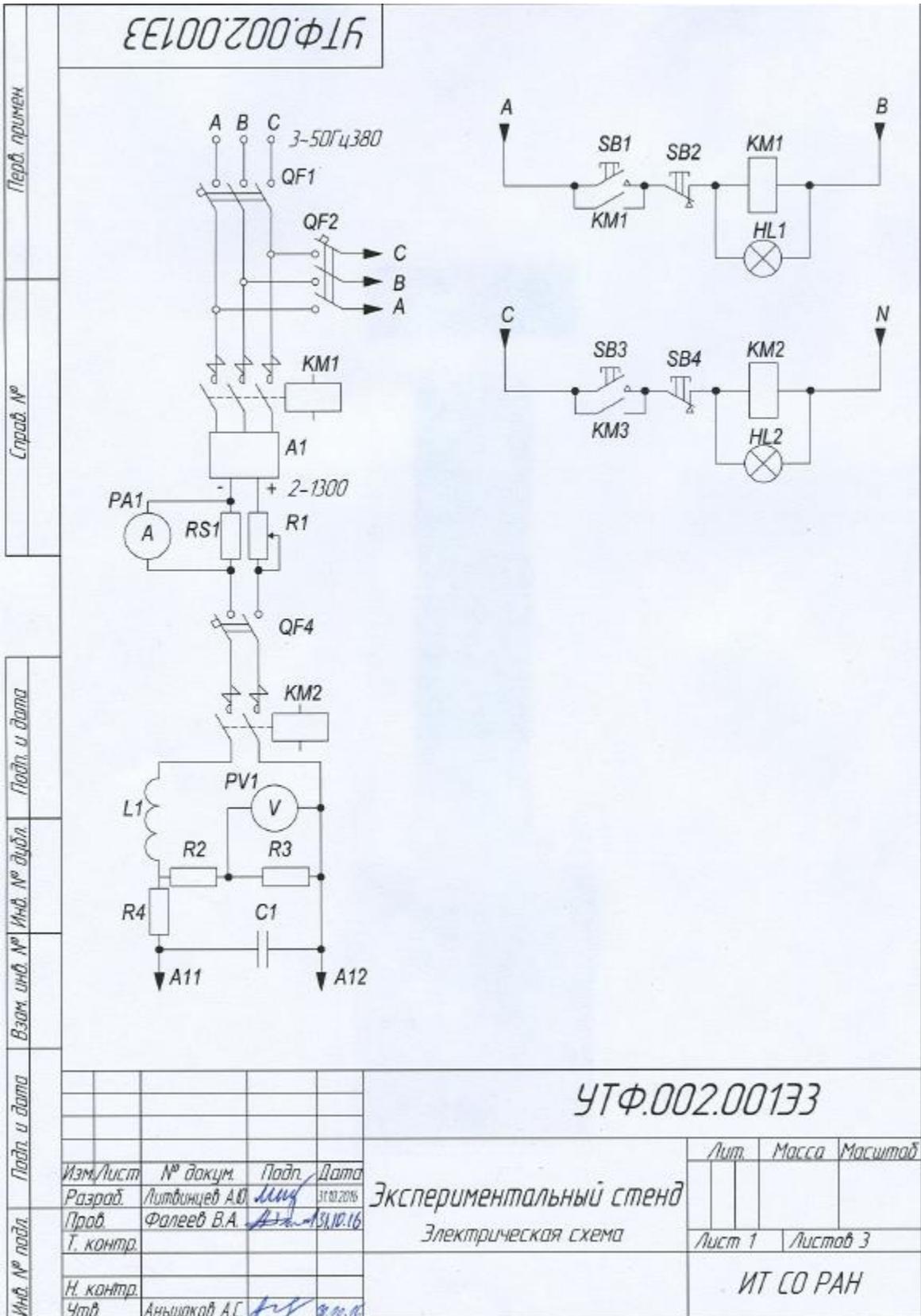


Рисунок 4.1 а - Электрическая схема экспериментального стенда

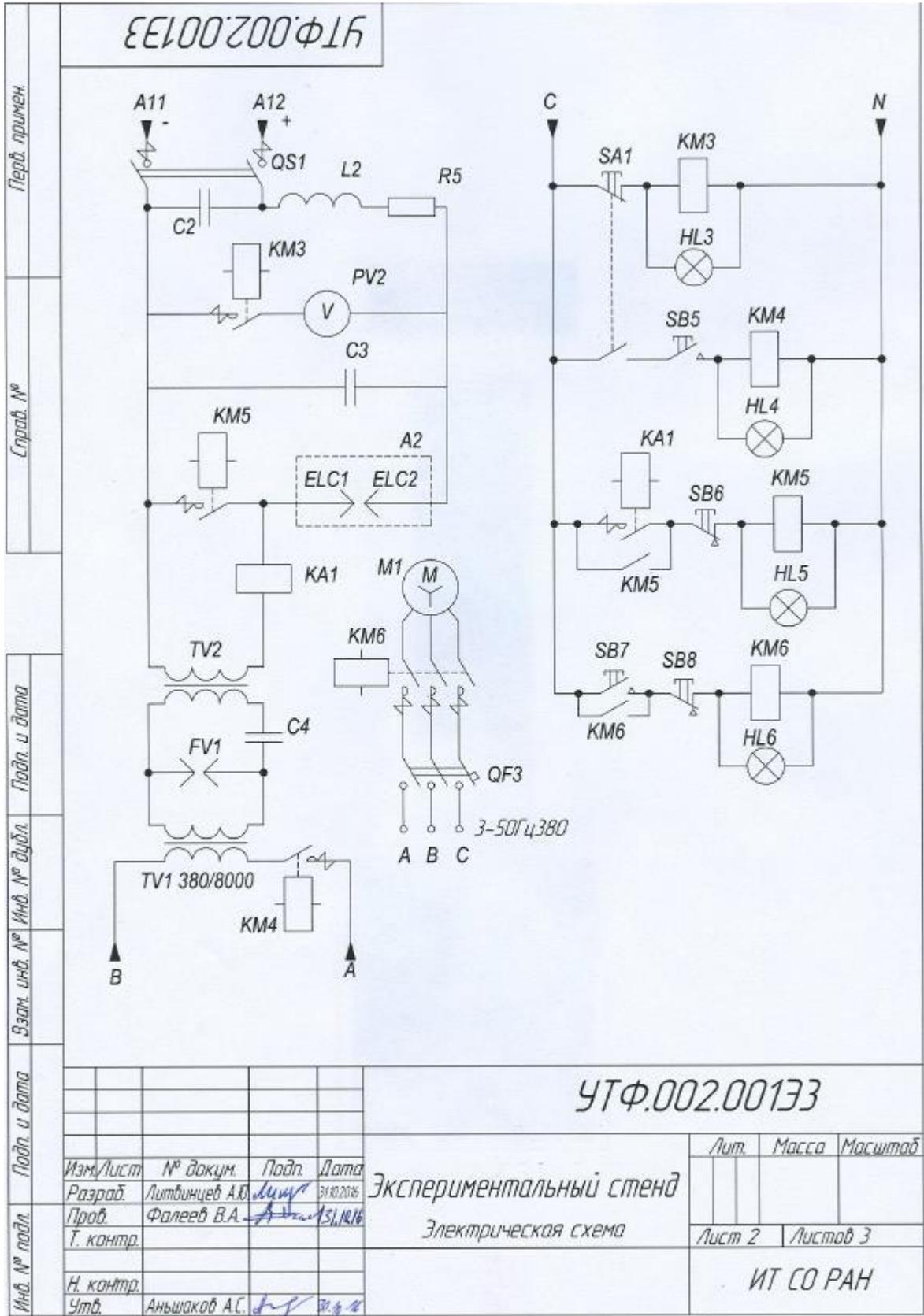


Рисунок 4.1 б - Электрическая схема экспериментального стенда
(продолжение)

Перв. примен.		УТФ.002.00133				
		Поз. Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
Справ. №		QF1.3	Автомат трехполюсной	3		
		KM1.6	Контактор трехполюсной магнитный пускатель	2		
		A1	Инвертор 3-50Гц380/2-1300	1		
		QF4	Автомат двухполюсной	1		
		KM2	Контактор двухполюсной магнитный пускатель	1		
		R1	Реостат водяной	1		
		RS1	Шунт	1		
		QS1	Разъединитель	1		
		PA1	Амперметр	1		
		R2.3	Резистор делителя напряжения	2		
Взам. инв. №		PV1.2	Вольтметр	2		
		KM3.5	Контактор однополюсной магнитный пускатель	3		
		M1	Двигатель вентилятора	1		
		C1.4	Конденсатор конденсатор	1		
		L1.2	Индуктивность	2		
		R4.5	Резистор	1		
		TV1.2	Трансформатор	2		
		FV1	Разрядник	1		
		SB1.8	Выключатель кнопочный	8		
		SA1	Переключатель двухпозиционный	1		
Инв. № подл.		HL1.6	Лампа сигнальная	6		
		A2	Электроплазменный генератор	1		
		ELC1	Катод	1		
		ELC3	Анод	1		
Инв. № подл.		УТФ.002.00133				
		Экспериментальный стенд			Лит.	Масса
Инв. № подл.		Электрическая схема			Лист 3	Листов 3
					ИТ СО РАН	
		Изм/лист	№ докум.	Подп.	Дата	
		Разраб.	Литвинцев А.В.	Лит	31.10.2016	
		Проб.	Фалеев В.А.	Афан	31.10.16	
		Т. контр.				
		Н. контр.				
		Утв.	Аньшаков А.С.	Ан	31.10.16	

Рисунок 4.1 в - Электрическая схема экспериментального стенда
(продолжение)

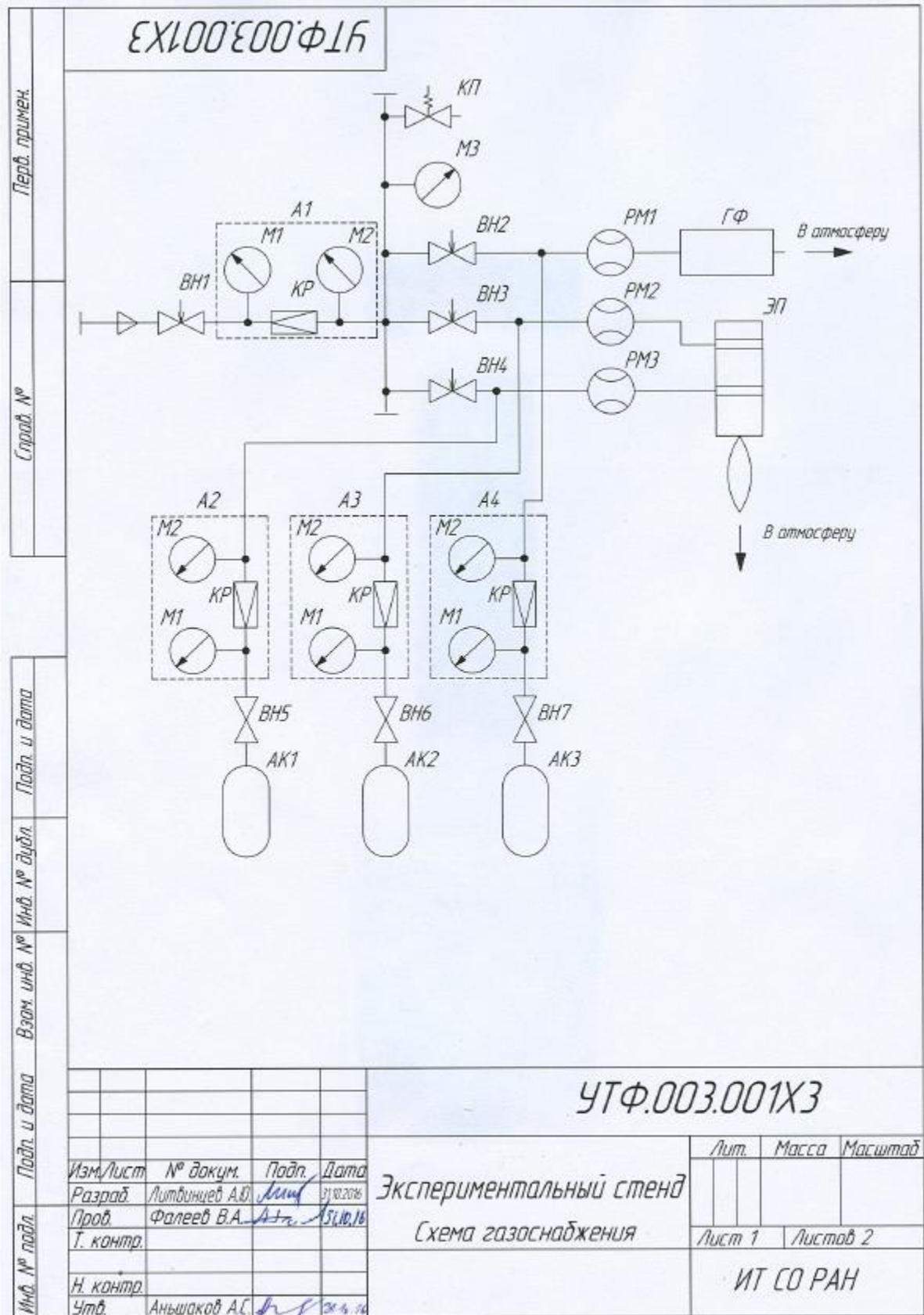


Рисунок 4.2 а - Схема газоснабжения стенда

		УТФ.003.001ХЗ						
Перв. примен.	Поз. Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание				
	A1..A4	Редуктор	4					
	M1	Манометр до 25МПа	1					
	M2	Манометр до 25МПа	1					
	KP	Клапан редукционный	1					
Стрел. №								
	BH1..BH4	Вентиль регулирующий проходной	4					
	M3	Манометр до 25МПа	1					
	KП	Клапан предохранительный	1					
	BH5..BH7	Вентиль запорный проходной	3					
	PM1..PM3	Ротаметр	3					
	AK1..AK3	Баллон с газом	3		аргон, углекислый газ, природный газ			
	ГФ	Газификатор	1					
	ЭП	Электроплазменный генератор	1					
Подп. и дата								
Взам. инв. №								
Инв. № дубл.								
Подп. и дата	УТФ.003.001ХЗ							
Инв. № подл.	Изм/лист	№ докум.	Подп.	Дата	Экспериментальный стенд Схема газоснабжения	Лит.	Масса	Масштаб
	Разраб.	Литвинцев А.Ю.	<i>Лит</i>	31.03.16				
	Пров.	Фалеев В.А.	<i>Ф</i>	31.03.16				
	Т. контр.					Лист 2	Листов 2	
	Н. контр.							
Утв.	Аньшаков А.С.	<i>А</i>	31.03.16		ИТ СО РАН			

Рисунок 4.2 б - Схема газоснабжения стенда (продолжение)

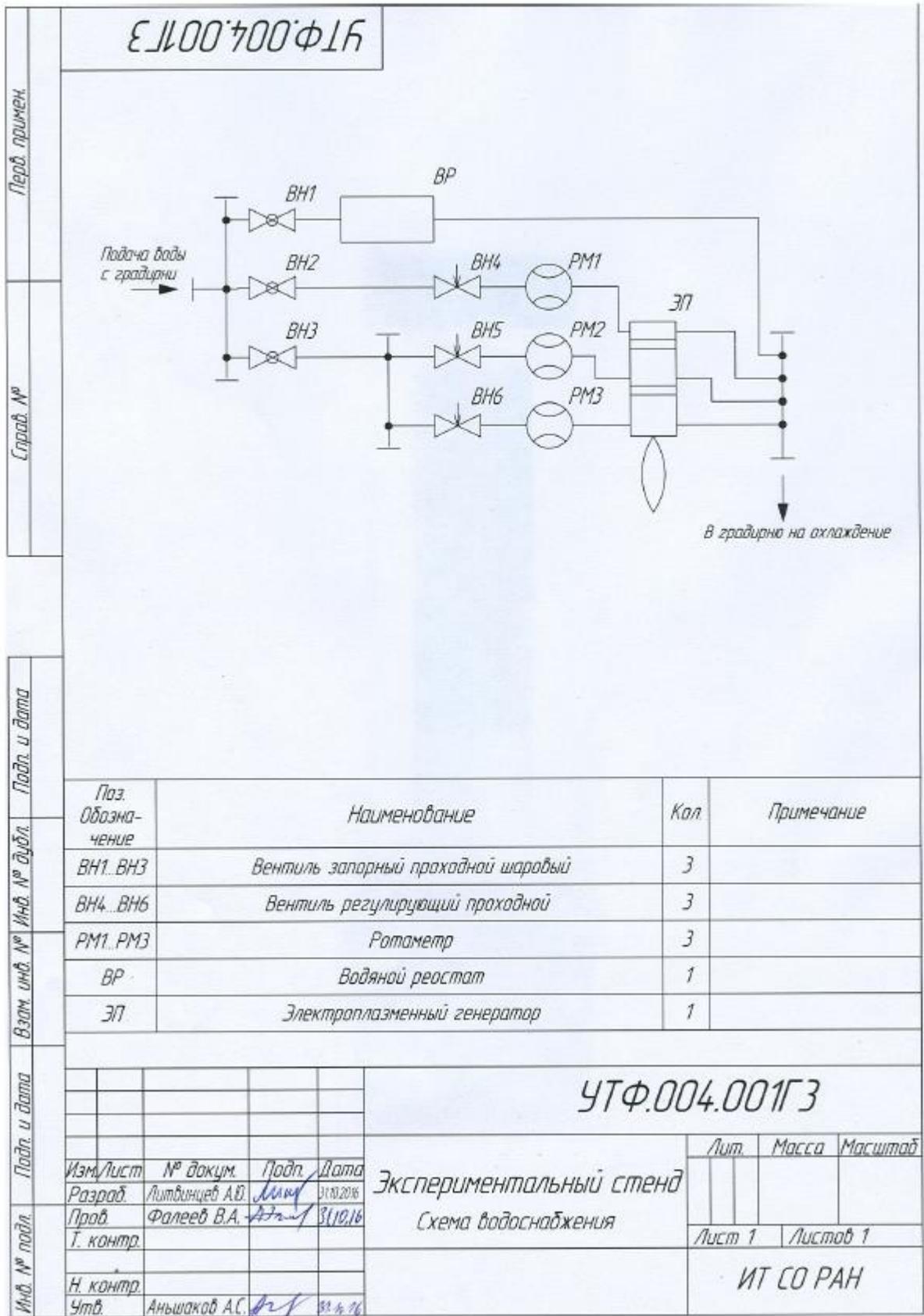


Рисунок 4.3 – Схема водоснабжения экспериментального стенда

На Рисунке 4.4 приведена принципиальная схема экспериментальной плазменно-термической электропечи производительностью до 20 кг/ч, предназначенной для отработки технологии высокотемпературной (плазменной) утилизации возобновляемых углеродсодержащих отходов различного происхождения (древесные опилки, ветошь, полиэтилен).

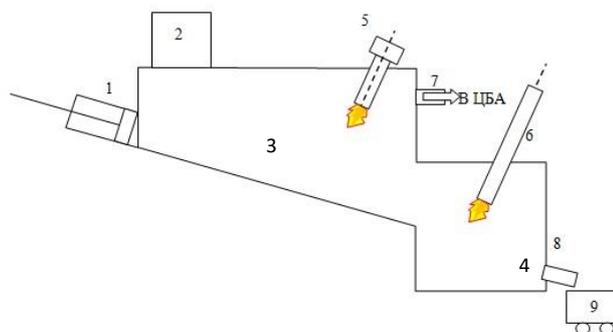


Рисунок 4.4 - Схема плазменно-термической электропечи

Углеродсодержащие отходы с насыпным весом 150-200кг/м³ поступают в затаренном виде в коробках с габаритными размерами 200*200*200 мм и через загрузочное устройство 2 гидроприводом подаются в рабочее пространство печи. Загрузочное устройство оснащено шлюзовой камерой, предотвращающей выход дымовых газов в атмосферу из рабочей камеры плазменной печи при избыточном давлении и подсосе атмосферного воздуха в рабочую камеру при разрежении в ней. Продвижение отходов по наклонному поду в зоне газификации 3 осуществляется с помощью гидравлического толкателя 1, подключенного к маслостанции и блоку управления. Предварительный прогрев футеровки и зоны газификации до температуры 1500 К осуществляется газовой горелкой 5 мощностью 42 кВт и плазмотроном 6 мощностью 50 кВт. В последующем поддержание $t \geq 1200$ °С при газификации осуществляется только плазмотроном. Среднемассовая температура воздушной плазмы, истекающей из плазмотрона, составляет 4000 К. Полученный в зоне газификации синтез-газ (топливный газ) поступает в центробежно-барбатажный аппарат (ЦБА) для закалки плазмохимических реакций и очистки от пыли.

Образовавшийся после газификации отходов зольный остаток, содержащий частицы недожога и углеродный остаток, попадает в зону плавления 4, где под действием струи плазмы происходит дожигание углерода и переплавление минеральной части отходов в инертный шлак. После ЦБА топливный газ подается в камеру дожигателя, где сгорает до CO_2 . Перед выбросом в атмосферу газ проходит в смеситель (охладитель) для последующего охлаждения путем смешивания с необходимым количеством атмосферного воздуха.

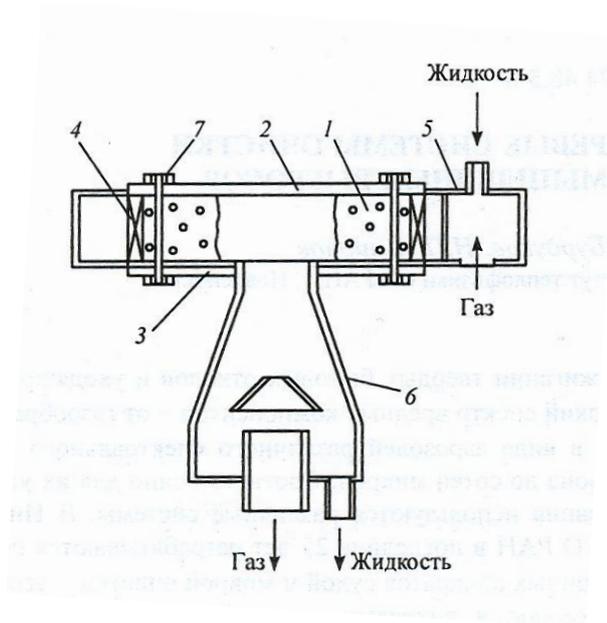
Источником энергии для газификации органической части и расплава неорганической служит плазмотрон, а также химическая энергия реакций окисления углерода. Кислород поступает в печь через плазмотрон с плазмообразующим газом. Шлак периодически сливается через клетку 8 в откатную тележку 9.

Кладка печи имеет огнеупорные и теплоизоляционные слои, выполненные из шамотного и муллитокремнеземистого кирпича. Крепления и своды камер выполнены из жаростойкого бетона. На боковых стенках камеры газификации размещены патрубки для подачи воздуха, смотровое окно, люк для осмотра кладки. В верхней части камеры газификации расположен патрубок для вывода из печи синтез-газа, на котором имеется устройство отбора проб газов для аналитического контроля. Технические характеристики электроплазменной установки представлены в Таблице 4.1.

Центробежно-барботажный аппарат (ЦБА) или вихревой скруббер предназначен для закалки плазмохимических реакций газификации твердых отходов и очистки синтез-газа от твердых частиц (пыли). Его схема приведена на Рисунке 4.5.

Таблица 4.1 - Техническая характеристика электроплазменной установки

Наименование показателя	Значение
Производительность печи по отходам, кг/ч	20
Производительность установленных горелочных устройств по сжиженному газу, тах, нм ³ /ч:	
в камере газификации	1,6
в дожигателе	1,6
мощность плазмотрона, установленного в плавильной камере, кВт	50
температура дымовых газов, °С:	
в камере газификации	800-1200
в плавильной камере	1500
на выходе из ЦБА	100
в камере дожигателя	1000
после охладителя (то же перед аппаратами сухой очистки, перед дымососом)	≤ 200
объемный расход дутьевого воздуха на горение, нм ³ /ч:	
в сопла камеры газификации	40 - 50 *
в сопло дожигателя	200
объемный расход дутьевого воздуха в охладитель дымовых газов, тах, нм ³ /ч:	1600
объемный расход дутьевого воздуха для охлаждения корпуса камеры газификации, нм ³ /ч:	400
объем топливного газа на выходе из печи, нм ³ /ч:	70
объем дымовых газов, нм ³ /ч:	
расход воды для охлаждения корпуса плавильной камеры, м ³ /ч, тах	4,0
разрежение в плавильной камере, Па	10-50



1 – газожидкостный слой, 2,3 – крышки, 4 – завихритель, 5 – входной канал (улитка), 6 – выходной канал, 7 – крепления.

Рисунок 4.5 - Схема ЦБА

Центробежно-барботажный слой реализуется в вихревых камерах, где газ барботируется через вращающийся слой жидкости, образуя мелкодисперсную газожидкостную смесь. Образующийся вихревой двухфазный слой устойчив в широком диапазоне режимных параметров. Здесь реализуется интенсивный межфазный теплообмен.

ЦБА располагается на водяном баке емкостью 1 м³. Охлаждение воды в нем осуществляется с помощью теплообменника на проточной воде. Подача жидкости проводится насосом из бака. Синтез-газ из зоны газификации поступает в улитку 5 с температурой 1100 - 1200°С. Образованная газожидкостная смесь является эффективным способом закалки химических реакций со скоростью $\sim 5 \cdot 10^6$ град/с и средством очистки газа от пыли.

Дожигатель дымовых газов с блочной газовой горелкой ВТГ 3 тепловой мощностью 42 кВт служит для сжигания синтез-газа, полученного в плазменно-термической электропечи. Из дожигателя дымовые газы отводятся в охладитель газов, где за счет смешения с холодным воздухом отходящие газы охлаждаются до температуры 150 – 200 °С.

После этого они поступают в электрофильтр для очистки от твердых частиц и через систему вентиляции выбрасываются в атмосферу.

Блок-схема экспериментальной электроплазменной установки для переработки органических отходов приведена на Рисунке 4.6.

Блок-схема наглядно демонстрирует объем проводимых исследований. Достаточно сказать, что при запуске плазмотрона и газовых горелок номинальный тепловой режим по всему тракту от электропечи до вентиляции наступает через 4-5 часов. Только после этого возможна подача упаковок с отходами с проведением необходимых измерений по температурам и составу синтез-газа.

В зоне газификации плазменно-термической печи происходят плазмохимические реакции окисления и восстановления элементов органических отходов. Здесь выделяются H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , O_2 , N_2 и зольный остаток, который поступает в плавильную камеру. Поскольку главное предназначение установки – получение высококалорийного синтез-газа, то добиться этого можно разными способами:

- выбором морфологического состава отходов (или смеси отходов) с высокой теплотворной способностью;
- температурой в реакционной зоне плазменной электропечи;
- временем нахождения упаковок с отходами при температуре 1100 – 1300 °С (например, скоростью их продвижения по наклонному поду печи);
- оптимизацией рода и расхода плазмообразующего газа.

Сравнение приведенных результатов расчета и экспериментальных данных по газификации твердых отходов должны подтвердить их согласие или указать на предел совместимости в заданном диапазоне параметров.

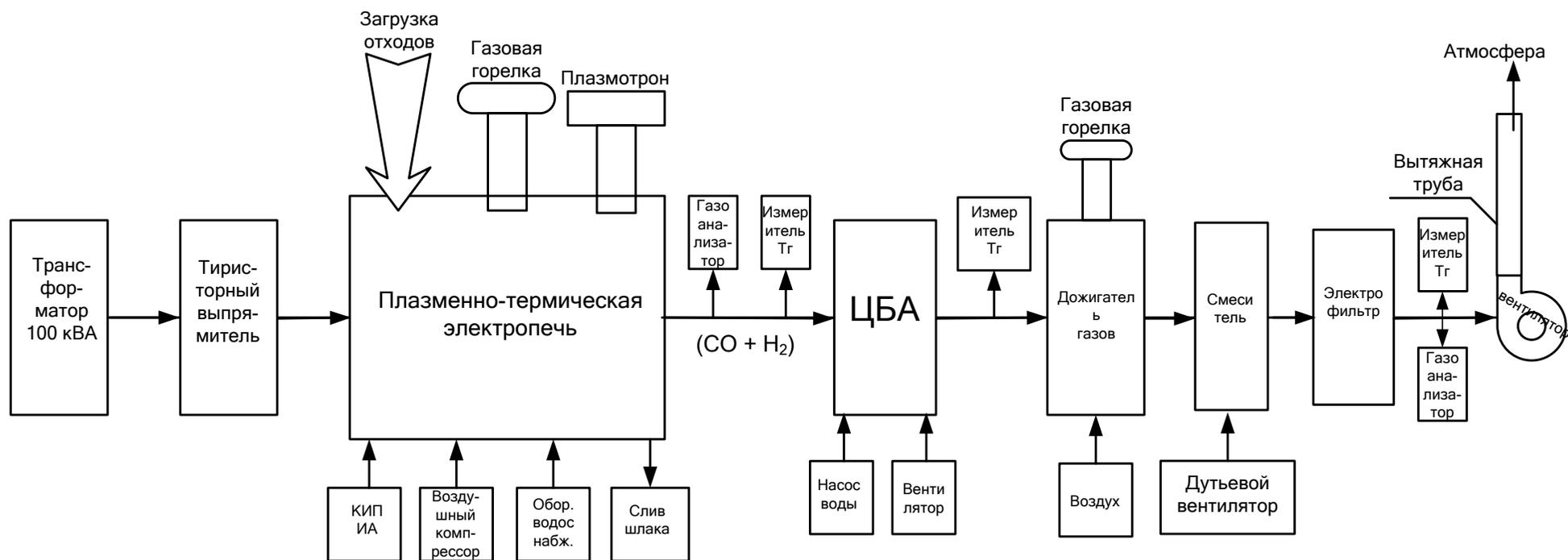


Рисунок 4.6 - Блок-схема экспериментальной электроплазменной установки для утилизации органических отходов производительностью 20 кг/ч с производством синтез-газа (топливного газа) для теплоэнергетики

После выхода установки на расчетную производительность по отходам основные показатели параметров технологического режима должны соответствовать значениям, приведенным в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Параметры технологического режима

Место измерения параметра (по схеме ОТ-058.000 ТЗ)	Измеряемый параметр		
	Температура, °С (точка измерения)	Разрежение, Па (точка измерения)	Другие (точка измерения)
Плавильная камера	1500-1550 (7)	- (0 – 50) (8)	
Камера газификации	800- 1200 (6)	- (10 – 100) (5)	Содержание, об. % СО - (0 – 30);
После ЦБА	100-120 (10)	- (1000–1500) (9)	
В дожигателе	900-1000 (19)	- (500–1000) (18)	
После охладителя газов (Перед фильтрами)	150-200 (21)	- (1000–1500) (20)	
Перед дымососом	150-200 (21)	- (2500–3000) (23)	Содержание, об. % СО - (0 - 0,03) О ₂ - (0 – 10)
Вода на выходе из охлаждаемых элементов	<70 (44...47)		

Сконструированы основные комплектующие системы, разработана программа и методика экспериментальных исследований, техническая документация, основные характеристики лабораторной электроплазменной установке для утилизации органических отходов.

4.2 Экспериментальные исследования лабораторной электроплазменной установки для газификации углеродсодержащих отходов

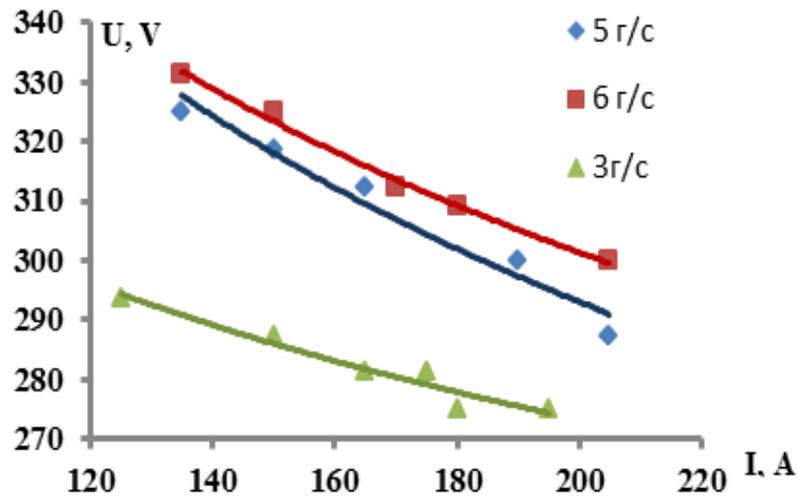
производительностью 10-20 кг/ч

4.2.1 Исследование энергетических характеристик электродугового плазмотрона мощностью 50 кВт

Для поддержания высокой температуры в камере печи используется электродуговой плазмотрон. 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 4.7 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.



расход воздуха: ▲ - $3 \cdot 10^{-3}$ кг/с, ◆ - $5 \cdot 10^{-3}$, ■ - $6 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Рисунок 4.7- Вольт-амперные характеристики дуги плазмотрона.

Одним из важных параметров, определяющих эффективность работы плазмотрона, является его тепловой КПД. В электродуговых плазмогенераторах электроды воспринимают тепло от излучения дуги, конвективного теплообмена между дуговым разрядом, плазмообразующим газом и стенками электродов, кондуктивного теплообмена и, наконец, от катодного и анодного дуговых пятен. Тепло с наружной стороны электродов снимается охлаждающей водой.

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.

Полученные экспериментальные данные приведены на Рисунке 4.8.

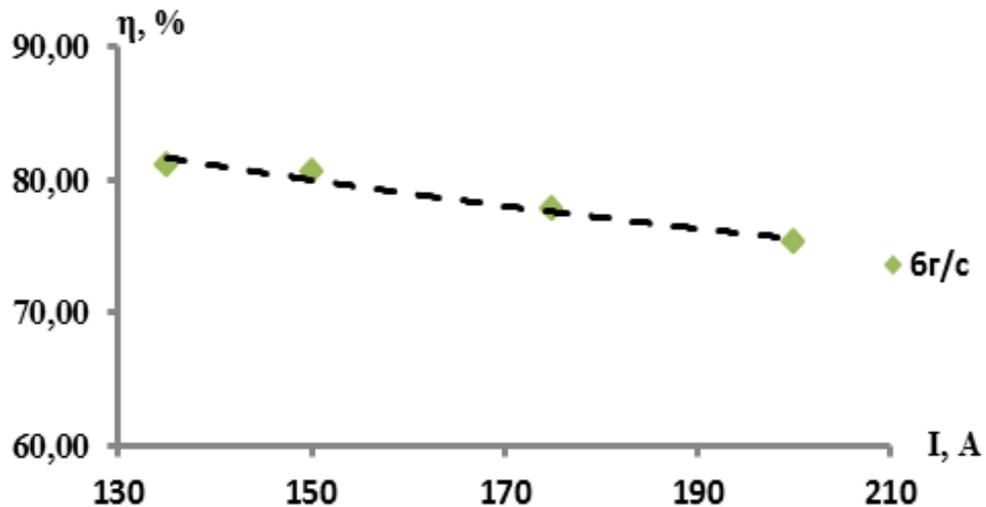


Рисунок 4.8 - тепловой КПД плазмотрона в зависимости от тока дуги

$$G=6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$$

С учетом большой поверхности водоохлаждаемых элементов плазмотрона получены вполне приличные величины КПД $\sim 80\%$.

4.2.2 Исследование плазменной газификации органических отходов

Экспериментальное исследование высокотемпературной (плазменной) газификации отходов на примере древесных опилок выполнены на лабораторной электроплазменной установке производительностью 20 кг/ч. Исследования проведены согласно «Программе и методик экспериментальных исследований экспериментального образца лабораторной электроплазменной установки производительностью 10-20 кг/ч» (Приложение Б).

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 4.3.

Таблица 4.3 - Элементный состав промасленных древесных опилок

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

Предварительно камера разогревалась до 1200 °С газовой горелкой мощностью 42 кВт. Максимальное содержание CO₂ 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 м³. Был установлен расход по отходам 20 кг/ч. Вес одного контейнера составлял 1,3 кг со средней плотностью 162,5 кг/м³. 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 4.4.

Таблица 4.4 - Состав топливного газа на выходе из камеры газификации

Место отвода газа	Объёмная доля компонентов в топливном газе				
	CO ₂	CO	H ₂	H ₂ O	N ₂
Камера печи	3,26	29,60	18,32	13,20	35,62

В режиме газификации топливный газ, представленного в Таблице 4.5 состава, из камеры газификации в количестве до 100м³/ч при температуре 800-

1200⁰С подаётся в ЦБА. Поступающий в ЦБА топливный газ интенсивно взаимодействует с водой в кольце закрутки, охлаждаясь и очищаясь от механических примесей и растворимых в воде соединений. Нагретая до 90⁰С вода поступает в бак – накопитель, где отстаивается и охлаждается трубчатым теплообменником до 40-60 ⁰С. Топливный газ с температурой близкой к 100⁰С выходит из ЦБА насыщенным влагой. В Таблице 4.5 представлен состав топливного газа, выходящего из ЦБА.

Таблица 4.5 - Состав топливного газа на выходе из ЦБА

Место отвода газа	Объёмная доля компонентов в топливном газе, % об.				
	CO ₂	CO	H ₂	H ₂ O	N ₂
Выход ЦБА	2,15	19,54	12,09	42,7	23,52

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=1500-2500ккал/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 2500нм³/ч) атмосферного воздуха до температуры не более 200⁰С, проходят через рукавный фильтр для улавливания остаточных механических частиц и сбрасываются в атмосферу. В Таблице 4.6 представлен состав дымовых газов после сжигания топливного газа в вихревом дожигателе.

Таблица 4.6 - Объёмная доля компонентов в дымовых газах

Место отвода газа	Объёмная доля компонентов в топливном газе, % об.					
	CO ₂	CO	H ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
дожигатель	8,1	≤50,mg/m ³	0	20,3	63,5	8,1

При наблюдении процесса горения топливного газа в дожигателе наблюдается периодическое увеличение и уменьшение яркости пламени в зависимости от поступления порции отходов в камеру газификатора. Анализатор состава газов, установленный на выходе из камеры газификации, фиксирует периодическое изменение процентного содержания горючих компонентов в составе топливного газа. На Рисунке 4.9 показан график изменения процентного содержания CO и H_2 в зависимости от времени.

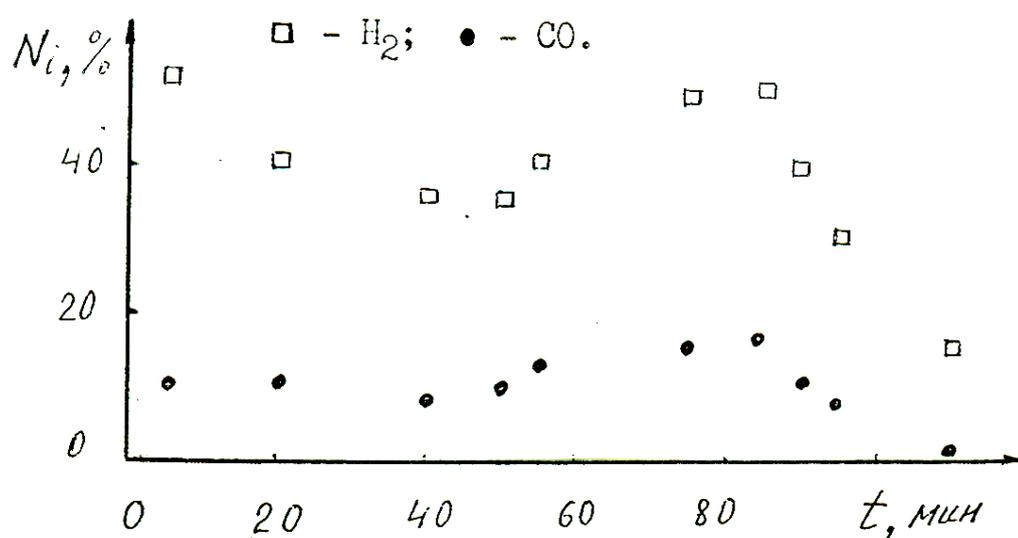


Рисунок 4.9 - Изменение состава синтез-газа от времени в дожигателе

Для исключения перепадов величины синтез-газа необходимо оптимизировать частоту подачи контейнеров с отходами.

4.3 Термодинамический анализ газификации возобновляемых углеродосодержащих материалов в плазменной электропечи

В процессе газификации при нагревании УСО до 1500 К и выше углерод интенсивно взаимодействует с водой и другими окислителями и переводится в оксид углерода (CO), а водород из твердых топлив и отходов переводится в водород газообразный. Плазменная газификация существенно отличается от других способов тем, что она проходит при температурах 1500 – 2000 К.

В работах [89 – 94] приведены различные методы расчета плазменной газификации, разнообразные схемы плазменных установок. В восстановительной атмосфере синтез-газа (CO и H₂) не образуются диоксины, фураны и окислы азота, а соединения углерода с азотом, по данным автора работы [6], начинают появляться при температурах выше 1500 К. Вопросы энергетики и управления составом получаемого синтез-газа при плазменной газификации рассмотрены ниже.

Газификацию углеродсодержащих материалов можно упрощённо описать семью основными химическими реакциями [95]:



Энтальпии реакций даны при нормальных условиях (298 К; 1,013 бар). Для углерода выбрана стандартная энтальпия образования $H^0 = 12,5 \text{ кДж/моль}$, учитывающая свойства коксового углерода. Энергетические характеристики процесса газификации определялись из дополнительного уравнения теплового баланса, традиционно составленного для 1 кг рабочего тела (РТ):

$$Q_{1\text{хим.}} + Q_{1\text{тепл.}} + Q_{\text{плазмы}} = Q_{2\text{хим.}} + Q_{2\text{тепл.}} + Q_{\text{потери}}, \quad (4.8)$$

где: $Q_{1\text{хим.}}$ – теплотворность 1 кг РТ; $Q_{1\text{тепл.}}$ – тепловая энергия 1 кг РТ; $Q_{\text{плазмы}}$ – энергия плазмы, затраченная на 1 кг РТ; $Q_{2\text{хим.}}$ – теплотворность продуктов газификации на 1 кг РТ; $Q_{2\text{тепл.}}$ – тепловая энергия продуктов газификации на 1 кг РТ; $Q_{\text{потери}}$ – общие тепловые потери в оборудовании (плазмотрон, реактор, футеровка и т.д.) на 1 кг РТ; Рабочее тело (РТ) - смесь УСО и окислителя, поступающая в плазмохимический реактор.

При расчётах использовались материалы, опубликованные в работах [96, 97] и программа моделирования химических и фазовых равновесий при высоких

температурах АСТРА–4/рс. В отличие от графического представления результатов расчета [93, 94] ниже приведены полученные данные в виде Таблиц.

В Таблице 4.7 приведены основные показатели процесса газификации древесных опилок при подсушивании и дополнительной подаче кислорода или воздуха. Древесина отличается от полиэтилена и от текстиля тем, что в её составе достаточно кислорода и воды для полной стехиометрической газификации внутреннего углерода. Значительный избыток окислителя в виде наиболее энергоёмкой его части – воды увеличивает удельные энергозатраты на газификацию, поэтому перед переработкой опилки целесообразно подсушивать до технической влажности 25% и менее. При этом в подсушенных опилках содержится достаточное количество окислителя для полной газификации имеющегося углерода.

Таблица 4.7 - Основные показатели процесса газификации древесных опилок при дополнительной подаче кислорода или воздуха

Опилки (УСОЗ) состав, % масс.	С – 30,3; Н ₂ –3,6; N ₂ – 0,4; O ₂ – 25,1; Н ₂ O – 40; Зола–0,6.			
Вариант расчёта №	1	2	3	4
Дополнительно подаётся, кг/кг УСОЗ	-	O ₂ - 0,2	Air - 0,86	Air - 1,067
Дополнительно удаляется, кг/кг УСОЗ	H ₂ O - 0,2	H ₂ O - 0,2	H ₂ O - 0,2	H ₂ O - 0,2
Состав газа и объём/кг УСОЗ	1,24 нм ³	0,91 нм ³	1,53 нм ³	1,56 нм ³
H ₂ % об.	43,15	42,9	28	23,41
CO % об.	55	47,5	31	27,19
CO ₂ % об.	1,61	9,4	6	7,25
N ₂ % об.	0,24	0,3	35	42,15
q газа, МДж/нм ³	11,6	10,6	6,9	6,26
Q* плазмы, кВт·ч/кг УСОЗ	0,57	0,24	0,49	0,31

Для всех вариантов расчета из 1 кг опилок удаляется 0,2 кг влаги и дополнительно для оставшихся 0,8 кг опилок в газификатор вводится различное

количество кислорода или воздуха. В этом случае элементный состав опилок существенно изменяется. При указанной в Таблице калорийности синтез-газа $q_{\text{газа}}$ и различных объемах газа с учетом тепловой энергии нагретых до 1500 К продуктов газификации (синтез-газ, влага, шлак) общая тепловая энергия продуктов газификации составляет около 14 МДж на 1 кг переработанных УСО.

Расчетно-экспериментальные данные по составу газа и теплоте сгорания древесных опилок в плазменном реакторе с обращенной схемой газификации, полученные в работе [4], отличаются от приведенных нами (варианты расчетов 3 и 4 Таблицы 4.3) на 6 – 10%, что свидетельствует о достоверности термодинамических расчетов, выполненных в настоящей работе.

4.4. Выводы по главе 4

1. Плазменная газификация позволяет разложить высокомолекулярные техногенные отходы на простые химические соединения. Использование вихревого скруббера для закалки и очистки отходящих газов исключает возможность образования новых токсичных соединений.
2. Хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных по плазменной газификации углеродсодержащих отходов позволяет использовать полученные результаты для прогнозирования состава синтез-газа и удельных энергозатрат исследуемой технологии.
3. Полученный в плазменных газификаторах синтез-газ содержит до 90% горючих компонентов и является высококачественным сырьем для нужд теплоэнергетики и химического производства.
4. На экспериментальном стенде проведены исследования по плазменной переработке образцов органических отходов. В зависимости от теплотворной способности и методов переработки исходных материалов получен горючий синтез-газ (смесь CO и H₂) с калорийностью 8-12 МДж/м³. Это позволяет

использовать его в электрогенерирующих устройствах для производства электроэнергии.

5. Результаты экспериментальных исследований (как собственных, так и заимствованных) свидетельствуют о том, что плазменная технология переработки органических отходов является безотходной (синтез-газ и гранулированный шлак), экологически чистой (отсутствуют вредные выбросы в атмосферу), актуальной и перспективной на долгие годы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 угле марки Д. Соотношение расхода угольного топлива микропомола через первую ступень к расходу после штатной мельницы через вторую ступень составляло 1 к 4. 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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жуков, М.Ф. Плазменная безмазутная растопка пылеугольных котлов и подсветка факела/ М.Ф. Жуков [и д.р.] - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1995. – 304 с.
2. Мессерле, В.Е. Электротермохимическая подготовка углей к сжиганию/ В.Е. Мессерле [и д.р.] - Алма-Ата: Наука КазССР, 1993. – 259 с.
3. Адамов, В.А. Сжигание мазутов в топках котлов/ В.А. Адамов. - Ленинград: Энергоиздат, 1989. – 304 с.
4. Блинов, Ю.Н. Современное энергосберегающие технологии: учебное пособие для вузов / Ю.Н. Блинов, А.С. Васильев, В.С. Чередниченко. - Санкт-Петербург: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. – 564 с.
5. Чередниченко, В.С. Современные методы переработки твердых бытовых отходов / В.С. Чередниченко [и д.р.] – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1995. – 55 с.
6. Elliott M. A., Yohe G. R. The Coal Industry and Coal Research and Developments in Perspective // Chemistry of Coal Utilization: Second Supplementary Volume, New York: John Wiley and Sons. – 1981. – С. 1-54.
7. Smoot L.D., Smith P.J. Coal Combustion and Gasification // Plenum Press. New York. 1985. – 443 p.
8. Borman G. L., Ragland K. W. Combustion engineering // Science and Engineering, McGraw-Hill. 1998.
9. Калинин, Р.А. Плазмохимическая переработка угля. / Р.А. Калинин // Сб. Синтез соединений в плазме, содержащей углеводороды. - Москва. 1985. - С. 119-140.
10. Карпенко, Е.И. Плазменно-энергетические технологии топливоиспользования / Е.И. Карпенко, В.Е. Мессерле // Концепция и расчетно-

теоретические исследования плазменно-энергетических технологий. - Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1998. - 385 с.

11. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Solid Fuel Plasma Gasification // Advanced Combustion and Aerothermal Technologies, N.Syred and A.Khalatov (eds.), Springer, 2007. - P. 141-156.

12. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma Supported Coal Combustion. Modelling And Full-Scale Trials // Advanced Combustion and Aerothermal Technologies, N.Syred and A.Khalatov (eds.), Springer, 2007. - P. 115-129.

13. Smoot L. D. Role of Combustion Research in the Fossil Energy Industry // Energy & Fuels - An American Chemical Society Journal, 1993. - P. 689

14. Williams A., Pourkashanian M., Jones J.M., Skorupska T. Combustion and Gasification of Coal // Taylor & Francis, New York, USA, 2000.

15. Abbas T., Costen P. G. and Lockwood F. C. Solid Fuel Utilisation: From Coal to Biomass // Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1996. - P. 3041

16. WCI, 2000. Coal Power for Progress, World Coal Institute, London, <http://www.wci-coal.com>

17. Keay M. The View from Europe – and elsewhere, *World Coal Institute*, London, Oxford Energy Forum, Issue 52, February 2003, www.worldcoal.org

18. Карпенко, Е.И. Эколого-экономическая эффективность плазменных технологий переработки твердых топлив / Е.И. Карпенко [и д.р.] - Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 2000. - 159 с.

19. Клеткинс, К. Применение технологии трехступенчатого сжигания для подавления NOx на твердотопливных котлах в Европе и СНГ. / К. Клеткинс // Европейская комиссия по энергетике и транспорту. – М.: РАО «ЕЭС России». ВТИ, 2000. - С. 4-17.

20. Добыча угля в России увеличилась на 3,9% в 2008 году [Электронный ресурс]. -http://marketing.rbc.ru/news_research/06/02/2009/562949954696290.shtml

21. Уголь - самый распространенный в мире энергетический ресурс. Уголь стал первым видом ископаемого топлива, используемым человеком. [Электронный ресурс]. - <http://www.rb.ru/biz/markets/show/90/>

22. Моссэ, А.Л. Плазменные технологии и устройства для переработки отходов / А.Л. Моссэ, В.В. Савчин. – Минск: Белорусская наука, 2015. – 411 с.

23. Лукашов, В.П. Плазмотермическая переработка твердых отходов / В.П. Лукашев [и д.р.] // Экология и промышленность России, 2005, ноябрь. – С. 4 - 9.

24. Мальцева, А.С. Об установлении равновесия диоксида в пламени / А.С. Мальцева [и д.р.] // Физика горения и взрыва. – 1983. - № 5. – С. 80 - 83.

25. Моссэ, А.Л., Савченко Г.Э. Плазменные методы в технологии переработки бытовых отходов / А. Л. Моссэ, Г.Э. Савченко // Твердые бытовые отходы. – 2012. - № 2. – С. 20 - 24.

26. Пьяных, К.Е. Газификация как метод переработки отходов / К.Е. Пьяных // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2015. - № 2. – С. 12 - 17.

27. Жуков, М.Ф. Электродуговые генераторы термической плазмы // М.Ф. Жуков [и д.р.]. – Новосибирск: «Наука», 1999. – 712 с.

28. Алексеенко С.В., Аньшаков А.С., Басин А.С., Богомолов А.Р. Плазменный инцинератор / Патент на полезную модель №102979. - № 8. – 2011 г.

29. Plasma Energy Waste Processing System: Booklet / Mason and Hanger National, Inc.– Atlanta, 1993. – 42 p.

30. Чередниченко, В.С. Техническое предложение по строительству мини-завода по переработке твердых бытовых отходов / В.С. Чередниченко [и д.р.]. – Новосибирск: ИТ СО РАН, НЭТИ, 1992. – 38 с.

31. Аньшаков, А.С. Переработка твердых бытовых отходов методом высокотемпературной (плазменной) газификации / А.С. Аньшаков, В.С. Чередниченко // Научно-практический семинар "Утилизация отходов большого города". - М.: ВИМИ, 1993. - С. 68 - 71.

32. Westinghouse Plasma Corp. Home // Westinghouse Plasma Corporation [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.westinghouse-plasma.com>. – Date of access: 06.02.2013.
33. Plasma Arc Centrifugal Treatment (PACT™)//Retch Systems LLC. – Mode of access: <http://www.retechsystemsllc.com/equipment/pact>. – Date of access: 13.10.2009.
34. Кирда, В.С. Влияние тонкого измельчения на строение и свойства углей / В.С. Кирда, Т.М. Хренкова, И.Б. Кричко // Химия твердого топлива. - № 6. – Москва: 1983.
35. Барабойм, Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений / Н.К. Барабойм: М., «Химия», 1971.
36. Симионеску, А.К. Механохимия высокомолекулярных соединений / А.К. Симионеску, К. Опра: М., «Мир», 1970.
37. Болдырев, В.В. Успехи химии / В.В. Болдырев, Е.Г. Авакумов // 1971. - №40.
38. Болдырев, В.В. Кинетика и катализ / В.В. Болдырев // 1972. - №13.
39. W. Boldyrev. Z. Phys. Chem., 256, 342 (1975)
40. H. Rumph Chem. Ign. Techn., 31, 333
41. G. Muler Sixth World Petroleum Congress, I-29-PD 1, p. 383.
42. C.V. Johnson, A.T. Wilson Nature, 204, 181 (1964)
43. P.A. Thiessen, G. Heinicke Acad. Wiss., 3, 170 (1961).
44. H. Prinzler TH Chemie (Leuna-Merseburg), 4, 261 (1962)
45. Молчанов, В.А. Труды института геологии и геофизики СО АН СССР / В.И. Молчанов, А.П. Павлов. - Новосибирск: 1976. – 133 с.
46. Исаков, П.И. Качественный анализ руд и материалов методом растирания порошков / П.И. Исаков // Москва: 1955.
47. Хинт И. А. Дезинтеграторный способ изготовления силикатных и силикальцитных изделий / И. А. Хинт. – Талин: 1952. – 26 с.

48. Хинт, И. А. Вычислительная технология размеров дезинтегратора завода силикатного кирпича «Силикат». Завод «Кварц» Отчет исследовательской работы / И.А. Хинт, В. Рюютель. – Талин: 1951.
49. Сапожников, М.Я. Аппараты и машины для производства строительных материалов / М.Я. Сапожников. - М.: Промстройиздат. 1950.
50. Petzold, Chem. Techn., 29, 391 (1977).
51. Юсупов, Т.С. Реакционная способность углей различных стадий метаморфизма в процессах термоокислительной деструкции/ Т.С. Юсупов [и д.р.] // Химия в интересах развития. -2011. - №19. – с. 427 - 432.
52. Юсупов, Т.С./ Т.С. Юсупов, Л.Г. Шумская // Химия твердого топлива 2008. № 5 С. 47.
53. Юсупов, Т.С./ Т.С. Юсупов, Л.Г. Шумская, А.П. Бурдуков // Горение и плазмохимия. - 2006. №4. С. 47.
54. Бурдуков, А.П. / А.П. Бурдуков [и д.р.] // Химия уст. Развития. - 2009. Т.17. - №1. - С. 47.
55. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma Gasification of Solid Fuels for Syngas and Hydrogen Production // Proceedings of the 31st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, May 21-26, 2006, Florida, USA, (108) -P. 891 - 902.
56. Карпенко, Е.И., Плазменно-энергетические технологии использования твердых топлив. / Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. - М.: Наука. 2000. Т.4. -С. 359 - 370.
57. Калинин, Р.А. Электротермохимическая переработка углей. Математическая модель и эксперимент / Р.А. Калинин [и д.р.] // Химия высоких энергий. 1990. - Т. 24. - №2. - С. 176 - 182.
58. Жуков, М.Ф. Новые материалы и технологии. Экстремальные технологические процессы /М.Ф. Жуков. - Новосибирск: наука, Сиб.отд.. 1992. - 178 с.
59. Maturing A. Arc Plasma Processes Technology in Industry // UIE Arc Review. – Paris, 1988. – P. 156 - 159.

60. Hazardous Waste Treatment Using High Temperature Gasification (HTG) / VZA Voest-Alpin Industrieanlagenbau. – Wien, 1987. – 32 p.
61. Аньшаков, А.С. Исследование плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов /А.С. Аньшаков [и д.р.] // Теплофизика и аэромеханика, 2007. - Т. 14. - № 4. – С. 639 – 650.
62. Чередниченко, В.С. Плазменные электротехнологические установки / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2011. – 608 с.
63. Резняков, А.Б. Горение натурального твердого топлива / А.Б. Резняков [и д.р.]. - Алма-Ата: Изд-во «Наука» Казахской ССР, 1968.
64. Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. - М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 598 с.
65. Рубан, В.А. Современное состояние процессов обогащения углей / // Химия твердого топлива, 2005, № 1, с. 101 -106.
66. Попов, В.И. Диффузионно-релаксационная модель факельного горения топлива / В.И. Попов // Химия твердого топлива. - 2007. - №4. – С. 39 - 49.
67. González-Cencerrado A., Gil A., Peña B. Characterization of PF flames under different swirl conditions based on visualization systems // Fuel 2013. - V. 113. - P. 798 – 809.
68. Shen J., Liu J., Zhang H., Jiang X. NO_x emission characteristics of superfine pulverized anthracite coal in air-staged combustion // Energy Conversion and Management. - 74 (2013) 454–461.
69. Liu J., Gao Sh., Jiang X., Shen J., Zhang H. NO emission characteristics of superfine pulverized coal combustion in the O₂/CO₂ atmosphere // Energy Conversion and Management. - 77 (2014) 349–355.
70. Maffei T, Khatami R., Pierucci S, Faravelli T, Ranzi E, Levendis Y.A. Experimental and modeling study of single coal particle combustion in O₂/N₂ and Oxy-fuel (O₂/CO₂) atmospheres // Combustion and Flame 160 (2013) 2559–2572.

71. Li Zh., Li S., Zhu Q., Zhang X., Li G., Liu Y., Chen Zh., Wu J. Effects of particle concentration variation in the primary air duct on combustion characteristics and NO_x emissions in a 0.5-MW test facility with pulverized coal swirl burners // *Applied Thermal Engineering* 73 (2014) 859e868.
72. Zhang L., Binner E., Qiao Y., Li C. In situ diagnostics of Victorian brown coal combustion in O₂/N₂ and O₂/CO₂ mixtures in drop-tube furnace // *Fuel* 89 (2010) 2703–2712.
73. Binner E., Zhang L., Li C., Bhattacharya S. In-situ observation of the combustion of air-dried and wet Victorian brown coal // *Proc. Combust. Inst.* 33 (2011) 1739–1746.
74. N. Couto, V. Silva, E. Monteiro Numerical and experimental analysis of municipal solid wastes gasification process // *Applied Thermal Engineering*, **78**, pp.185-195(2015)
75. R. Mota, G. Krishnamoorthy*, O. Dada, S Benson Hydrogen rich syngas production from oxy-steam gasification of a lignite coal e A design and optimization study // *Applied Thermal Engineering*, **90**, pp.13-22(2015)
76. Бутаков, Е.Б. Экспериментальные исследования горения механоактивированного пылеугольного факела в автотермическом режиме/ Е.Б. Бутаков [и д.р.] // *Материалы XXXIII Сибирского теплофизического семинара 6 – 8 июня 2017*
77. M. Yu. Chernetskiy, A. A. Dekterev Mathematical Model for Heat Transfer and Combustion in a Pulverized Coal. *Flame Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **47**, No. 3 pp. 280–288 (2011)
78. M.Yu. Chernetskiy, A.A. Dekterev, A.P. Burdukov, K. Hanjalić, Computational modeling of autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal // *Fuel*, **135**, pp.443-458 (2014)
79. M.Yu. Chernetskii, A.N. Alekhovich, A.A. Dekterev, A mathematical model of slagging of the furnace of the pulverized-coal- firing boiler // *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*, **59**, pp.610-618. (2012)

80. Chernetskiy, M.Y., Burdukov, A.P., Butakov, E.B., Anufriev, I.S., Strizhak, P.A. Using ignition of coal dust produced by different types of mechanical treatment under conditions of rapid heating // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2016. № 52(3), pp. 326-328.

81. Бутаков, Е.Б. Исследования воздушной газификации углей механоактивированного микропомола с плазменным управлением процесса / Бутаков Е.Б. [и д.р.]// Тезисы докладов Всероссийской школы – конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск, 22–25 ноября 2016 г. – С. 85.

82. Дектерев, А.А. Влияние скорости предварительного нагрева угольной пыли на реакционную способность коксового остатка / А.А. Дектерев [и др] // *Химия твердого топлива*. 2017. - № 1. - С. 21 - 27.

83. Трусов, Б.Г. Программная система Terra для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Международный симпозиум «Горение и плазмохимия». - Алматы: Издательство Казахского национального университета. 2005. - С. 52 - 57.

84. Бутаков, Е. Б. Экспериментальное и численное исследование поточной высокотемпературной паровоздушной газификации угля / Е.Б. Бутаков [и д.р.] // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 12–16 декабря 2016 г.)* стр. 16-17

85. Абаймов, Н.А. Разработка модели поточной газификации угля и отработка аэродинамических механизмов воздействия на работу газогенераторов / Н.А. Абаймов, А.Ф. Рыжков // *Теплоэнергетика*. 2015. - № 11. - С. 3-8.

86. M.Y. Chernetsky, A. Dekterev and K. Hanjalic. Reducing NO_x by reburning mechanically-activated micronized coal: computational study of fuel-scale 500 t/h tangentially-fired boiler. The 8th International symposium on coal combustion (8thICC), Beijing, July 19-22, 2015, 64p

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

88. Бутаков, Е.Б. Разработка разномасштабных стендов для моделирования двухступенчатого сжигания воздушной и паровоздушной газификации углей / Е.Б. Бутаков [и д.р.] // 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.

89. Аньшаков, А.С. Исследование плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов / А.С. Аньшаков [и д.р.] // Теплофизика и аэромеханика. 2007. - Т. 14. - №4. - С. 639 - 650.

90. Аньшаков, А.С. Газификация углеродсодержащего сырья в плазменно-дуговой электропечи с теплонагревателем и взрывоопасность смесей синтез-газа / А.С. Аньшаков [и д.р.] // Теплофизика и аэромеханика. 2010. - Т. 17. - №4. – С. 633 - 641.

91. Братцев, А.Н. Плазменная газификация биомассы на примере отходов древесины / А.Н. Братцев [и д.р.] // Теплофизика высоких температур. 2011. - Т. 49. - №2. - С. 251 - 255.

92. Мессерле, В.Е. Плазменная газификация углеродсодержащих отходов: термодинамический анализ и эксперимент / В.Е. Мессерле, А.Л. Моссе, А.Б. Устименко // Теплофизика и аэромеханика. 2016. - Т. 23. - №4. - С. 637 - 644.

93. Головина, Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода / Е.С. Головина. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 176 с.

94. Шиллинг, Г. Газификация угля / Г. Шиллинг [и д.р.]. - М.: НЕДРА, 1986. - 175 с.

95. Синярев, Г.Б. Применение ЭВМ для термодинамических расчётов металлургических процессов / Г.Б. Синярев. - М.: Наука, 1982. - 263 с.

96. Трусов, Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах <АСТРА.4> / Б.Г. Трусов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. - 39 с.

97. Бутаков, Е.Б. Газификация углеродсодержащих отходов в плазменной электропечи / Е.Б. Бутаков [и д.р.] // Материалы XXXIII Сибирского теплофизического семинара, Новосибирск, 6 – 8 июня 2017

ПРИЛОЖЕНИЕ А



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

Белоусов Е.И.

» мая 2017 г.

АКТ

об использовании результатов исследований, изложенных
 в кандидатской диссертации Бутакова Е.Б.

В диссертационной работе Бутакова Евгения Борисовича «Исследование горения и газификации органических топлив механо- и плазмохимической активацией применительно к энергетике и получению топливного газа» приведены результаты разработки и исследования электроплазменной технологии газификации органических отходов и установки для её реализации производительностью 10-20 кг/ч.

Термодинамическими расчетами и экспериментальными работами показана возможность получения высококалорийного (6-10 МДж/нм³) синтез-газа (топливного газа) для сжигания в электрогенерирующих агрегатах. Представленный набор модельных органических отходов можно существенно расширить за счет бытовых, сельскохозяйственных и промышленных углеродсодержащих отходов. Приведенный материал представляет практический научно-технический интерес для разработчиков высокотемпературного оборудования.

Полученные в диссертации результаты являются основой разработки и создания опытных образцов электроплазменной установки производительностью по отходам от 100 до 500 кг/ч для получения альтернативной (автономной) электроэнергии. Такая возможность в настоящее время прорабатывается на «Сибирском заводе электротермического оборудования» (ОАО «Сибэлектротерм»).

Главный конструктор, д.т.н.

В.С. Чередниченко

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ФАНО России

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СОГЛАСОВАНО
Генеральный директор
ОАО «Сибэлектротерм»



Е.И. Белоусов

«30» ноября 2016 г.
М.П.

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
академик РАН



С.В. Алексеенко

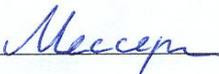
«30» ноября 2016 г.
М.П.

**Программа и методики экспериментальных исследований
экспериментального образца лабораторной электроплазменной установки
производительностью 10 – 20 кг/ч**

Соглашение о субсидии от 27.10.2015 г. № 14.607.21.0118

Этап 2: Теоретические исследования.
Подготовка к экспериментальным исследованиям.
(промежуточный)

Научный руководитель работ
ведущий научный сотрудник
д.т.н.

 В.Е. Мессерле

Руководитель разработки
главный научный сотрудник
д.т.н.

 А.С. Аньшаков

«30» ноября 2016г.

1 Общие положения

1.1 Наименование и обозначение опытного образца продукции (далее - объектов испытаний):

Экспериментальный образец лабораторной электроплазменной установки производительностью 10 – 20 кг/ч (ЛЭПУ-20).

1.2 Цель исследования:

- обеспечение работоспособности всех элементов ЛЭПУ-20 в штатном режиме;

- достижение заданных параметров электроплазменной установки по производительности органических отходов, калорийности получаемого топливного газа;

- оптимизация системы очистки отходящих (дымовых) газов в номинальном режиме работы экологического блока.

1.3 Условия предъявления объекта исследований:

1.3.1 Исследования проводятся на 1 объекте испытаний.

1.3.2 Порядок отбора объектов испытаний: изготовленная и смонтированная в экспериментальном боксе ЛЭПУ-20 в 1 экз.

1.3.3 ЛЭПУ-20 предъявляется на исследования в следующей комплектности:

- объект исследований;

- комплект эксплуатационной документации.

1.3.4 ЛЭПУ-20 предъявляется на исследования в сопровождении следующих документов:

- Техническое задание к Соглашению о субсидии.

- Комплект рабочей конструкторской документации.

- Настоящая программа и методики проведения экспериментальных исследований.

- Инструкции и нормативные документы, предусмотренные ПМ.

- Акт изготовления ЛЭПУ-20.

1.4 ИТ СО РАН взаимодействует с представителями других организаций, участвующих в испытаниях, в следующем порядке: Индустриальный партнер ОАО «Сибэлектротерм», соисполнитель ООО «Электроплазмотех», разработчик технической документации ООО «Огневая технология», изготовитель ООО «Сибэкомаш».

2 Общие требования к условиям, обеспечению и проведению исследований

2.1 Место проведения исследований.

Исследования проводятся на базе Федерального Государственного Бюджетного Учреждения Науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского Отделения Российской Академии Наук (ИТ СО РАН), Экспериментальный стенд для исследования генераторов термической плазмы в энергоблоке ИТ СО РАН, пр. Лаврентьева, 1 Новосибирск.

2.2 Требования к средствам проведения исследований.

2.2.1 Перечень средств проведения исследований приведен в конструкторской документации.

2.2.2 Средства измерений, могут быть заменены другими, обеспечивающими требуемую точность измерений.

2.2.3 Средства измерений должны быть поверены и иметь класс точности, необходимый для проведения исследований.

2.3 Требования к условиям проведения исследований

Исследования должны проводиться в нормальных климатических условиях:

температура окружающего воздуха, °С	20 ± 10
относительная влажность воздуха, %	от 45 до 80
атмосферное давление, мм рт. ст.	от 630 до 800

2.4 Требования к подготовке объекта исследований

2.4.1 Нарботка объекта исследований перед началом исследований должна составлять 4 часа.

2.5 Требования к обслуживанию объекта испытаний в процессе исследований.

В процессе проведения исследований проводятся работы в объеме контрольного осмотра объекта исследований и, при необходимости, его текущего обслуживания.

2.5.1 В состав плазменной электропечи входит электродуговой плазмотрон ЭДПМ-50.

- аналогичные работы применительно к ЛЭПУ-20 имеют свои особенности.

2.5.2 Подготовка к пуску установки:

- пуску установки должно предшествовать обучение всего персонала правилам ведения технологического процесса, обслуживанию оборудования и технике безопасности;

- пуск установки может быть осуществлен только при условии готовности всех систем:

- электроснабжения;
- водоснабжения и канализации;
- подвода топлива;
- подачи дутьевого воздуха;
- подачи отходов;
- гидроприводов;

- контроля параметров технологического процесса, сигнализации и блокировок.

- проверить наличие тяги в газовом тракте;

- привести в исходное (закрытое) положение шиберы загрузочного устройства;

- до начала проведения работ по разогреву установки необходимо провести холодные испытания механизмов привода всех узлов установки;

- перед исследованиями провести сушку и разогрев футеровки в дожигателе и плазменной электропечи согласно графика, разработанного ООО «Огневая технология», и изложенного в Инструкции по эксплуатации ЛЭПУ-20 (ОТ-058.000 ИЭ).

2.5.3 Работа установки во время исследований.

Перед каждым запуском ЛЭПУ-20 следует:

- проверить на холостом ходу работу загрузочного устройства и питателя;

- подать воду и воздух в систему охлаждения элементов конструкции;

- подать воду в ЦБА;

- непосредственно перед розжигом провентилировать пространство печи и газоходов в течение 15 минут;

- произвести разогрев футеровки в электропечи и дожигателе;

- после достижения температуры отходящих газов в дожигателе 700-800 °С разжечь газовую горелку, установленную в камере газификации, согласно Инструкции на её эксплуатацию;

- включить плазмотрон, согласно Инструкции на его эксплуатацию, постепенно увеличивая его мощность;

- включить циркуляцию воды в ЦБА;

- к переработке (газификации) органических отходов можно приступать по достижении температуры в камере электропечи не менее 800°C и в дожигателе – не менее 900 °C;

- производительность установки по отходам регулируется путем изменения частоты циклов загрузки;

- поддерживать разрежение в рабочей камере электропечи на уровне 10-50 Па;

- осуществлять периодический лабораторный контроль состава дымовых газов на содержание CO, H₂, O₂;

- включение и отключение рукавного и электро-фильтров производить согласно Инструкции по их эксплуатации. Температура газов перед фильтрами 200°C обеспечивается путем разбавления отходящих газов после дожигателя.

2.6 После завершения проведения исследований установки:

- прекратить подачу отходов;

- дожечь отходы в камере газификации и плавильной камере;

- отключить плазмотрон;

- прекратить подачу топлива на горелки.

2.6.1 Порядок отключения ЛЭПУ-20:

- поочередно и постепенно снижать производительность нагревателей;

- отключение нагревателей производить в следующей последовательности: плазмотрон, топливные горелки в камере газификации и затем в дожигателе;

- охлаждение футеровки с рабочей температуры до 600°C осуществлять со скоростью 50°C в час, с 600 до 100°C – около 20°C в час подачей дутьевого воздуха;

- прекратить подачу воздуха в охладитель газов по достижении 200°C после

дожигателя;

- отключить подачу воды в ЦБА при достижении температуры отходящих газов до 100°C;

- после охлаждения футеровки менее 100°C отключить подачу воды и воздуха на охлаждение элементов установки;

- отключить рукавный - и электрофильтр.

2.7 Требования к персоналу, осуществляющему подготовку к исследованиям и исследования.

2.7.1 К проведению исследований допускается персонал, прошедший обучение и изучивший эксплуатационную документацию объекта исследований, подготовленный в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и имеющий степень аттестации по электробезопасности не ниже III-ей группы.

2.7.2 Исследования проводятся не менее чем четырьмя лицами, имеющими группу допуска ПТЭ и ПТБ не ниже третьей.

2.7.3 При проведении работ на испытаниях и исследованиях персонал обязан соблюдать правила техники безопасности согласно ПТЭ и ПТБ.

3 Требования безопасности

3.1 Требования безопасности при подготовке объекта испытаний к исследованиям.

Допускается персонал, подготовленный в соответствии с ПТЭ и ПТБ и изучивший эксплуатационную документацию объекта испытаний.

3.2 Требования безопасности при проведении исследований.

Условия безопасной работы при проведении исследований должны соответствовать общеобъектовой инструкции по пожарной безопасности объектов

ИТ СО РАН, инструкции по охране труда при проведении огневых работ, а также инструкции по охране труда при работе на электроустановках ниже 1000 В.

Помимо знаний по ПТЭ и ПТБ персонал должен ознакомиться с Инструкцией по эксплуатации экспериментального стенда, Инструкцией по эксплуатации экспериментального образца лабораторной электроплазменной установки ЛЭПУ-20 (ОТ-058.000 ИЭ).

3.3 Требования по безопасности при выполнении работ по завершению исследований.

Обесточить экспериментальный стенд, произвести осмотр технологического оборудования, повесить плакаты на токоведущих линиях, перекрыть подачу охлаждающей воды, воздуха и топлива на горелку. Сообщить в диспетчерскую службу ОГЭ об окончании экспериментальных работ.

4 Программа исследований

4.1 Проверка технической документации на соответствие установленной комплектности и оценка её качества, согласно требований пунктов 2.6, 4.2.1.4, 4.2.4, 4.3.1, 4.3.2.

4.2 Проверка соответствия объекта испытаний его конструкторской документации согласно требованиям п. 3.10 Технического задания.

4.3 Подготовка к проведению исследований

4.3.1 Проверка и настройка аппаратуры, включая измерительные системы регистрации параметров всех элементов электроплазменной установки и контрольно-регулирующее оборудование для изменения и поддержания параметров, определяющих режимы устойчивой работы ЛЭПУ-20 в исследуемом диапазоне.

4.3.2 Проверка электрических схем соединений и подключения элементов ЛЭПУ-20, наличия сжатого воздуха, охлаждающей воды и масла в маслостанции.

4.4 Проведение экспериментальных исследований с целью определения соответствия параметров требованиям п. 2.6, 4.2.1.4, 4.2.4, 4.3.1, 4.3.2.

4.4.1 Исследование процесса высокотемпературной газификации органических отходов с получением топливного газа (синтез-газа). Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных.

4.4.2 Исследование электроплазменного оборудования и вспомогательных систем ЛЭПУ-20 для оптимизации параметров получения высококалорийного синтез-газа (10-13 МДж/нм³) и расплавленного шлака.

4.4.3 Анализ результатов экспериментальных исследований и выводы по результатам.

5 Режимы исследований

5.1 Порядок исследований

5.1.1 Исследования проводятся в соответствии с настоящей программой и с планом-графиком Соглашения о субсидии.

5.1.2 Последовательность проведения исследований может быть уточнена и детализирована на основе полученных результатов исследований по согласованию с комиссией ИТ СО РАН.

5.2 Ограничения и другие указания, которые необходимо выполнять при проведении исследований

Исследования прекращаются в случаях возникновения аварийных ситуаций, угрожающих жизни и здоровью персонала, а также оборудованию и помещениям.

5.3 Условия перерыва, аннулирования и возобновления исследований на всех или на отдельных режимах

Необходимость, условия и порядок перерыва, аннулирования или прекращения исследований определяются по согласованию с комиссией ИТ СО РАН.

6 Методы исследований

Лабораторная электроплазменная установка ЛЭПУ-20 включает в себя плазменную электропечь с дуговым плазмотроном, экологический блок очистки отходящих газов, систему накопления и удаления расплавленного шлака. Поэтому настоящая ПМ непосредственно связана с ПМ электродугового плазмотрона и ПМ плазменной электропечи. Только комплектная ЛЭПУ-20 обеспечит высокотемпературную газификацию органических (углеродсодержащих) отходов для получения товарного продукта: высококалорийного синтез-газа и расплавленного шлака для последующей его грануляции.

6.1 Методика проведения экспериментальных исследований позволяет определить ряд основополагающих параметров технологической направленности и установить режимы эксплуатации электроплазменного оборудования и вспомогательных систем ЛЭПУ-20.

6.1.1 В рабочей камере плазменной электропечи происходят плазмохимические реакции окисления и восстановления элементов органических отходов. Здесь твердые отходы газифицируются с выделением H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , O_2 и зольного остатка, который расплавляется в плавильной камере. Поскольку главная задача заключается в получении высококалорийного топливного газа, то добиться этого можно разными способами.

1. Выбором морфологического состава отходов с высокой теплотворной способностью. 2. Температурой в реакционной зоне электроплазменной печи. 3. Временем нахождения упаковок с отходами при температуре $1100^\circ C$, т.е. скоростью их продвижения по наклонному поду печи. 4. Системой очистки отходящих газов в экологическом блоке электроустановки.

В зоне газификации отходов проходят плазмохимические реакции с выделением и поглощением тепла с образованием синтез-газа и шлака. Тестовые испытания процесса газификации модельных отходов проводятся на плазмохимической установке в электронно-пучковой и газоразрядной плазме, входящей в состав ЦКП НОЦ «Энергетика» ИТ СО РАН.

Экспериментальные исследования плазменной газификации органических отходов позволяют определить не только состав отходящих газов и их калорийность, но и удельные энергозатраты на переработку единицы массы отходов в кВт·ч/кг.

Расчетные данные по газификации углеродсодержащих отходов содержат необходимые значения температурных режимов процесса, состав продуктов газификации, калорийность синтез-газа, удельные энергозатраты и т.д. Сравнение результатов расчета и экспериментов должны подтвердить их согласие или указать на предел совместимости в заданном диапазоне параметров.

6.1.2 С учетом будущей капитализации результатов исследований плазменного оборудования на другие мощности и производительности следует уделить особое внимание работоспособности всех элементов электроплазменной установки. Если технологические особенности плазмохимических реакций определяются в плазменной электропечи, то последующие операции с отходящими (дымовыми) газами зависят от работоспособности вспомогательного оборудования ЛЭПУ-20: центробежно-барботажного аппарата (ЦБА), вихревого дожигателя, смесителя газов, фильтров очистки (так называемого экологического блока установки).

Получение высококалорийного синтез-газа и расплавленного шлака с целью дальнейшей его грануляции предполагает, что всё оборудование установки функционирует в оптимальных режимах. В противном случае пиролиз отходов может перейти в горение, может появиться черный дым, недостаточное разбавление холодным воздухом продуктов из дожигателя приведет к повреждению фильтров и т.д. Поэтому оптимизация рекомендованных параметров к каждому конструктивному элементу ЛЭПУ-20 является важной составляющей экспериментальных исследований.

Поскольку предполагается при переработке органических отходов испытать несколько видов морфологического состава отходов, то необходимо обобщить

полученные результаты по калорийности синтез-газа с учетом достигнутых температурных режимов электропечи и удельным энергозатратам на их газификацию.

6.1.3 Полученные результаты экспериментальных исследований требуют тщательного анализа по работоспособности электродугового плазмотрона ЭДПМ-50, плазменной электропечи ЛЭПП, электроплазменной установки ЛЭПУ-20 и всего вспомогательного оборудования, в т.ч. экологического блока очистки дымовых газов. Основное внимание необходимо обратить на взаимосвязь количества и качества синтез-газа в зависимости от таких определяющих параметров, как температура в зоне газификации отходов, объем горючей составляющей и балласта в отходящих газах.

Выводы по результатам экспериментальных исследований будут значимы при разработке технического предложения на создание электроплазменной установки производительностью 500 кг/ч. Они также необходимы для выбора электрогенерирующих агрегатов, в которых сжигание топливного газа обеспечивает получение электрической энергии.