

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Бойко Екатерина Евгеньевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ СЖИГАНИЯ
ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИИ ПРИ
ПЛАЗМЕННОМ СОПРОВОЖДЕНИИ В КОТЛОАГРЕГАТАХ ТЭС**

Специальность 05.14.14 - тепловые электрические станции, их энергетические
системы и агрегаты

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
доцент Овчинников Ю.В.

Новосибирск - 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА.....	9
1.1 Актуальность проблемы	9
1.2 Развитие технологии водоугольного топлива	9
1.3 Экологические характеристики тонкодисперсных водоугольных суспензий	24
1.4 Перспективы дальнейшего развития тонкодисперсных водоугольных суспензий	25
1.5 Проблемы сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий и предложения по решению проблем	29
1.6 Цели и задачи исследования	35
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ И МЕТОДА КОНСТРУКТОРСКОГО РАСЧЕТА ЦИКЛОННОГО ПРЕДТОПКА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ	37
2.1 Математическая модель процесса воспламенения и горения тонкодисперсных водоугольных суспензий в циклонном предтопке	37
2.2 Расчет кинетики воспламенения и горения тонкодисперсных водоугольных суспензий	46
2.3 Метод конструкторского расчета циклонного предтопка	53
2.4 Анализ влияния характеристик горения на конструкцию циклонного предтопка	56
2.4.1 Кинетические характеристики горения	56
2.4.2 Энергетические характеристики предтопка.....	59
2.4.3 Конструктивные характеристики предтопка	62
2.5 Выводы	64
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ.....	66
3.1 Требования, предъявляемые к системе зажигания тонкодисперсных водоугольных суспензий	66
3.2 Предложение по организации сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий	69

3.3 Условия горения тонкодисперсных водоугольных суспензий	71
3.4 Методические основы расчета мощности плазмотронов для циклонных предтопков	79
3.5 Метод термодинамического расчета мощности плазмотрона	82
3.6 Термодинамический расчет мощности плазмотрона	84
3.7 Выводы	86
ГЛАВА 4 МЕТОД КОРРЕКТИРОВКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЖИГАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ В КОТЛОАГРЕГАТЕ	87
4.1 Неопределенность исходной информации на функционирующей теплоэнергетической установке и методы снижения этой неопределенности ...	87
4.2 Некоторые методики согласования балансовых уравнений в энергетических установках	92
4.3 Метод и алгоритм согласования балансовых уравнений методом случайно-направленного поиска при наличии граничных условий	96
4.4 Сравнительный расчет согласования балансовых уравнений аналитическим методом и методом случайно-направленного поиска	105
4.5 Исследование снижения неопределенности в процессе сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий путем использования согласования субстанциальных балансовых уравнений методом случайно-направленного поиска при наличии граничного условия	122
4.6 Выводы	128
ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ	129
5.1 Общий метод технико-экономического исследования в инновационных проектах	129
5.2 Экономическое и экологическое преимущества сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий в котлах угольных теплоэлектростанциях перед традиционными системами сжигания пылеугольного топлива	131
5.2.1 Экономические преимущества	131
5.2.2 Экологические преимущества	134

5.3 Метод технико-экономического сравнения при плазменном воспламенении тонкодисперсных водоугольных суспензий и при системах жидкостного воспламенения.....	139
5.4 Выводы	144
Заключение	145
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	147
Приложение А	161
Приложение Б	162

ВВЕДЕНИЕ

Уголь был и остается, в ближайшем обозримом будущем, одним из основных энергетических ресурсов, как в мире, так и в России, и является самым распространенным, доступным и дешевым ресурсом из органических топлив. Расширение технологической базы использования угля – актуально. Одним из способов его использования является создание тонкодисперсных водоугольных суспензий (ТД ВУС) для последующего сжигания в энергетических установках широкого назначения, например, в циклонных предтопках ЦП. Многими учеными в прежние годы наработаны как технологии создания ТД ВУС, так и изучены вопросы его сжигания, в том числе в аппаратах циклонного типа. Вместе с тем имеются проблемы сдерживающие развитие данной технологии. Наиболее важными из них являются отсутствие надежного методического инструментария для создания собственно циклонных предтопок с гарантированными характеристиками по мощности параметрам процессов и сложности воспламенения высокообводненного топлива.

Настоящая работа направлена на усовершенствование технологии ТД ВУС при его сжигании в циклонных предтопках котельных агрегатов.

Целью работы является разработка методов создания аппаратов циклонного типа с надежным воспламенением и сжиганием тонкодисперсных водоугольных суспензий при плазменном сопровождении в котлоагрегатах.

Задачи работы

1. Разработать кинетический метод горения ТД ВУС в циклонном предтопке.
2. Разработка метода конструкторского расчета циклонного предтопка в инженерной постановке.
3. Анализ влияния параметров и характеристик горения на конструкцию циклонного предтопка.
4. Разработка метода плазменного воспламенения ТД ВУС в циклонном предтопке.

5. Разработка метода согласования балансовых уравнений для снижения неопределенности в процессе сжигания ТД ВУС.
6. Разработка метода технико-экономического обоснования применения плазменного розжига ТД ВУС в циклонном предтопке.
7. Выработка практических рекомендаций.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые построена модель горения высокообводненной тонкодисперсной угольной суспензии в циклонном предтопке, разработаны методы конструкторского расчета ЦП в инженерной постановке, метод плазменного воспламенения ТД ВУС с определением необходимой мощности плазмотрона, метод согласования балансов для снижения неопределенности в процессе сжигания ТД ВУС, метод технико-экономического обоснования применения плазменного розжига ТД ВУС.

Проведен анализ влияния параметров и характеристик горения на конструкцию ЦП, выработаны практически рекомендации по применению.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Кинетический метод горения ТД ВУС в циклонном предтопке.
2. Метод конструкторского расчета циклонного предтопка в инженерной постановке.
3. Влияние параметров и характеристик горения на конструкцию циклонного предтопка.
4. Метод плазменного воспламенения ТД ВУС в циклонном предтопке.
5. Метод согласования балансовых уравнений для снижения неопределенности в процессе сжигания ТД ВУС.
6. Метод технико-экономического обоснования применения плазменного розжига ТД ВУС в циклонном предтопке.
7. Результаты исследований параметров и характеристик горения и плазменного воспламенения ТД ВУС в циклонном предтопке, согласования балансовых уравнений и практические рекомендации.

Методы исследования: расчетно-аналитические, математического моделирования, балансовые методы. Все методы применены в инженерной постановке.

Достоверность подтверждается сравнением результатов с экспериментальными данными на всех этапах работы, а так же применением (в основе используемых методов) фундаментальных законов сохранения.

Личный вклад: все результаты, представленные без ссылок на другие источники, получены автором.

Практическая значимость работы: результаты работы использованы в организациях ЗАО ЗИО-КОТЭС и КОТЭС - наука для проектирования этих установок, использующих ТД ВУС на ТЭС и в учебном процессе НГТУ при подготовке студентов и магистрантов дневной формы обучения по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на 12ой международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики. Пути решения» (Саратов, 2014); Всероссийской научной конференции молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (Новосибирск, 2014, 2016); I Международной научной конференции молодых ученых (Новосибирск, 2014); 21 Всероссийской научно-технической конференции (Томск, 2015); 2 Всероссийской научной конференции с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных и жилых зданий»(Новосибирск, 2015); 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016);

По материалам диссертации опубликовано 13 печатных трудов, в том числе: в рецензируемых журналах 6– (из них по перечню ВАК 2,); монографий – 1; свидетельств о регистрации программ для ЭВМ – 1; в сборник научных трудов по материалам конференций – 5.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 118 наименований и 2

приложений. Общий объем работы составляет 162 страницы и содержит 57 рисунков и 17 таблиц.

ГЛАВА 1 НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

1.1 Актуальность проблемы

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что запасы энергии в ископаемых каменных и бурых углях в России многократно превосходят запасы энергии в остальных энергетических топливах, и существует проблема использования энергии угля на основе новых технологических и производственных процессов.

Уголь был и остается одним из основных энергетических ресурсов, как в мире, так и в России в ближайшем обозримом будущем, и является самым распространенным, доступным и дешевым ресурсом из органических топлив (1 МДж химической энергии в угле на порядок дешевле, чем в газе и нефти).

Перспективой использования угля является его применение в виде водоугольных суспензий (ВУС), при этом развитие технологии водоугольного топлива (ВУТ), пройдя стадию тонкодисперсной водоугольной суспензии (ТД ВУС) с разработкой соответствующей технологической базы, в будущем, должно перейти к стадии деминерализованной ТД ВУС, что позволит решить проблему экологически чистого сжигания этого топлива.

Вода в составе ТД ВУС является одним из важных элементов, она участвует в процессе горения, как один из стимуляторов качества процесса. Сжигание ТД ВУС с использованием загрязненных технологических вод, содержание которых в топливе может составлять (35-40%), заканчивается процессом восстановления чистой природной воды, как одного из важнейших минералов биосферы.

1.2 Развитие технологии водоугольного топлива

Водоугольное топливо (ВУТ) появилось как технический проект в 50-х...60-х годах XX века. Мелкодисперсная водоугольная суспензия возникала как побочный продукт при реализации угледобычи с использованием водяных пушек – мониторов, работающих под высоким давлением, а также при перекачивании

водоугольной пульпы по трубопроводам на большие расстояния. При соотношении угольной пульпы и воды 1:1 – водоугольная суспензия (ВУС) представляла собой грязеобразную жидкость, накапливающуюся в отстойниках, пунктах отбора сортового угля, и являлась определенной технической проблемой для транспорта развивающихся угольных технологий [117].

Проблема утилизации ВУС потребовала проведения ряда исследований как физических, так и технологических качеств этого угольного продукта. В результате этих исследований вместо видового системного наименования этого продукта ВУС повсеместно утвердилось название ВУТ, что закрепляло за этим образованием появление нового вида топлива.

Сегодня основные положения технологии получения ВУТ достаточно хорошо изучены и разработаны. Об этом говорит большое количество имеющихся публикаций в Японии, Китае, США, Швеции, Италии, в том числе и России. Так же изучен вопрос влияния качества углей на процесс производства и горения ВУТ (ВУС) [1-14].

Однако ВУТ на сегодня еще не является конкурентоспособным с наиболее распространенными углеводородными топливами. Тем не менее, ряд технологически развитых стран ведут работу в этом направлении и постепенно наращивают долю использования ВУТ в технологиях и в частности в энергетике [1-17].

Первые промышленные опыты по сжиганию ВУТ пришлось на 50-е годы XX века, а более интенсивно технология стала развиваться в 70-х годах XX столетия.

Интерес к ВУТ, как альтернативе мазуту, возрастал по мере того, как росли цены на нефть и нефтепродукты. Начиная с 70-х годов XX века цена на мазут устойчиво росла в связи с увеличением глубины переработки нефти в НПЗ, которая в настоящее время в США и Западной Европе составляет 90...95%.

В 10-х годах XXI века на мировом рынке цены на основные виды энергоресурсов в расчете на единицу энергии составляли: на нефть ~ 15,4 долл./ГДж, газ ~ 19 долл./ГДж, уголь – 1,6 долл./ГДж.

При этих условиях при одинаковом энергетическом эффекте себестоимость ВУТ была на порядок ниже, чем у мазута.

Различные способы приготовления и сжигания ВУТ разрабатывались в разное время в таких странах как Китай [18-22], Япония [1; 5], Италия [22-25], Канада[26], США. В период развития программы «Чистый уголь» США особенно были заинтересованы в использовании данной технологии [27-29]. В тот же период в России на НТЭЦ-5 «Беловский комплекс» были проведены испытания по гидротранспорту угля. Основным приоритетом была транспортировка угля из г.Белово пос. Инской и дальнейшее его сжигание на котлах НТЭЦ-5 в виде водоугольного топлива. Был создан специальный блок для сжигания ВУТ.

Однако, несмотря на освоение водоугольного топлива на ряде энергоустановок и электростанций в разных странах, широкого внедрения ВУТ в энергетику не произошло. Это связано с несколькими причинами:

- ВУТ довольно трудное для эксплуатации топливо, что связано с его низкой реакционностью в период воспламенения и необходимостью постоянного контроля над факелом в процессе сжигания;
- внедрение ВУТ требует наличия дополнительного растопочного топлива и параллельной системы топливоподачи для него;
- внедрение ВУТ требует определенной модернизации котельных установок и топливного хозяйства электростанций и котельных, что не всегда возможно на существующих электростанциях;
- существует жесткая конкуренция со стороны нефтепромышленников, не позволяющая продвигать ВУТ на топливные рынки.

Результаты лабораторных и промышленных исследований ВУС и ВУТ, которые проводились в разных странах, в том числе и в СССР – России в 80-х...90-х годах XX века, позволили значительно улучшить качество производства ВУТ, в частности найти способы стабилизации топлива, обеспечить сохранность однородности массы топлива по плотности, исключить или значительно снизить развитие флокулизации, т.е. появления различных комков в массе топлива, что было характерно для ВУС и что отсутствует в ВУТ.

Были разработаны специальные добавки-пластификаторы, которые значительно улучшили технологические качества топлива, но вместе с тем удорожали его. Совершенствовалась технология производства ВУТ. Первоначально ВУС получали при использовании шаробарабанных мельниц (ШБМ) мокрого помола, применялись также стержневые и вибрационные мельницы [117].

В результате исследования [117] технологии производства ВУТ было установлено, что наилучшими технологическими характеристиками обладают топлива, у которых имеет место двухмодальное распределение твердой фазы. Нижняя мода лежит в области 10-15 мкм, верхняя – в области 70...90 мкм по крупности твердой фазы при практически полном отсутствии частиц в области от 20 до 60 мкм. Такое распределение твердой фазы позволяет получить стабилизированное водоугольное топливо при максимальном наполнении его горючим компонентом (до 65-70%).

Ниже на Рисунке 1.1 приведена принципиальная схема производства ВУТ, позволяющая получать бимодальное распределение твердой фазы в топливной системе.

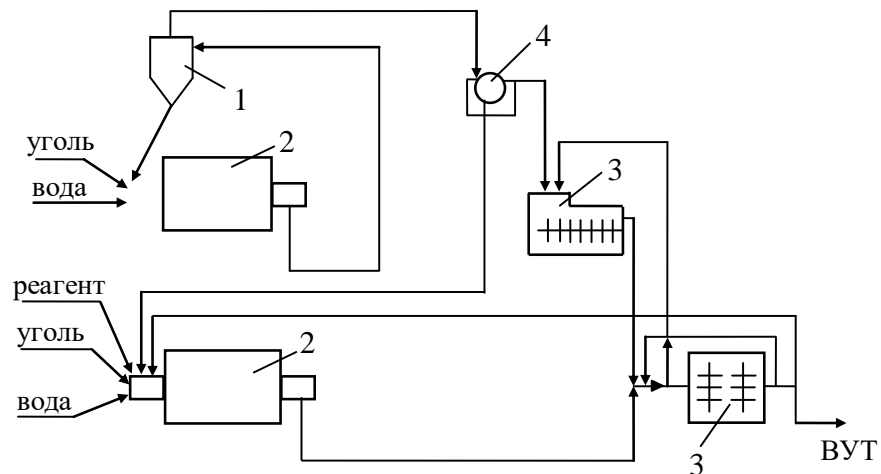


Рисунок 1.1 - Технологическая схема приготовления ВУТ на Японско-Китайском предприятии «Yanri CWM»:

1 – гидроциклон; 2 – шаровые мельницы; 3 – смесители; 4 – вакуумный фильтр

Начиная с 2000-х годов исследования по разработке ВУТ из углей Западной и Центральной Сибири начали проводить в Новосибирском государственном техническом университете в Проблемной лаборатории кафедры «Тепловые электрические станции».

Предметом исследования была технология получения ВУТ. Предварительно был выполнен анализ существующих технологий и характеристик ВУТ на их основе.

Было установлено:

- все существующие технологии первого поколения (до 2000 г.) энергозатратны. Так, удельные затраты электроэнергии в этих технологиях составляли до 230 кВт·ч/т продукции (НТЭЦ-5), 180...190 кВт·ч/т (Yanri CWM), 90...100 кВт·ч/т (Японская топливная корпорация);
- низкая стабильность ВУС, которая фактически составляла от 2-3 недель до 1,5-2 месяцев, что затрудняет перевозку и хранение водоугольного топлива;
- слишком широкая полидисперсность твердой фазы (0...250 мкм), что отрицательно влияет на качество сжигания топлива;
- абразивность ВУТ, обусловленная наличием крупной фракции >90 мкм, что приводило к быстрому износу форсунок и забиванию фильтров.

Были проанализированы технологические схемы производства ВУТ и аппараты, применяемые в этих технологиях до 2000 г. [1; 2], а также результаты исследований физико-химических процессов при новых способах обработки твердых и жидких фаз, как компонентов ВУС: исследования измельчения углей при использовании ударно-скалывающего способа в быстроходных пальцевых мельницах (дезинтеграторах) в ИГИ [30-38], исследования процессов диспергации твердых тел в СО РАН [39], исследование физико-химических процессов при кавитации воды и ВУС в гидродинамических кавитаторах и суперкавитации в потоках и струях в Федеральном техническом университете (Красноярск) [40-42]. Были проанализированы технологические процессы получения маловязких и устойчивых ВУТ, которые были реализованы в некоторых НПО (ФГУП «Экотехника», г.Новокузнецк; «Радекс», г.Барнаул; «ТДА Технологии», г.

Новосибирск) продукты их производства известны под рабочими названиями: КаВУТ, ЭкоВУТ, КЖТ и т.п.

В результате анализа процессов диспергации угольного топлива в мелющих устройствах различного типа за основной процесс диспергации был принят ударно-скалывающий метод, как наименее энергоемкий и близкий к теоретически минимальному расходу механической энергии. Этот процесс реализуется в так называемых «дезинтеграторах» - быстроходных мельницах сухого помола [43;117].

Для получения ультратонкого измельчения твердой фазы необходимо было преодолеть «порог пластической текучести» угольных частиц, при котором начиналось адгезия, в результате чего фракция угольных частиц менее 10 мкм не превышала 15%. Для преодоления этого порога нужно было ввести вторую ступень измельчения, в которой присутствовала бы разделительная жидкая среда. Второй ступенью должен быть гидродинамический кавитатор, в котором и завершался бы процесс приготовления ВУС с очень большой фракцией микронных и субмикронных частиц твердой фазы [42].

Были предложены варианты технологических схем производства водоугольного топлива, имевшего рабочее название искусственное композиционное жидкое топливо (ИКЖТ) [44-47].

В процессе исследований производства ИКЖТ в соответствии с предложенными схемами в Проблемной лаборатории каф. ТЭС НГТУ было установлено еще одно важное качество новой технологии производства ВУТ – это активирование твердой и жидкой фазы и получение устойчивой системы на этой основе.

Одна из возможных принципиальных схем установки представлена следующим образом (Рисунок 1.2).

Исследования ИКЖТ в лаборатории на установке, использующей новую технологию производства топлива, показали, что основные задачи совершенствования ВУТ решены:

- расход электрической энергии на производство топлива снизился до уровня 25...35 кВт·ч/т;
- крупность твердой фазы составила 0...3,5 мкм, при этом 70% частиц лежит в области наноразмеров;
- стабильность топлива возросла, как минимум до 12 мес.

Результаты сжигания ИКЖТ в лаборатории и на специальном полигоне на территории академ. городка СО РАН позволили получить материал для конструктивно-компоновочных разработок для развития технологии. Результаты изложены в настоящей главе и в монографии [48].

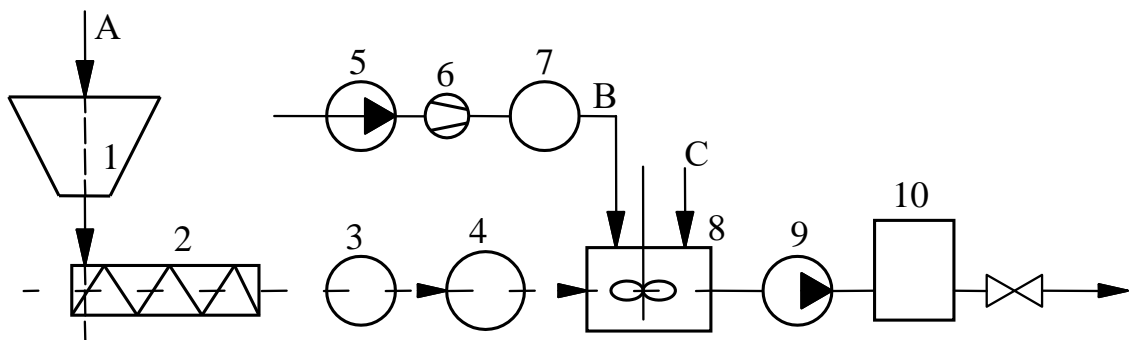


Рисунок 1.2 - Блок – схема установки средней производительности для производства ИКЖТ с активацией компонентов: 1 – бункер угля; 2 – шнековый питатель; 3 – дробилка; 4 – дезинтегратор; 5 – основной кавитатор; 10 – бак. А – уголь; В – активированная вода; С – добавки

Осмотр и ознакомление с результатами работ по сжиганию ВУС в Западной Сибири позволили сформировать требования Проблемной лаборатории ТЭС НГТУ к развитию технологии [117]:

- предлагаемая система не должна изменять конструкцию котлоагрегата;
- наиболее тяжелая часть процесса – воспламенение топлива – должна быть вынесена из топочного пространства в специальный предтопок, где процесс можно контролировать и легко управлять им;

- специальный предтопок должен быть циклонным, то есть компактным, высокотеплонапряженным, чтобы обеспечить успешное воспламенение топлива на начальной стадии горения, когда это топливо малореакционно;
- наличие различных видов топлива (основное и растопочное) является нежелательным, нужно стремиться к тому, чтобы система работала на едином виде топлива;
- использование плазменной системы зажигания и сопровождения горения;
- управление системой зажигания и сопровождение горения должно осуществляться автоматически при использовании процессора или компьютера.

В «Проблемной лаборатории НГТУ» (в ГК. №16.518.11.7079 от 25 августа 2011 г) совместно с ОАО КОМПОМАШ-ТЭК, НПО «Росток», ЗАО ЗИОКОТЭС – Наука в 2011-2013 гг выполнены исследования по теме «Проведение исследований на огневом стенде ОИСГТ-6 кинетики горения тонкодисперсных водоугольных суспензий и оптимизация режимов их сжигания применительно к промышленным котлоагрегатам мощностью до 35 МВт».

Анализ зарубежных разработок по развитию технологии ВУТ (США, «Чистый уголь»), Австралия (ВУТ в ГТУ), ДВС, Канада, отечественных НИР (ИТФ СО РАН, Сиб ВТИ, ИГИ и др.), разработки НОТЭП, ФГУП «Экотехника», НПО «Росток», ЗАО ЗИО КОТЭС-наука, «Радекс» (Барнаул), НГТУ, «КОМПОМАШ-ТЭК» демонстрируют актуальность развития технологии ВУТ (ТД ВУС), а также перспективность ее практического применения.

В основе новой технологии производства тонкодисперсного водоугольного топлива в виде суспензии (ТД ВУС) лежат два процесса диспергации угля, ранее не применявшиеся в угольной промышленности – измельчение в высокоскоростных мельницах ударно-скалывающего воздействия (сухой метод) и гидродинамическое измельчение угольного порошка в кавитационном поле (мокрый способ).

Аппараты под названием «дезинтегратор» для сухого помола твердых минеральных продуктов в СССР производились для строительной промышленности по разработкам проектного бюро «Дезинтегратор», г. Таллин. Кавитаторы, как разновидность насосов центробежного типа производились на некоторых предприятиях в Москве для нужд лакокрасочного производства и строительной промышленности.

В Проблемной лаборатории теплоэнергетики НГТУ совместно с НПО «Росток» разработаны чертежи и изготовлен дезинтегратор [43], который был использован при исследовании диспергации кузнецких углей в лаборатории университета.

На Рисунке 1.3 показан лабораторный дезинтегратор производительностью 0,5 т/час.

В ходе исследований процесса диспергации углей в конструкцию дезинтегратора внесен ряд усовершенствований, который позволил значительно увеличить долю тонкодисперсной фракции помола и увеличить ремонтный предел аппаратов до времени, сопоставимого с межремонтным пределом традиционных методов помола. При этом энергопотребление на дезинтеграторе не превышало 20...22 кВт·ч/т порошка.

На Рисунке 1.4 показаны гистограммы распределения фракций угольного порошка в дезинтеграторах и дезинтеграторах после внесения в него конструктивных изменений, которые составили «ноу-хау». Гистограммы получены на основе измерений, выполненных в лаборатории ФГУП «Сибирского государственного ордена Трудового Красного знамени научно-исследовательского института метрологии».

На Рисунке 1.5 представлен внешний вид дезинтегратора НПО «Росток» последней модели с учетом конструктивных доработок.

Полученный угольный порошок после дезинтегратора имеет время релаксации активного состояния около 10 мин., после чего энергия активации переходит в тепло. Соединение с активированной водой должно произойти до

истечения времени релаксации твердой фазы. Это осуществляется в смесителе или в системе кавитатора.

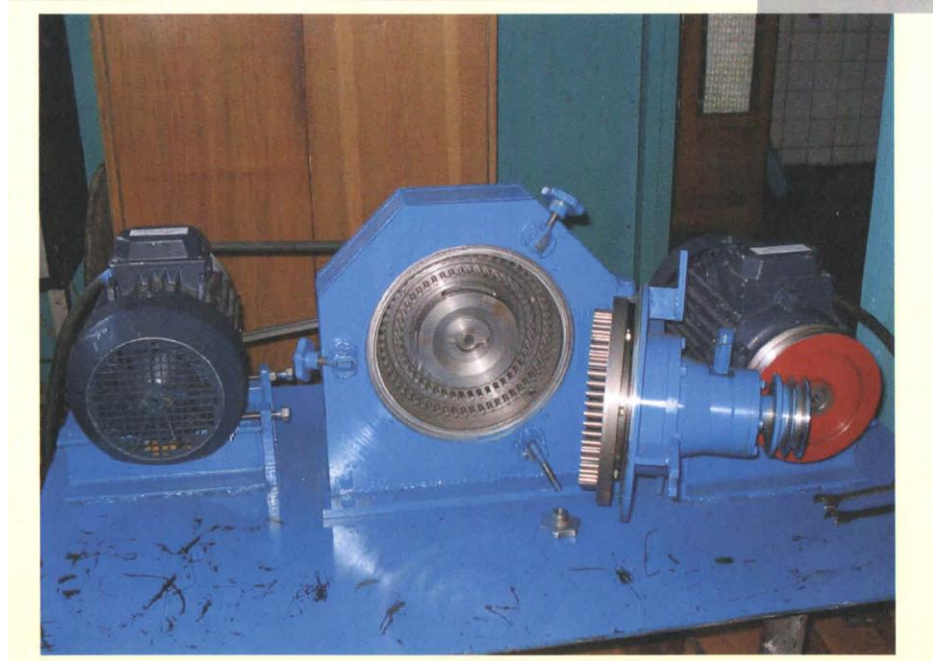


Рисунок 1.3 - Дезинтегратор производительностью 0,5 т/час



Рисунок 1.4 - Гранулометрический анализ угольного порошка после дезинтегратора:

1 – старая модель дезинтегратора, двойной помол;

2 – модифицированная модель дезинтегратора, одинарный помол.

На Рисунке 1.6 представлена лабораторная кавитационная установка для обработки ВУТ.

За основу конструкции взят кавитатор для приготовления водоэмульсионной краски в строительстве. В конструкцию внесен ряд изменений, после чего кавитатор стал пригоден для приготовления водоугольных суспензий. Эти изменения были направлены на увеличение межремонтного периода аппарата и удешевления ремонта.

Испытание технологии на комплексе дезинтегратор-кавитатор позволило получать гомогенную топливную систему с длительным сроком хранения (более года) без изменения структуры и без использования пластификаторов.



Рисунок 1.5 - Дезинтегратор производительностью 5 т/ч

Исследование крупности твердой фазы этой устойчивой топливной системы выполнено в Проблемной лаборатории НГТУ с использованием микроскопа с компьютерной приставкой (см. Рисунок 1.7), а также в лаборатории Г.С. Ходакова в ИГИ по оригинальной методике этой лаборатории

Исследовано несколько образцов топлива на основе кузнецких углей. Типичная гистограмма крупности твердой фазы ТД ВУС, полученной по методике новой технологии, представлена на Рисунке 1.8.

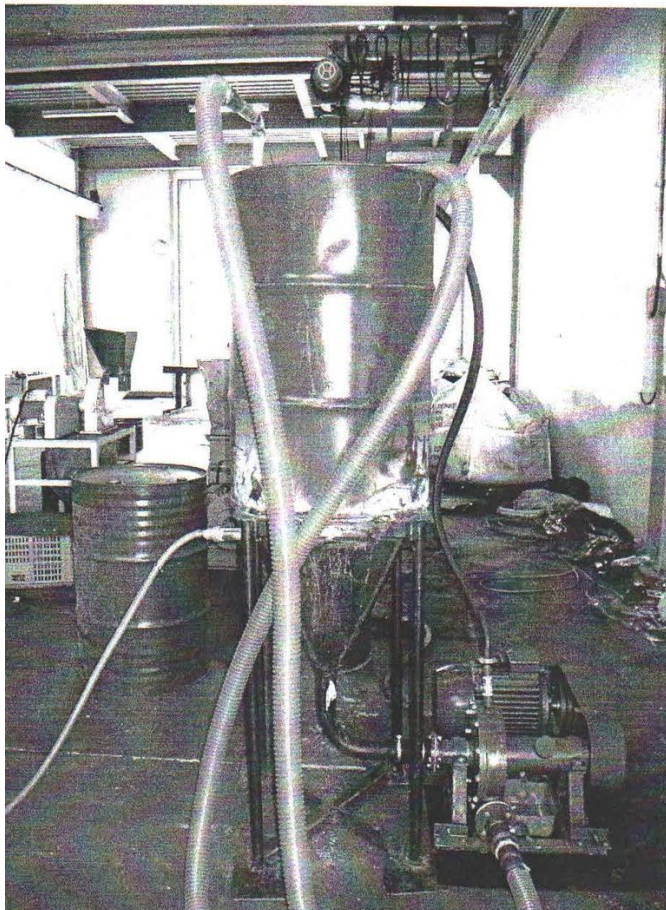


Рисунок 1.6 - Кавитационная установка для обработки ТД ВУС

Из Рисунка 1.8 следует, что около 75% твердой фазы в топливной системе относится к фракции 0...1 мкм, т.е. принадлежит к области наноразмеров.

Все эти исследования позволяют классифицировать новое топливо, как ТД ВУС – тонкодисперсная водоугольная суспензия, что более правильно отражает видовую принадлежность ИКЖТ в гамме водоугольных топлив.

Реологические исследования топливной системы ТД ВУС показали, что это топливо является неньютоновской жидкостью типа систем Гершель-Баркли [49] при содержании твердой фазы свыше 50%. По результатам исследований установлено, что при увеличении содержания твердой фазы ТД ВУС переходит в

устойчивое тиксотропное состояние, что является ценным технологическим качеством для длительного хранения и транспортировки этого топлива. Также разработан «Разжижитель на основе углей БЗ», добавление которого к системе в количестве нескольких промилле возвращает ее в лабильное состояние.

В лаборатории Проблем энергетики НГТУ были исследованы: устойчивость ТД ВУС, кинетические характеристики топлива, горение, и выполнена разработка промышленной установки производства ТД ВУС на 3 т/ч.

На Рисунке 1.9 представлено горение ТД ВУС на огневом стенде.

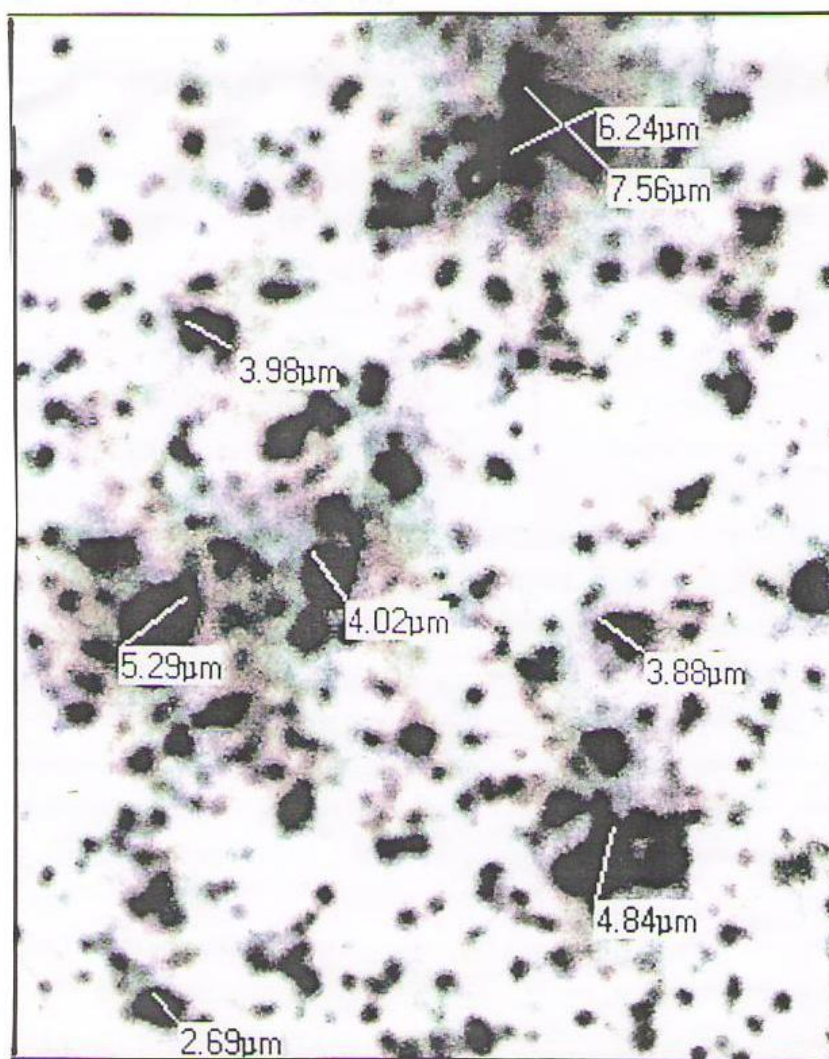


Рисунок 1.7 - Твердая фаза в ТД ВУС под микроскопом

Ниже, на Рисунке 1.10 представлен дезинтегратор для производства 3 т/ч ТД ВУС.

В результате исследований топлива и его свойств были сформулированы основные особенности ТД ВУС по сравнению с другими видами энергетических топлив:

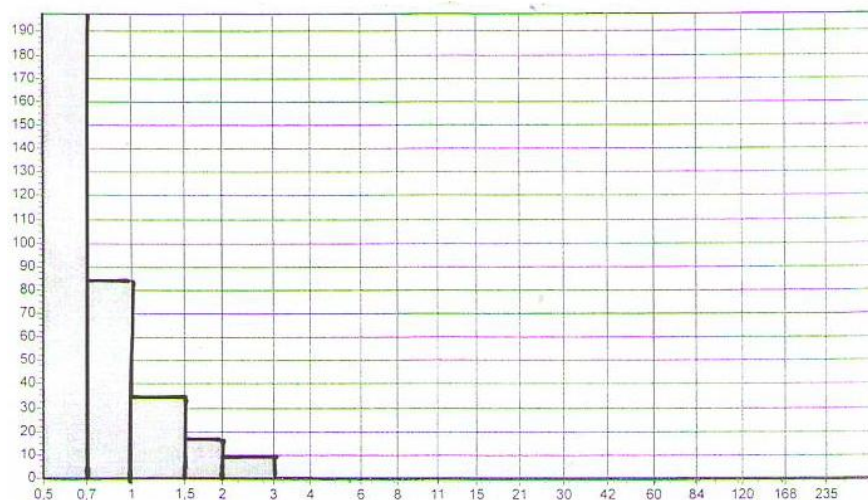


Рисунок 1.8 - Интегральное распределение крупности твердой фазы в ТД ВУС



Рисунок 1.9 - Горение ТД ВУС

Технологические преимущества ТД ВУС:

- позволяет легко механизировать и автоматизировать процессы подачи и сжигания топлива;
- емкости для хранения ТД ВУС легко очищаются от его остатков; исключение взрыво- и пожароопасности.



Рисунок 1.10 - дезинтегратор для производства 3 т/ч ТД ВУС

Экономические преимущества:

- снижение на 15...30% эксплуатационных затрат при хранении, транспортировке и сжигании;
- для производства может быть использован уголь любой фракции и калорийности, в том числе угольный шлам, а также воды любого качества, включая шахтные и промсточные воды. Одновременно может решаться и проблема утилизации сточных вод и промежуточных продуктов углеобогащения, угольной мелочи, шламов и других компонентов;
- зола от сжигания ТД ВУС является технологической добавкой при производстве строительных материалов.

Экологические преимущества топлива ТД ВУС:

- экологически безопасно на всех стадиях производства, транспортировки и использования, при случайных разливах не наносит ущерба окружающей среде;
- снижает в 1,5-3,5 раза вредные выбросы в атмосферу;
- эффективная утилизация образующейся при сжигании золы.

1.3 Экологические характеристики тонкодисперсных водоугольных суспензий

По степени экологической опасности все существующие энергетические технологии в полных циклах можно проранжировать по следующему ряду (по убывающей):

1. цикл атомной энергетики;
2. цикл нефтяной (углеводородной) энергетики;
3. цикл угольной энергетики;
4. цикл газовой энергетики;
5. цикл водоугольной энергетики.

Ниже дана Таблица 1.1, в которой производится сравнение угольного топлива, мазута и ТД ВУС на основе нормативного расчета и эксперимента, выполненного на стенде ФГУП «Экотехника» по удельным выбросам в атмосферу основных загрязняющих компонентов.

1. Выбросы рассчитаны для котлов малой паропроизводительности до 320 т/ч.
2. Выброс серы для котлов паропроизводительностью $D=320$ т/ч определен по [50].
3. Выбросы NO_x для мазута рассчитаны по [50; 51].
4. Выбросы NO_x для ТД ВУС приняты по данным испытаний на стенде института ФГУП «Экотехника» (г. Новоскузнецк).

Кроме того водоугольное топливо в виде ТД ВУС не является загрязнителем воды (в отличие от нефтяного топлива, используемого на ТЭС) в

случае его разлива, так как жидкая фаза представлена чистой водой и не имеет осадочных групп.

Таблица 1.1 - Сравнение экологических характеристик основных видов топлива

№ п.п.	Виды выброса, размерность	Топливо		
		Уголь, П Кузнецкий	Мазут М100, Омский	ТД ВУС на основе угля П и М100
1	Объем продуктов сгорания, $\frac{\text{нм}^3}{\text{МДж}}$	0,351	0,306	0,324
2	Потребление воздуха, $\frac{\text{нм}^3}{\text{МДж}}$	0,324	0,286	0,292
3	CO ₂ , г/МДж	93,7	78,7	87,9
4	SO ₂ , мг/МДж	190	1250	115
5	NO _x , мг/МДж	258	850	17 - 35
6	Зола на топочных газах, г/МДж	11,899	-	7,717

1.4 Перспективы дальнейшего развития тонкодисперсных водоугольных суспензий

Анализ литературных источников, исследования, выполненные в лаборатории «Проблем энергетики» при кафедре ТЭС НГТУ, позволяют наметить следующие направления развития технологии ТД ВУС:

- Глубокая диспергация твердой фазы с доведением размеров частиц до уровня 0,4...0,5 мкм (max). Для этого необходима разработка многоступенчатого кавитатора промышленного уровня по производительности. Некоторые эксперименты показали, что при этом резко возрастает реакционная способность ТД ВУС, а

исследования показали увеличение теплоты сгорания ТД ВУС, что можно объяснить гидратацией больших молекул в составе угля.

- Использование в ТД ВУС некоторых компонентов, которые представляют собой издержки технологического процесса, продукты для утилизации, и представляют экологическую угрозу для окружающей среды. К исследованиям такого типа относятся:
 - сжигание в составе ТД ВУС технологического глицерина в смеси с метанолом в технологии производства «Биодизель» [52];
 - сжигание в составе ТД ВУС экстракции из загрязненной нефти так называемых «нефтяных амбаров», в многочисленных мазутохранилищах, цистернах, трубопроводах и т.п., которые имеют место в старых хозяйствах промпредприятий;
 - использование в составе ТД ВУС таких технологических отходов как ультродисперсный углерод в технологии производства электродов, а также, кокса и пека, которые являются отходами использования мазута при сжигании в технологических печах.

Все эти направления являются экологозащитными технологиями, они требуют соответствующего финансирования.

- Сверхчистый уголь для производства ТД ВУС. В настоящее время достигнуто обогащение угля до значения $A^p < 1,0$ %. Такой уголь дороже обычного товарного угля с содержанием минеральной части до 10%. На мировом рынке цена такого угля возрастает примерно в два раза, но при этом резко возрастает экологическая чистота использования ТД ВУС на его основе и калорийность, которая приближается к калорийности углеводородных топлив.

Кроме того, в настоящее время ведется активное продвижение ВУТ в качестве топлива для тяжелых дизелей [53], при этом используется обогащение ВУТ с содержанием золы менее 1%, а также для энергетических ГТУ.

Свойства сверхчистого угля, как продукта, приведены в Таблице 1.2. Таблица также показывает характеристики сверхчистого угля, заданные

компанией Mitsubishi Heavy Industries (МНІ) в Японии для использования в своих газовых турбинах. Сверхчистый уголь, как планируется, может подаваться либо пневмотранспортом, либо в виде ТД ВУС. Причем подача в виде ТД ВУС является более предпочтительной с точки зрения удобства технологического процесса и обеспечения качественного распыла топлива в камере сгорания.

Беспримесность сверхчистого угля была улучшена с целью сделать его пригодным для прямого сжигания в газовых турбинах, снизив содержание остаточной золы примерно до 0,1 % с температурой плавления золы более 1500 °С. Более высокая чистота достигнута за счет оптимизации существующего процесса и добавления гидротермальной мойки. Компания UCC Energy продолжает сводить к минимуму содержание золы в исходном угле, чтобы сократить расход реагентов и затраты на переработку и весь топливный цикл в целом.

Камера сгорания газовой турбины для прямого сжигания угля и ТД ВУС производства Mitsubishi Heavy Industry (МНІ) представлена на Рисунке 1.11 и Рисунке 1.12.

Таблица 1.2 - Свойства сверхчистого угля и требования для применения угля в газовых турбинах

Свойства	Сверхчистый уголь	Стандарт Mitsubishi (МНІ)
Общее содержание золы	0,08 – 0,14 %	< 0,2 %
Размер зольных частиц	< 5µм	< 5µм
Натрий	58 промилле	< 50 промилле
Температура плавления золы	> 1500 °С	> 1350 °С

Кроме описанных выше, австралийские разработчики технологий ТД ВУС провели ряд успешных испытаний по использованию ТД ВУС в дизельных двигателях, чем доказали возможность перспективной замены традиционных жидких топлив на ТД ВУС.

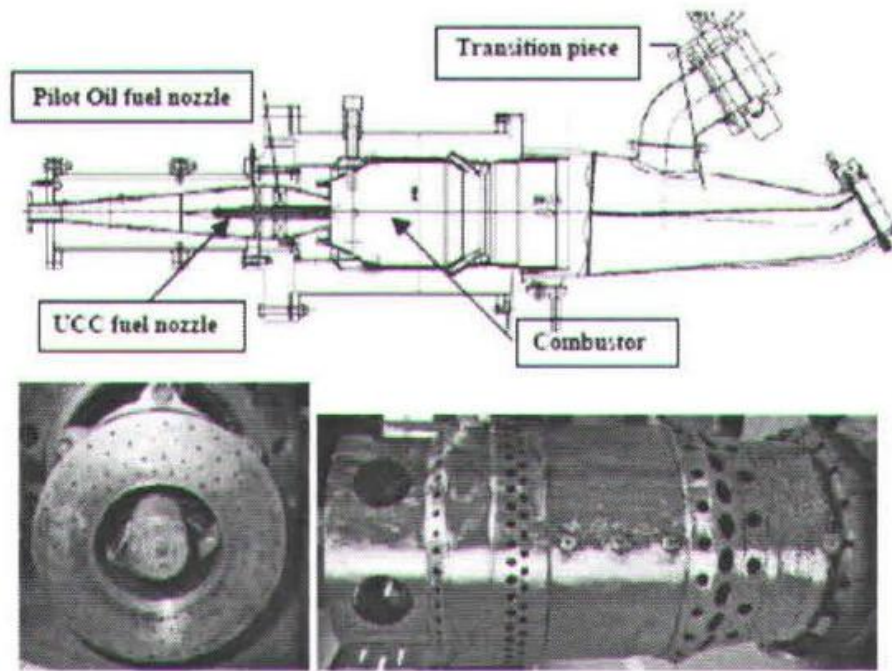


Рисунок 1.11 - Камера сгорания для газовой турбины МНІ для работы на УСС.

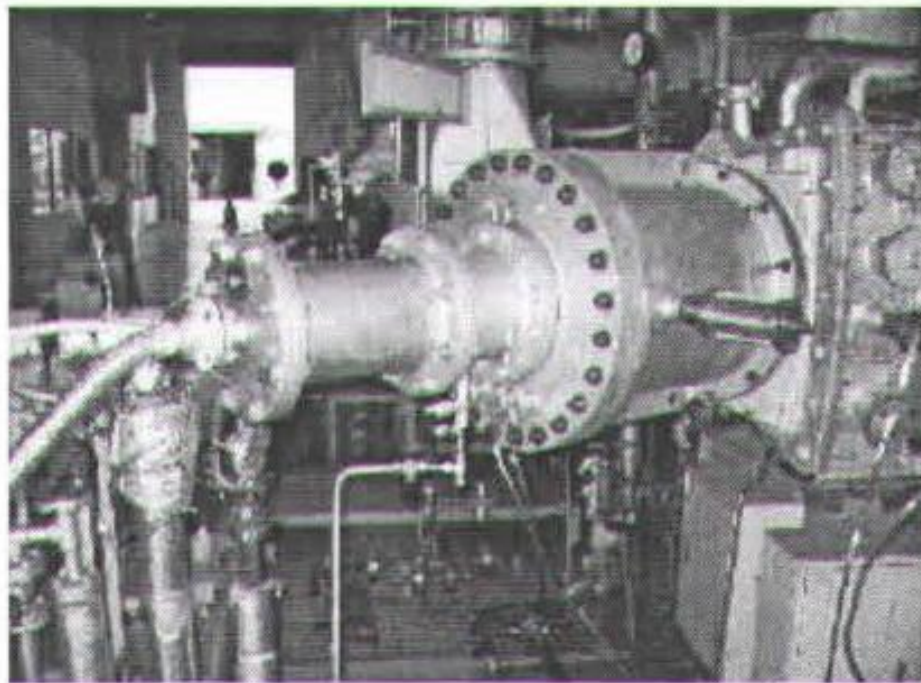


Рисунок 1.12 - Фото опытной установки с камерой сгорания МНІ для работы на УСС

1.5 Проблемы сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий и предложения по решению проблем

Основной проблемой при использовании ТД ВУС, до сих пор окончательно и качественно не решенной, является ее низкая реакционная способность на начальном участке горения. Поскольку активное воспламенение топлива определяет его дальнейшее горение, то эта проблема сдерживает развитие технологии водоугольной суспензии. Согласно исследованию, выполненным в НГТУ [54], критерий воспламеняемости водоугольного топлива на начальной стадии воспламенения имеет значение $K_0 = 3,8...5,1$ что выше, чем у антрацита $K_0 = 2,6...3,9$ но ниже, чем у трудносжигаемых тощих углей $K_0 = 6,5...7,5$. Исследования кинетической характеристики ТД ВУС термогравиметрическим методом подтверждают это, а также демонстрируют высокую реакционную способность ТД ВУС на основном участке горения, сопоставимую с реакционной способностью ультрадисперсного угольного топлива (Рисунок 1.13, Рисунок 1.14).

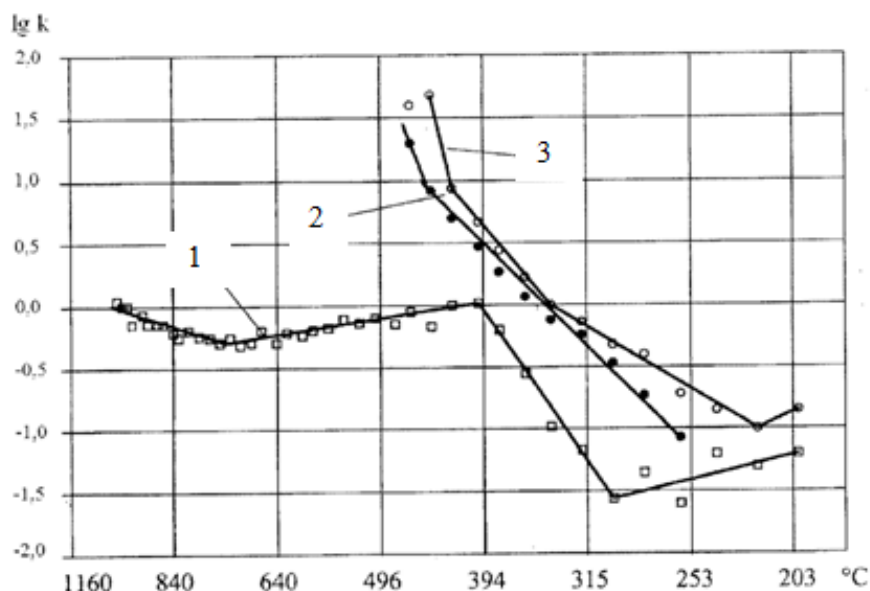


Рисунок 1.13 - Зависимость скорости реакции горения от температуры
Каменный уголь марки Д (Сахалин) 1 – крупка ϕ 1...3 мм; 2 – ТД ВУС ϕ до 4мкм; 3 – ультрадисперсный уголь $\phi \sim 30$ мкм. (Дериватограф С-1500Q)

Из Рисунка 1.13 следует, что горение ТД ВУС происходит в области кинетического горения с высокой скоростью даже при низких температурах 300...400 °С, что хорошо согласуется с выводами Г.Н. Делягина [55]. Это подтверждает также рис.1.13, полученный на другом типе дериватографа. Образец топлива на Рисунке 1.14 содержит 20% глицерина, 60% угля и 20% воды.

Таким образом, усилия по решению проблемы стабильного и надежного сжигания тонкодисперсной водоугольной суспензии должны быть направлены в первую очередь на интенсификацию воспламенения топлива на начальном участке горения.

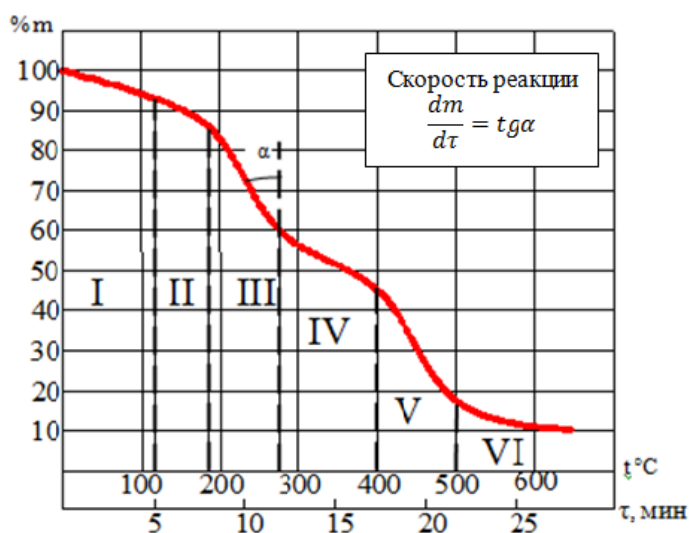


Рисунок 1.14 - Фрагмент дериватограммы-термогравиметрическая кривая:

I - Испарение внешней влаги; II - Выход внутренней влаги; III - Горение летучих; IV - Переход к горению кокса; V - Горение кокса; VI -

Догорание. (Дериватограф NETZCH Jupiter STA 440 C)

Существует несколько подходов к решению этой задачи. Известен метод установки зажигательного пояса при сжигании малореакционных антрацитов. Зажигательный пояс представляет собой слой футеровки, нанесенный сверху на парогенерирующие трубки в топке котла. Он обхватывает по внутренней стороне топки горящий факел и создает дополнительное термическое сопротивление теплопередаче на некоторой длине топочного пространства. В результате

возрастает температура на тепловоспринимающей поверхности со стороны футеровки, а также температура и самого факела, что способствует увеличению скорости горения и воспламенения топлива [56].

Однако для сжигания ТД ВУС этот метод можно применять только после тщательной модельной и экспериментальной проработки последствий модернизации котлоагрегата, поскольку изменение температурного режима в топке, а также на парогенерирующих поверхностях может приводить к непредсказуемым отрицательным последствиям для эксплуатации энергоустановки.

Другой метод, применяемый Институтом теплофизики СО РАН [57], заключается в размещении дополнительной поверхности в зоне температур топочного пространства. Эта поверхность представляет собой некоторую конструкцию из огнеупорной керамики, которая исполняет роль высокотемпературного аккумулятора тепла, тем самым сглаживает колебания температуры, возникающей при дестабилизации режима горения. Кроме того керамика является катализатором горения.

Вмешательство в аэродинамические и тепловые процессы в топке всегда нежелательно без тщательного изучения последствий, часто эти последствия непредсказуемы. При сжигании ТД ВУС среда в топке является восстановительной, и это негативно сказывается на сроках межремонтного периода любых керамических насадок при высоких температурах. Непонятно, как изменится межремонтный период эксплуатации котла и стоимость ремонтов. Керамика в топке находится в сопоставимых условиях с насадками из шамотного кирпича в кауперах доменных печей при температуре 1100...1300 °С, которые выдерживают срок менее года.

Известен способ использования адиабатного предтопка для воспламенения и сжигания ВУТ [58; 59]. Котел в этом случае играет роль котла-утилизатора. Этот способ применяется при модернизации старых промышленных котлов небольшой производительности, что позволяет значительно поднять их эффективность. Недостатком метода является большой объем предтопка,

сопоставимый с объемом самого котла. Использование этого метода затруднено для перевода на ТД ВУС энергетических котлоагрегатов.

Известны попытки инициации зажигания и горения ТД ВУС другим топливом, мазутом или высокорекреационной угольной пылью. Недостатком этого метода является то, что топлива с различной кинетикой горения сжигаются совместно в одном пространстве топки. Это приводит к нестабильности горения иницируемого топлива и усложняет управление топочным процессом.

Во всех описанных выше случаях экономический эффект возможен, если происходит вытеснение дорогого топлива, мазута, дешевой ТД ВУС.

Эксергетический анализ замещения топлив при модернизации показывает, что эффект при этом очень значительный [8], что позволяет перекрывать все недостатки и неудобства реконструкции за счет топливной составляющей.

Во всех описанных выше способах запуск котла осуществляется на растопочном топливе – мазуте, иногда на соляровом масле, и только по достижению рабочей температуры $\sim 900 \dots 1000$ °С производится переключение на основное топливо. Это большой недостаток, который присущ всем энергетическим котлоагрегатам, работающим на угле. Во всех рассмотренных случаях требуется наличие двух систем топливоподачи, что неудобно и сложно для эксплуатации.

На основе анализа существующих способов сжигания водоугольной суспензии и собственных исследований были сформулированы основные принципы оптимальной системы воспламенения ТД ВУС представлены в пункте 1.2.

В соответствии с предложенными основными техническими решениями проблемы сжигания ТД ВУС в энергетических котлоагрегатах, на опытном исследовательском стенде горения топлива ОИСГТ-6 проведено исследование сжигания водоугольного топлива в циклонных предтопках).

Ниже, на Рисунке 1.15 и Рисунке 1.16, показаны испытательный стенд и циклонный предтопок при сжигании топлива.

Экспериментальные исследования сжигания водоугольного топлива одновременно сопровождались математическим моделированием процессов в ЦП с использованием адаптированных компьютерных программ Fluent и Boiler Designer.

Эти исследования позволили сформулировать требования к конструкции ЦП, сопоставить результаты эксперимента с теоретическими работами в этой области [60; 61].

По результатам исследований разработаны рекомендации для конструкторских проработок системы воспламенения водоугольной суспензии [62].



Рисунок 1.15 - Испытательный стенд с тепловой мощностью горелочного устройства 6,5МВт

Основные элементы установки: 1 – супорт; 2 – вентилятор; 3 – циклонный предтопок; 4 – бак с ТД ВУС.



Рисунок 1.16 - Циклонный предтопок для котла, тепловой мощностью 6,5 МВт

Перспективным вариантом воспламенения ТД ВУС следует считать применение плазменной технологии. Это направление исследований получило апробацию в ИТ СО РАН. На Рисунке 1.17 показано использование плазмотрона мощностью 300 Вт для воспламенения водоугольной суспензии. Плазменная технология розжига превосходит другие, связанные с растопочным топливом, за счет своей простоты.

Таким образом, на основании изложенного выше, можно утверждать, что сохраняется актуальность работ по развитию технологии ТД ВУС. Развитие данной технологии является стратегическим направлением технологий «углепрома», которые заметно отстают от технологий «нефтепрома» и «газпрома».

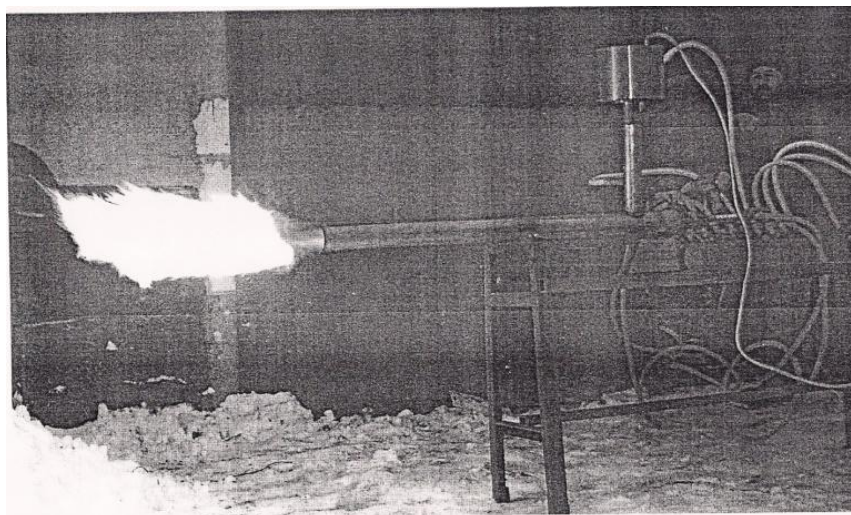


Рисунок 1.17 - Розжиг водоугольного топлива с помощью плазмотрона

1.6 Цели и задачи исследования

В длительной перспективе технологии ТД ВУС обладают важнейшим преимуществом перед нефтью и природным газом. Нет сомнения, что по мере решения проблем, связанных со сжиганием этого вида топлива, интерес к нему будет возрастать. Этим объясняется то, что в развитых технологически странах, финансирование исследований в этой области не прекращается, поэтому исследования ТД ВУС актуальны.

Целью настоящей работы является разработка методов создания аппаратов циклонного типа с надежным воспламенением и сжиганием тонкодисперсной водоугольной суспензии при плазменном сопровождении в котлоагрегатах.

Для достижения этой цели ставятся следующие задачи:

1. Разработать кинетический метод горения ТД ВУС в циклонном предтопке.
2. Разработка метода конструкторского расчета циклонного предтопка в инженерной постановке.
3. Анализ влияния параметров и характеристик горения на конструкцию циклонного предтопка.
4. Разработка метода плазменного воспламенения ТД ВУС в циклонном предтопке.

5. Разработка метода согласования балансовых уравнений для снижения неопределенности в процессе сжигания ТД ВУС.
6. Разработка метода технико-экономического обоснования применения плазменного розжига ТД ВУС в циклонном предтопке.
7. Выработка практических рекомендаций.

.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ И МЕТОДА КОНСТРУКТОРСКОГО РАСЧЕТА ЦИКЛОННОГО ПРЕДТОПКА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

2.1 Математическая модель процесса воспламенения и горения тонкодисперсных водоугольных суспензий в циклонном предтопке

Детальное моделирование физико-химических процессов в циклонных предтопках (ЦП) не приводит к уточнению параметров из-за неопределенности исходной информации и неоправданной (с точки зрения инженерных расчетов) сложности [63...65; 67]. Какой бы подход не применялся в исследованиях, обычно должно соблюдаться следующее требование [67], - исследования должны быть направлены, прежде всего, на разработку инженерного расчета процесса с учетом определяющих факторов. Приближенность моделирования процесса в ЦП обуславливается в первую очередь такими допущениями: квазистационарность процесса; постоянство теплоемкостей и коэффициентов теплоотдачи, значения которых соответствуют средней температуре процесса; изотермичность частиц топлива, однородность газозвеси; инертность компонентов золы; учет определяющих химических реакций взаимодействия с окислителем; одномерность потока.

Термическим сопротивлением частиц топлива можно пренебречь, так как значение критерия Фурье $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2} > 5$ и одновременно критерий Био $Bi = 0,5 \frac{a\delta}{\lambda} < 0,5$, где λ, a, τ, δ - коэффициенты теплопроводности, теплоотдачи, температуропроводности, время, диаметр частиц топлива. Конвективно-кондуктивный теплообмен от газа к частице превалирует над переносом теплоты радиацией [64; 67; 69], поэтому лучистая составляющая процесса может не учитываться, либо учитываться приближенно.

Такой подход позволяет провести аналитический анализ процесса и получить конечные выражения, пригодные для инженерных расчетов.

Рассмотрим движение топлива в виде ТД ВУС внутри ЦП. Температура стенки равна $T_{ст}$. Исходное топливо на входе характеризуется начальной температурой $T_{топ}$. По мере роста температуры происходит испарение влаги, выход летучих и образование продуктов сгорания.

Полагая, что топливо двигается внутри некоторого канала, который, в свою очередь, закручен по образующей предтопка, Рисунок 2.1, уравнение процесса можно представить в виде

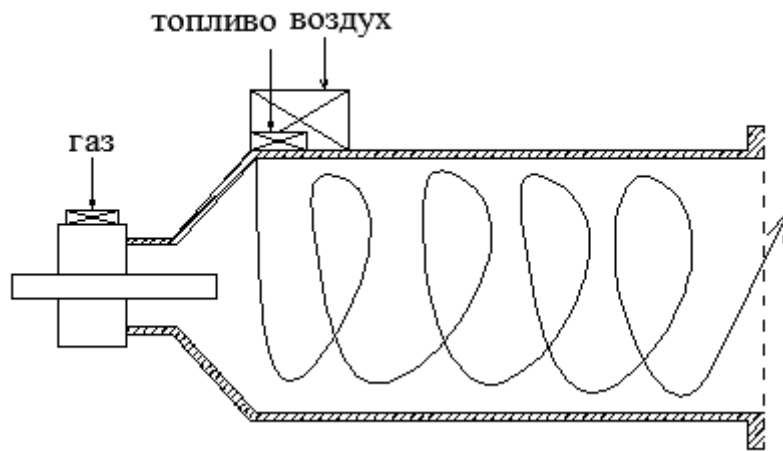


Рисунок 2.1 - Схема движения топлива в циклонном предтопке

$$\frac{dT_r}{d\tau} = -A_r T_r + F_r. \quad (2.1)$$

В этом уравнении

$$A_r = \psi_y \frac{1}{V_{см} c_{см}} \left(\frac{Nu\lambda}{d_{тр}} + \alpha_p \right) = 3BiFo\tau^{-1} \left(1 + \frac{\alpha_p \psi_y}{3BiFoc_y \tau^{-1}} \right);$$

$$F_r = \psi_y \frac{1}{V_{см} c_{см}} \left(\frac{Nu\lambda}{d_{тр}} T_y + \alpha_p T_{ст} \right) = 3BiFo\tau^{-1} \frac{c_y}{V_{см} c_{см}} T_{ст} \left(\frac{T_y}{T_{ст}} + \frac{\alpha_p \psi}{3BiFoc_y \tau^{-1}} \right),$$

где $T_{ст}$, T_y - температура станки и частиц топлива; α_p - радиационный коэффициент теплоотдачи [66; 70; 71]; $\psi_y = \frac{6}{\delta\rho_y}$ - поверхность частиц на 1 кг топлива; $d_{тр}$ - диаметр канала; ρ_y - плотность угольных частиц.

После интегрирования (с использованием преобразования Лапласа) получим

$$\begin{aligned}
 T_{\Gamma} &= T_{\text{см}} \exp\left(-3BiFo\tau^{-1} \frac{c_y}{V_{\text{см}} c_{\text{см}}}\right) + T_{\text{ст}} \left[1 - \exp\left(-3BiFo\tau^{-1} \frac{c_y}{V_{\text{см}} c_{\text{см}}}\right)\right]. \quad T_{\Gamma} = T_{\text{топ}} e^{-A\tau} + \frac{F_{\Gamma}}{A_{\Gamma}} (1 - e^{-A\tau}) = \\
 &= T_{\text{топ}} \exp\left[-3BiFo\tau^{-1} \frac{c_y}{V_{\text{см}} c_{\text{см}}} \left(\frac{\alpha_p \Psi}{3BiFoc_y \tau^{-1}}\right)\right] + \\
 &+ T_{\text{ст}} \left[\left(\frac{T_y}{T_{\text{ст}}} + \frac{\alpha_p \Psi_y}{3BiFoc_y \tau^{-1}} \middle/ \left(1 + \frac{\alpha_p \Psi_y}{3BiFoc_y \tau^{-1}}\right)\right)\right] \times \\
 &\times \left\{1 - \exp\left[-3BiFo\tau^{-1} \frac{c_y}{V_{\text{см}} c_{\text{см}}} \left(1 + \frac{\alpha_p \Psi_y}{3BiFoc_y \tau^{-1}}\right)\right]\right\}.
 \end{aligned}$$

По оценке T_{Γ} в качестве первого приближения можно принять

$$T_{\Gamma} = T_{\text{см}} \exp\left(-3BiFo\tau^{-1} \frac{c_y}{V_{\text{см}} c_{\text{см}}}\right) + T_{\text{ст}} \left[1 - \exp\left(-3BiFo_0\tau^{-1} \frac{c_y}{V_{\text{см}} c_{\text{см}}}\right)\right]. \quad (2.2)$$

где c_y , $c_{\text{см}}$ - теплоемкость частиц топлива и газовзвеси.

Процесс испарения влаги из капли топлива представлен как

$$\begin{aligned}
 \frac{dm_{\text{в}}}{d} &= \frac{d}{d\tau_w} \left(\frac{\pi\delta^3}{6} \rho_y \frac{w}{1-w}\right) = \frac{\pi\delta^3}{6} \rho_y \frac{1}{(1-w)^2} \frac{dw}{d\tau_w} = \\
 &= -\pi\lambda\delta_w \frac{T_{\text{см}} - T_{\text{топ}}}{r} Nu,
 \end{aligned}$$

где $\delta_w = \sqrt[3]{\delta^3 \frac{\rho_y}{\rho_w} \frac{w}{1-w}} = 1,25\delta \left(\frac{w}{1-w}\right)^{0,33}$.

Из этого следует, что

$$\frac{dm_{\text{в}}}{d\tau_w} = -1,25 \frac{\Psi_y}{r} \alpha (T_{\text{см}} - T_{\text{топ}}) (1-w)^{1,67} w^{0,33},$$

где α - коэффициент теплоотдачи; r - теплота испарения; τ_w - время испарения влаги. В этом процессе важно определить время окончания процесса испарения для всего количества полностью испарившейся влаги из топлива, так как практически только после этого начинается прогрев частиц.

Применяя метод Эйлера, получим приближенное решение в виде:

$$w = 1,25 \frac{\Psi_y}{\delta \cdot r} \lambda Nu (T_{\text{см}} - T_{\text{топ}}) (1 - w_0)^{1,67} w_0^{0,33} \tau_w, \quad (2.3)$$

где w_0 - начальное значение относительного содержания влаги в топливе.

Таким образом, полное время термохимических превращений топлива будет определяться суммой $\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_w$.

Уравнение для изменения температуры частицы топливом во времени, учитывающее конвективно-кондуктивный механизм переноса теплоты в газозвеси, тепловые эффекты $\sum Q_i f_i$ термохимических реакций (в том числе и при выделении летучих), с учетом принятого методического подхода имеет вид:

$$\frac{dT_y}{d\tau} = -A_y T_y + F_y. \quad (2.4)$$

В этом выражении

$$A_y = \psi_y \frac{Nu\lambda}{c_y d_{\text{тп}}} = 3BiFo\tau^{-1};$$

$$F_y = \psi_y \frac{Nu\lambda}{d_{\text{тп}}} T_r + \frac{1}{c_y} \sum Q_i f_i = 3BiFo\tau^{-1} T_r \left(1 + \frac{1}{3BiFoc_y T_r \tau^{-1}} \sum Q_i f_i \right).$$

После интегрирования получим

$$T_y = T_{\text{см}} e^{-3BiFo} + T_r \left(1 + \frac{1}{3BiFoc_y T_r \tau^{-1}} \sum Q_i f_i \right) (1 - e^{-3BiFo}), \quad (2.5)$$

где начальная температура частиц принята на уровне $T_{\text{см}}$.

При термохимических реакциях уравнение выхода компонентов (CH_4 , CO_2 , CO , H_2 , H_2O) можно представить как

$$\frac{dC_j}{d\tau} = (C_j^0 - C_j) a_j = f_j, \quad (2.6)$$

где $a_j = K_j \exp(-E_j R^{-1} T_y^{-1})$, K_j , E_j - предэкспоненциальный множитель, константа скорости выхода компонентов и соответствующая энергия активации в j -ой термохимической реакции; R - универсальная газовая постоянная; C_j^0 - начальная концентрация компонентов.

Из этого выражения находим

$$C_j = C_j^0 (1 - e^{-a_j \tau}). \quad (2.7)$$

Внутри цилиндра движется химическая реагирующая паротопливная газовзвесь. Теплогидравлические характеристики такого потока могут быть получены на основе [69] с учетом [68; 71].

Коэффициент теплопроводности для газовзвеси определяется с учетом [68,69]

$$\lambda = \lambda_r + \lambda_{TB} + \lambda_{n,T}, \quad (2.8)$$

где λ_r , $\lambda_{n,T}$, λ_{TB} - коэффициент теплопроводности, кажущейся теплопроводности, турбулентной теплопроводности.

Коэффициент турбулентной теплопроводности

$$\lambda_{TB} = 0,9l^2 D_1 \sqrt{\xi} \frac{c_{cm} \rho_{ct} w_r}{0,5d \cdot Pr_{TB}} (0,5d/y)^{1-0,8\sqrt{\xi}}. \quad (2.9)$$

В этой формуле $y = 0,25d$; $c_{cm} = 2,3 \left(\frac{T_r}{273} \right)^{0,1}$; $l = 0,08d (2y/d)^{0,8}$ - длина пути смещения,

$D_1 = [1 - \exp(-\eta/26)]^2$ - демпфирующий фактор; $\eta = y \sqrt{\sigma_{ct} / \rho_{ct} v_{ct}^{-1}}$ - безразмерная координата (подсчитывается при T_{ct}); $\sigma_{ct} = \xi \rho_{ct} w^2 / 8$ - касательное напряжение; $\xi = (1,821g Re - 1,64)^2$; $Pr_{TB} = 1,2 - 0,45 \exp(-1,5 \cdot 10^{-5} Re)$ - Число Прандтля; $w_r = w(1 - 0,845/\lg Re)^{-1}$ - скорость на оси Цилиндра.

Кажущийся коэффициент теплопроводности, характеризующий конвективный перенос теплоты частицами топлива

$$\lambda_{n,T} = (\xi_{n,T} / \xi_0) (c_y \rho_{ct} v_{эф} / \varphi_g), \quad (2.10)$$

где $\xi_{n,T} / \xi_0$ - относительное гидравлическое сопротивление газовзвеси,

$$\xi_{n,T} / \xi_0 = 0,28 \left(\frac{d}{\delta} \right)^{0,4} K \left(\frac{w / \bar{g}_B}{w^0 / \bar{g}_B^0} \right)^{0,28} \exp \left[-2 \frac{w}{\bar{g}_B} \left(\frac{d}{\delta} \right)^{-0,8} \right], \quad (2.11)$$

$$c_y = 1,09 \left(\frac{T_y}{273} \right)^{0,55}, \quad c_y = 2,73 \left(\frac{d}{\delta} \right)^{0,54}, \quad c_y = \rho_0 \left(\frac{273}{T_{ct}} \right).$$

Здесь w - скорость газа; \bar{g}_B - скорость витания частиц топлива; K - расходная масса концентрации частиц; φ_g - фактор скоростного скольжения.

Величина ξ_0 определяется законом Блазиуса

$$\xi_0 = 0,3164 \text{Re}^{-0,25}.$$

Фактор скоростного скольжения

$$\varphi_g = 0,09 \left(\frac{w}{g_B} \right) \left(\frac{d}{\delta} \right)^m K^c,$$

где $n = 0,0937 + 1,1 \left(\frac{d_{\text{тр}}}{\delta} \right)^{-0,5} + 0,333 \exp \left(-0,48 \frac{w}{g_B} \right)$; $m = 0,467 \left(\frac{d}{\delta} \right)^{-0,1}$;

$$c = 0,0234 \left(\frac{g_B^2}{g\delta} \right)^{0,26} \exp(-3,5 \cdot 10^{-5} \text{Re}); \text{Re} = \frac{wd}{v} - \text{критерий Рейнольдса};$$

$$\nu = 24,6 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T_r}{273} \right)^{1,73} - \text{вязкость газа}; \lambda_r = 7,49 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T_r}{273} \right)^{0,86} - \text{теплопроводность газа}.$$

Конвективный теплообмен в предтопке описывается уравнением

$$Nu = 0,48(1 + 0,3K)(d/L)^{0,89} \text{Re}^{0,526(d/L)^{-0,081}}, \quad (2.12)$$

где L - длина канала преобразований топлива.

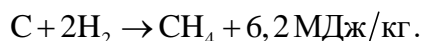
Зависимости справедливы для параметров: $\text{Re} \leq 20 \cdot 10^3$; $K \leq 8$; $\delta = 0,0001 \dots 0,0012$ м, при этом параметры определяются по среднеарифметическим расходам фаз по составу газа.

Следует отметить, что получения универсальных, обобщающих кинетических зависимостей пиролиза и горения разных видов топлив, в том числе и ТД ВУС на основе углей, затруднено и справедливо только для конкретных условий реагирования.

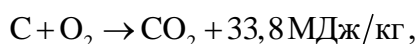
Это связано с большим разнообразием свойств и сложностью строения топлив. Даже химически чистые, то есть состоящие практически из одного углерода, материалы существенно различаются по кристаллохимическому строению, типу, размеру пор, характеру их распределения и т.д. Более того, большинство топлив в процессе реагирования изменяют свои свойства в широких пределах из-за изменения величины реакционной поверхности, неоднородности, как качественного состава вещества, так и его структуры, нестационарности процесса и т.п. В общей сложности механизм физико-химических преобразований насчитывает более 50 реакций.

С другой стороны, для получения математической модели с приемлемой для инженерных расчетов точностью может оказаться достаточным учет определяющих процессы пиролиза и горения реакций. Эти реакции показаны ниже.

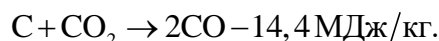
Выход летучего метана определяется взаимодействием углерода угля с освободившимся в результате нагрева водородом угля:



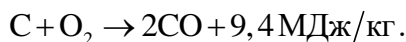
Выход летучей двуокиси углерода определяется горением углерода при взаимодействии с освободившимся кислородом угля:



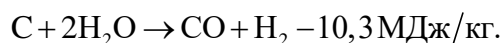
и в дальнейшем процессами затратами CO_2 на частичную углекислотную газификацию углерода с образованием CO :



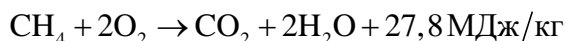
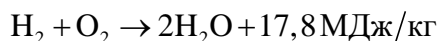
Кроме того, выход летучей окиси углерода определяется окислением углерода угля кислородом, с учетом предыдущих затрат кислорода на реакцию горения:



Также, следует учитывать испарение влаги и, в связи с этим, частичную паровую газификацию углерода полукокса:



Горение углерода и образовавшихся CO , H_2 и CH_4 обусловлено наличием кислорода в первичном и вторичном (при необходимости) воздухе и проходит по реакциям



Кинетические параметры реакций представлены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Кинетические параметры реакции [66; 72-76]

Реакции		k_0, c^{-1}	$E, \text{кДж/кмоль}$
Выход влаги из топлива	$\text{H}_2\text{O}^{\text{топл}} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	8×10^{13}	215×10^3
Выход топливного CO	$\text{CO}^{\text{топл}} \rightarrow \text{CO}$	2×10^{12}	186×10^3
Выход топливного CO ₂	$\text{CO}_2^{\text{топл}} \rightarrow \text{CO}_2$	2×10^{11}	137×10^3
Выход метана из топлива	$\text{CH}_4^{\text{топл}} \rightarrow \text{CH}_4$	$1,6 \times 10^{14}$	216×10^3
Паровая газификация полукокса	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	2×10^{11}	255×10^3
Углекислая газификация полукокса	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	3×10^3	350×10^3
Горение угля		$1,35 \times 10^{18}$	84×10^3
Горение CH ₄			125×10^3

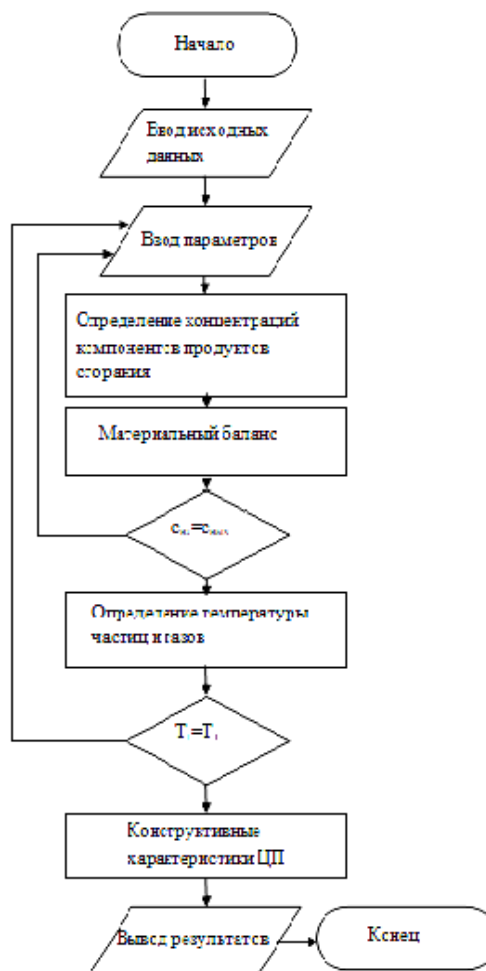


Рисунок - 2.2 Алгоритм инженерных расчетов ЦП

Алгоритм расчетов можно представить следующим образом – сначала определяют кинетические характеристики процессов испарения влаги из ТД ВУС при движении в предтопке в виде некоторой струи, закрученной по образующей циклона так, чтобы фронт пламени с линейной скоростью двигался в сторону топочного пространства. Затем определяют температуры топливных частиц и смеси продуктов сгорания. На последнем этапе расчетов определяют конструктивные характеристики циклонного предтопка (Рисунок 2.2).

Для расчетов, с использованием указанного алгоритма, разработана программа, скриншот которой, показан на Рисунке 2.3.

		C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Нижшая рабочая теплота сгорания, QнрВУС, МДж/кг		21,68													
2	Оцп.		0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	3	4	6	7	8	9	10	
3	Расход ТД ВУС, G		0,0023	0,0046	0,0092	0,0231	0,0461	0,0922	0,1384	0,1845	0,2767	0,3228	0,3690	0,4151	0,4612	
4	t (время, с)		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,5	2	3	
5	Диаметр трубчатой зоны горения, d	w=5,м	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	
6		w=10,м	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
7		w=15,м	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	
8		w=20,м	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
9		w=25,м	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
10		w=30,м	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
11	Критерий Re		27436,2769	27436,2795	27436,282	27436,2845	27436,2869	27436,2893	27436,2916	27436,2938	27436,296	27436,2981	27436,3081	27436,3168	27436,352	
12	Критерий Pr								0,552							
13	Скорость смеси на оси потока, w		37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	
14	L		2	4	7	9	11	13	16	18	20	22	33	44	111	
15	Критерий Nu		14,0630	10,7526	9,2758	8,3887	7,7790	7,3261	6,9721	6,6852	6,4465	6,2436	5,5483	5,1275	4,1031	
16	Критерий Fo		39,5637	30,2506	26,0957	23,6000	21,8848	20,6107	19,6147	18,8077	18,1360	17,5653	15,6091	14,4253	11,5432	
17	Критерий Fo		0,00297	0,00227	0,00196	0,00177	0,00164	0,00155	0,00147	0,00141	0,00136	0,00132	0,00117	0,00108	0,00087	
18	Критерий Fo		5,8480	11,6959	17,5439	23,3918	29,2398	35,0877	40,9357	46,7836	52,6316	58,4795	87,7193	116,9591	292,3977	
19	Время выхода влаги, tw		1,5	1,9	2,2	2,5	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,3	3,7	4,0	5,0	
20	Длина зоны испарения, Lw		5	8	8	9	16	17	18	19	20	20	23	25	31	
21	а		0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	
22	Длина канала горения на одном витке, Lвитка		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
23	Число витков предтопка, n		1	3	4	6	7	8	10	11	13	14	21	28	71	
24	Линейная длина предтопка, Lл		2	3	5	6	8	9	11	12	14	15	23	30	76	
25	Число витков зоны испарения, nисп		4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	0	
26	Линейная длина зоны испарения, Lисп		4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	0	
27	Температура частицы							1073 К								
28	Время		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,5	2	3	

Рисунок 2.3 - Скриншот программы расчетов

Таким образом, представлена приближенная физическая модель процесса воспламенения и горения ТД ВУС. При этом сначала, по мере движения топлива в среде окислителя (воздуха) происходит испарение влаги, а затем, воспламенение и горение топливных частиц и продуктов пиролиза.

2.2 Расчет кинетики воспламенения и горения тонкодисперсных водоугольных суспензий

К расчету принято ТД ВУС (среднее качество) подготовленное на основе Кузнецкого угля марки ОС с соотношением твердой и жидкой фазы по массе 0,6/0,4 (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Физико-химическая характеристика исходного угля [77].

$Q_H^p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$W^p, \%$	$A^c, \%$	$S_{ог}^c, \%$	$S^g, \%$	$C^g, \%$	$H^g, \%$	$N^g, \%$	$O^g, \%$	$V^g, \%$
21770	7	30	0,9	1,4	90,0	4,7	2,1	1,8	20,0
$Q_H^c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$W_{сух}^p, \%$	$A^p, \%$	-	$S^p, \%$	$C^p, \%$	$H^p, \%$	$N^p, \%$	$O^p, \%$	-
22423	7	29,1	-	1,4	90,0	4,7	2,1	1,8	-
$Q_H^c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	-	-	-	-	$C^c, \%$	$H^c, \%$	$N^c, \%$	$O^c, \%$	-
22423					63	3,29	1,47	1,26	-

Коэффициент пересчета на рабочую массу:

$$M^c = M^p \frac{100}{100 - W^p},$$

$W_{сух}^p = 7\%$ - нормативная влага при работе систем пылеприготовления; Q_H^c и A^p - определены при коэффициенте пересчета регулируемом нормативным методом.

$$Q_H^c = Q_H^p \cdot \frac{100}{100 - W^p},$$

$$A^p = A^c \cdot \frac{100 - W^p}{100}.$$

Пересчет с горючей массы на сухую:

$$M^c = M^g \frac{100 - A^c}{100}.$$

Содержание влаги 40%, следовательно $W^p = 0,4$.

Состав топлива на рабочую массу для ТД ВУС:

Уравнение материального баланса:

$$C^c + H^c + N^c + S^c + A^c = 1$$

$$M^p = M^c \cdot \frac{1 - W^p}{1} = M^c \cdot 0,6$$

$$C^p = 0,378$$

$$H^p = 0,019$$

$$O^p = 0,007$$

$$N^p = 0,012$$

$$O_2 = c_{O_2} - O^p, \text{ кг/кг.}$$

Пересчет с горючей массы на сухую

$$M^c = M^r \cdot \frac{100 - A^c}{100}.$$

Содержание влаги 40%, следовательно $W^p = 0,4$. Состав топлива на рабочую массу для ТД ВУС:

Уравнение материального баланса

$$C^c + H^c + N^c + S^c + A^c = 1$$

$$M^p = M^c \cdot \frac{1 - W^p}{1} = M^c \cdot 0,6$$

$$C^p = 0,378$$

$$H^p = 0,019$$

$$O^p = 0,07$$

$$N^p = 0,012$$

Определение стехиометрического количества O_2 для окисления углерода и водорода при одностадийных процессах горения C, CH_4 и H_2 определяют по выходу CO_2 и H_2O из углерода и водорода топлива по рабочей массе.

$$c_{O_2} = \frac{\mu_{O_2}}{\mu_C} \cdot C^p + \frac{\mu_{O_2}}{2\mu_{H_2}} \cdot H^p$$

Количество кислорода, необходимого для обеспечения стехиометрического сжигания подаваемого с воздухом

Исходные данные для расчетов

Температура стенки: $T_{ст}$; температура горения: T_r ; температура смеси: T_r ; температура частицы T_q .

Для расчетов принять: $T_r = T_q = T_{ст}$

Расчет выхода продуктов сгорания на 1 кг ТД ВУС (Рисунок 2.4)

1. Выход летучих CH_4 кг/кг ТД ВУС

$$c_{CH_4}^л = \frac{\mu_{CH_4}}{2\mu_{H_2}} \cdot H^p \left(1 - e^{-\tau k_{CH_4} e^{\frac{E_{CH_4}}{RT_q}}} \right)$$

2. Выход летучего CO_2 и при окислении углерода кислородом, кг/кг

$$c_{CO_2}^л = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} \cdot (O^p + O_2) \left(1 - e^{-\tau k_{CO_2} e^{\frac{E_{CO_2}}{RT_q}}} \right)$$

3. Выход летучего CO и при окислении углерода кислородом, кг/кг

$$c_{CO}^л = \frac{\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} \cdot \left(O^p + O_2 - \frac{\mu_{O_2}}{\mu_{CO_2}} c_{CO_2}^л \right) \left(1 - e^{-\tau k_{CO} e^{\frac{E_{CO}}{RT_q}}} \right)$$

4. Выход летучего H_2

$$c_{H_2}^л = H^p - 0,25c_{CH_4}$$

5. Выход летучих в условиях окисления кислородом, кг/кг

$$c_{\Sigma}^л = c_{CO_2}^л + c_{CO}^л + c_{CH_4}^л + c_{H_2}^л$$

6. Выход CO при паровой газификации определяется с учетом затрат углерода на горение

$$c_{CO}^н = \left\{ \frac{\mu_{CO}}{\mu_C} \left[C^p - \left(\frac{\mu_C}{\mu_{CH_4}} \cdot c_{CH_4}^л + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} \cdot c_{CO_2}^л + \frac{\mu_C}{\mu_{CO}} \cdot c_{CO}^л \right) \right] - \frac{\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} \left(O^p + O_2 - \frac{\mu_{O_2}}{\mu_{CO_2}} c_{CO_2}^л - \frac{\mu_{O_2}}{2\mu_{CO}} c_{CO}^л \right) \right\} \left(1 - e^{-\tau k_{CO}^н e^{\frac{E_{CO}^н}{RT_q}}} \right)$$

7. Выход CO при углекислой газификации определяется с учетом затрат углерода на горение и на паровую газификацию

$$c_{CO}^n = \left\{ \frac{\mu_{CO}}{\mu_C} \left[C^p - \left(\frac{\mu_C}{\mu_{CH_4}} \cdot c_{CH_4}^l + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} \cdot c_{CO_2}^l + \frac{\mu_C}{\mu_{CO}} \cdot c_{CO}^l \right) \right] - \frac{\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} \left(O^p + O_2 - \frac{\mu_{O_2}}{\mu_{CO_2}} \cdot c_{CO_2}^l - \frac{\mu_{O_2}}{2\mu_{CO}} \cdot c_{CO}^l \right) - c_{CO}^n \right\} \left(1 - e^{-\tau k_{CO_2}^{CO_2} e^{\frac{E_{CO_2}^{CO_2}}{RT_4}}} \right)$$

8. В выражении (6) и (7) в данном примере выход $CO \neq 0$ из-за того, что весь углерод преобразован в CO_2 по реакции (2). Отражается в формулах (6) и (7) слагаемым $\frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} \cdot c_{CO_2}^l$, при этом выполняется условие

$$\frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} \cdot c_{CO_2}^l > C^p.$$

9. Выход углерода полукоксового остатка

$$c_{\kappa} = C^p - \frac{\mu_C}{\mu_{CO}} (C_{CO}^l - C_{CO}^n) - \frac{\mu_C}{\mu_{CH_4}} c_{CH_4}^l - \frac{\mu_C}{2\mu_{CO}} c_{CO_2}^l - \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} c_{CO_2}^l$$

Если выполняется условие, что $\frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} \cdot c_{CO_2}^l > C^p$, то $c_{\kappa} = 0$.

10. Выход водяного пара

$$c_w = W^p \left(1 - e^{-\tau k_{H_2O}^{H_2O} e^{\frac{E_{H_2O}}{RT_4}}} \right)$$

11. Количество пара, оставшегося после паровой газификации

$$c_{H_2O} = c_w - \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{CO}} \cdot c_{CO}^n$$

12. Количество водорода, полученного при первичной паровой газификации

$$c_{H_2O} = \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{CO}} \cdot c_{CO}^n$$

13. Горение продуктов пиролиза

- метана

$$c_{CO_2}^{CH_4} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} \left(O^p + O_2 - \frac{\mu_{O_2}}{\mu_{CO_2}} c_{CO_2}^l - \frac{\mu_{O_2}}{2\mu_{CO}} c_{CO}^l \right) \left(1 - e^{-\tau k_{CO_2}^{CH_4} e^{\frac{E_{CO_2}^{CH_4}}{RT_4}}} \right)$$

- окиси углерода

$$c_{\text{CO}_2}^{\text{CO}} = \frac{\mu_{\text{CO}_2}}{\mu_{\text{O}_2}} \left(\text{O}^{\text{P}} + \text{O}_2 - \frac{\mu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{CO}_2}} c_{\text{CO}_2}^{\text{л}} - \frac{\mu_{\text{O}_2}}{2\mu_{\text{CO}}} c_{\text{CO}}^{\text{л}} - \frac{\mu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{CO}_2}} \right) \left(1 - e^{-\tau k_{\text{CO}_2}^{\text{CO}} e^{\frac{E_{\text{CO}_2}^{\text{CO}}}{RT_1}}} \right)$$

14. Состав продуктов горения, кг/кг, ТД ВУС.

Определение N_2 в продуктах горения

$$c_{\text{N}_2} = c_{\text{O}_2} \cdot \frac{78}{20} \cdot \frac{\mu_{\text{N}_2}}{\mu_{\text{O}_2}} + \text{N}^{\text{P}}$$

15. Теплоемкость продуктов сгорания

$$c_{\text{см}} = \frac{c_{\text{CO}_2} \cdot (c_{\text{CO}_2}^{\text{л}} + c_{\text{CO}_2}^{\text{CH}_4} + c_{\text{CO}_2}^{\text{CO}}) + c_{\text{кокс}} \cdot c_{\text{к}} + c_{\text{п}} (c_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2}) + c_{\text{зола}} \cdot c_{\text{А}} + c_{\text{N}} \cdot \text{N}_2}{\sum c_i}$$

16. Плотность продуктов сгорания (без учета взвешенных частиц), $\text{кг}/\text{м}^3$

$$\rho_0 = \frac{\rho_{\text{CO}_2} (c_{\text{CO}_2}^{\text{л}} + c_{\text{CO}_2}^{\text{CH}_4} + c_{\text{CO}_2}^{\text{CO}}) + \rho_{\text{кокс}} \cdot c_{\text{к}} + \rho_{\text{п}} (c_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2}) + \rho_{\text{N}} \text{N}_2}{\sum c_i - c_{\text{А}}}$$

где $\rho_{\text{п}} = f(t, p)$, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$\rho_{\text{см}} = \rho_0 \left(\frac{273}{T_{\text{T}}} \right)$$

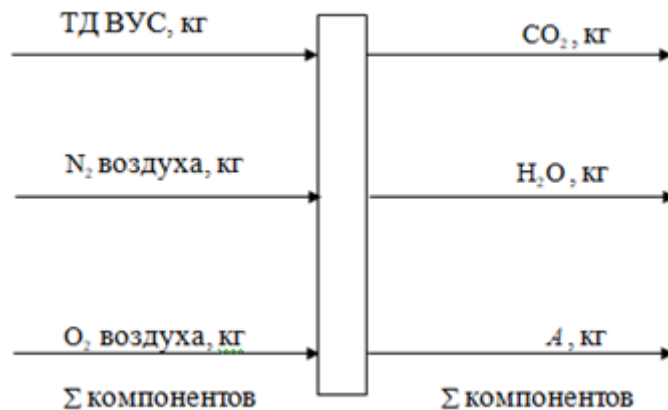


Рисунок 2.4 - Материальный баланс горения ТД ВУС в циклонном предтопке (баланс не учитывает наличие примесей в воздухе)

17. Объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$V_{\text{см}} = \frac{\sum c_i - c_A}{\rho_{\text{см}}}$$

18. Объем пара в продуктах сгорания, м³/кг

$$V_{\text{п}} = \frac{c_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2}}{\rho_{\text{п}}}$$

19. Диаметр трубчатой зоны (канала) горения, м

$$d = \sqrt{\frac{V_{\text{см}}}{\frac{\pi}{4} \cdot \omega} \cdot G}$$

20. Критерий Рейнольдса

$$\text{Re}_{\text{см}} = \frac{\omega \cdot d}{v_{\text{см}}}$$

где $v_{\text{см}} = f(T_{\text{T}})$.

21. Число Прандтля

$$\text{Pr}_{\text{см}} = \frac{c_p}{\lambda_{T_{\text{T}}}}$$

22. Скорость смеси (продуктов сгорания) на оси потока

$$\omega_{\text{см}} = \frac{\omega}{1 - 0,845 \cdot \frac{1}{\lg \text{Re}_{\text{см}}}}$$

23. Критерий Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,48 \cdot (1 - k \cdot 0,3) \left(\frac{d}{L}\right)^{0,89} \cdot \text{Re}^{0,526 \left(\frac{d}{L}\right)^{-0,081}}$$

где $L = \ell_{\text{гор.}} \cdot \omega_{\text{см}} \cdot \tau$ - характерная длина; $\ell_{\text{гор.}} = 0,6$ - поправка на длину факела при горении ТД ВУС по сравнению с пылеугольным топливом; $k = \frac{1}{c_{\text{H}_2\text{O}}}$ - относительное гидравлическое сопротивление потока, определяемое по содержанию пара.

24. Коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении продуктов сгорания

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d}$$

$$\lambda = 1,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

25. Критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{2 \cdot \lambda_{\text{ч}}}$$

где δ - характерный размер частицы, м; $\lambda_{\text{ч}}$ - теплопроводность частицы, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

26. Критерий Фурье

$$Fo = \frac{4 \cdot \lambda_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}} \cdot \delta^2 \cdot c_{\text{ч}}} \cdot \tau$$

Если $Bi \ll 0,5$, а $Fo \gg 5$ термическим сопротивлением частицы можно пренебречь.

27. Время испарения влаги из капли топлива

$$\tau_w = \frac{W^p}{1,25 \cdot w_{\text{внт.}} \cdot \frac{6}{\rho_{\text{ч}} \cdot \delta} \cdot \alpha \cdot \frac{T_{\text{ст}} - T_{\text{топ}}}{h_n} \cdot (1 - W^p)^{1,67} \cdot (W^p)^{0,33}}$$

где $h_n = f(T; p)$; $w_{\text{внт.}} = 1,25$ - поправка для скорости витания частиц;

28. Длина зоны испарения при организации горения в трубчатом канале, м

$$L_w = \frac{V_{\text{п}} \cdot G}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2} \cdot \tau_w$$

29. Полная длина канала, м

$$L_{\text{полн}} = L + L_w$$

30. Тепловые эффекты термохимических реакций

$$\begin{aligned} \sum Q_i f_i = & Q_{\text{CO}_2}^{\text{л}} \cdot c_{\text{CO}_2}^{\text{л}} \cdot \frac{\mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{CO}_2}} + Q_{\text{CH}_4}^{\text{л}} \cdot c_{\text{CH}_4}^{\text{л}} \cdot \frac{\mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{CH}_4}} + Q_{\text{CO}}^{\text{л}} \cdot c_{\text{CO}}^{\text{л}} \cdot \frac{\mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{CO}}} + Q_{\text{CO}}^{\text{н}} \cdot c_{\text{CO}}^{\text{н}} \cdot \frac{\mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{CO}}} + \\ & + Q_{\text{CO}}^{\text{CO}_2} \cdot c_{\text{CO}_2}^{\text{CO}_2} \cdot \frac{\mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{CO}}} + Q_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \end{aligned}$$

Здесь $Q_i, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ - термохимические эффекты реакций; $Q_{\text{H}_2\text{O}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ - затраты энергии на испарение.

31. Температура частицы топлива

$$T_{\text{ч.ВУС}} = T_{\text{топ}} e^{-3Bi \cdot Fo} + T_{\text{г}} \left(1 + \frac{1}{3Bi \cdot Fo \cdot T_{\text{г}} \cdot \tau^{-1} \cdot c_{\text{ч.ВУС}}} \cdot \sum Q_i f_i \right) (1 - e^{-3Bi \cdot Fo})$$

32. Температура смеси продуктов сгорания

$$T_{\text{см}} = T_{\text{топ}} \cdot e^{-3Bi \cdot Fo \cdot \frac{c_{\text{ВУС}}}{V_{\text{см}} \cdot c_{\text{см}}}} \left(1 + \frac{\alpha_p \cdot \frac{6}{\rho_{\text{ВУС}} \cdot \delta}}{3Bi \cdot Fo \cdot \tau^{-1} \cdot c_{\text{ВУС}}} \right) + T_{\text{ст}} \cdot \frac{T_{\text{ВУС}} + \frac{\alpha_p \cdot \frac{6}{\rho_{\text{ВУС}} \cdot \delta}}{3Bi \cdot Fo \cdot \tau^{-1} \cdot c_{\text{ВУС}}}}{1 + \frac{\alpha_p \cdot \frac{6}{\rho_{\text{ВУС}} \cdot \delta}}{3Bi \cdot Fo \cdot \tau^{-1} \cdot c_{\text{ВУС}}}} \times \left(1 - e^{-3Bi \cdot Fo \cdot \frac{c_{\text{ВУС}}}{V_{\text{см}} \cdot c_{\text{см}}}} \left(1 + \frac{\alpha_p \cdot \frac{6}{\rho_{\text{ВУС}} \cdot \delta}}{3Bi \cdot Fo \cdot \tau^{-1} \cdot c_{\text{ВУС}}} \right) \right)$$

Здесь $\alpha_p = 0,4 \cdot \frac{T_{\text{г}}}{1170} \cdot 1000, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ - радиационный коэффициент теплоотдачи.

2.3 Метод конструкторского расчета циклонного предтопка

На Рисунке 2.5 представлена схема циклонного предтопка.

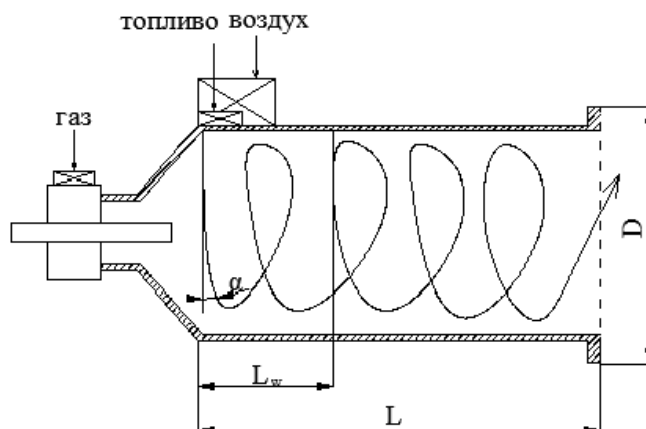


Рисунок 2.5 - Схема циклонного предтопка

1. Низшая рабочая теплота сгорания ТД ВУС, $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$

$$Q_{\text{н}}^{\text{рВУС}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \frac{100 - W^{\text{р}}}{100}$$

2. Расход ТД ВУС на циклонный предтопок при заданной тепловой мощности, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

$$G = \frac{Q_{\text{II,II}}}{Q_{\text{H}}^{\text{pBUC}}}$$

3. Диаметр трубчатой зоны горения

$$d = \sqrt{\frac{V_{\text{CM}} \cdot G}{\frac{\pi}{4} \cdot \omega}}$$

4. Критерий Рейнольдса и число Прандтля

$$\text{Re}_{\text{CM}} = \frac{\omega \cdot d}{v_{\text{CM}}}$$

$$\text{Pr}_{\text{CM}} = \frac{c_p}{\lambda_{\text{T}}}$$

5. Скорость смеси на оси потока

$$\omega_{\text{CM}} = \frac{\omega}{1 - 0,845 \cdot \frac{1}{\lg \text{Re}_{\text{CM}}}}$$

6. Критерий Нюссельта

$$\text{Nu} = 0,48 \cdot (1 - k \cdot 0,3) \left(\frac{d}{L} \right)^{0,89} \cdot \text{Re}^{0,526 \left(\frac{d}{L} \right)^{-0,081}}$$

7. Коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d}$$

8. Критерий Био

$$\text{Bi} = \frac{\alpha \cdot \delta}{2 \cdot \lambda_{\text{ч}}}$$

9. Критерий Фурье

$$\text{Fo} = \frac{a \cdot \tau}{\delta^2} = \frac{\frac{\lambda}{c_p} \cdot \tau}{\delta^2} = \frac{\lambda \tau}{c_p \delta^2}$$

где $\lambda, \frac{\text{кВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ - теплопроводность частицы; $c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ - теплоемкость частицы; $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ -

плотность твердой фазы; $\delta, \text{м}$ - размер частицы.

10. Время выхода влаги

$$\tau_w = \frac{W^p}{1,25 \cdot w_{\text{витк.}} \cdot \frac{6}{\rho_{\text{ч}} \cdot \delta} \cdot \alpha \cdot \frac{T_{\text{ст}} - T_{\text{топ}}}{h_{\text{п}}} \cdot (1 - W^p)^{1,67} \cdot (W^p)^{0,33}}$$

11. Длина зоны испарения, м

$$L_w = \frac{V_{\text{п}} \cdot G}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2} \cdot \tau_w$$

12. Длина канала горения на одном витке

$$L_{\text{витка}} = \pi \cdot D \cdot \left(\frac{\sqrt{(D \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2 + D^2}}{D} \right)$$

где $\alpha = \frac{0,5d}{D}$; D - принять по условиям крутки потока.

13. Число витков предтопка

$$n = \frac{L_{\text{полн}}}{L_{\text{витка}}}$$

14. Линейная витка предтопка

$$L_{\text{л}} = 2 \cdot d \cdot n$$

15. Число витков зоны испарения

$$n_{\text{исп}} = \frac{L_w}{L_{\text{витка}}}$$

16. Линейная длина зоны испарения

$$L_{\text{исп}} = 2 \cdot d \cdot n_{\text{исп}}$$

2.4 Анализ влияния характеристик горения на конструкцию циклонного предтопка

2.4.1 Кинетические характеристики горения

На основе разработанной кинетической методики воспламенения горения тонко-дисперсного водоугольного топлива получены расчетные зависимости выхода газообразных продуктов, Рисунок 2.6.

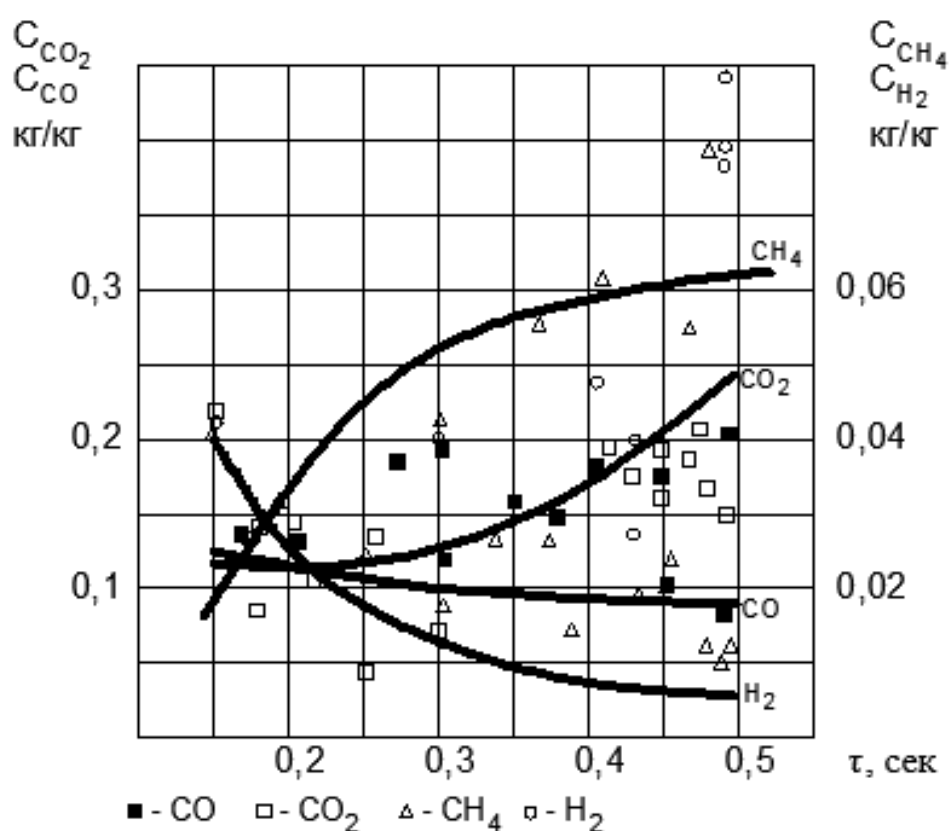


Рисунок 2.6 - Сравнение результатов расчетов с экспериментальными и расчетными данными пиролиза углеродсодержащих топлив [78-83]

Сравнивая, полученные результаты с известными экспериментальными [78-82] и расчетными [83] данными других авторов, можно видеть, что данные экспериментов имеют значительные расхождения, как по количеству, так и по времени выхода газообразных продуктов Рисунок 2.7-2.9.

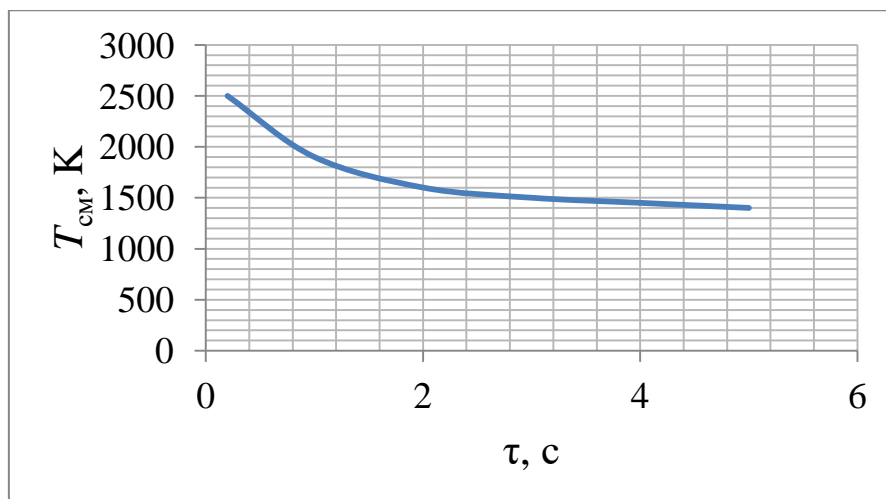


Рисунок 2.7 - Изменения T_{cm} в зависимости от времени (τ) реагирования

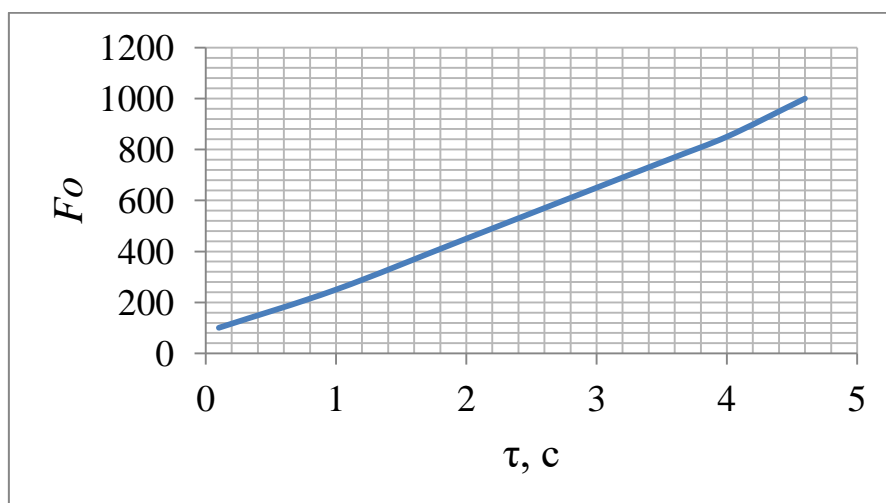


Рисунок 2.8 - Изменения Fo в зависимости от времени (τ) реагирования

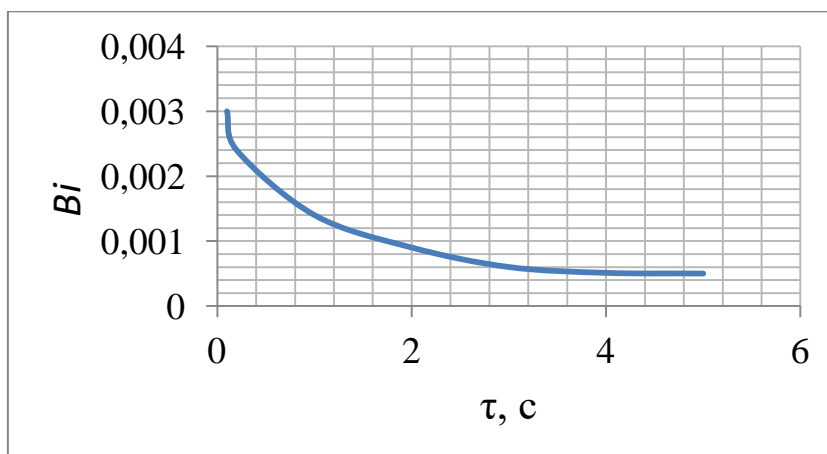


Рисунок 2.9 - Изменения Bi в зависимости от времени (τ) реагирования

Это связано со сложностью получения достоверных данных по константам скорости (k_0) и энергиям активации (E) протекающих реакций в конкретных условиях. Эти константы зависят от условий проведения эксперимента и, практически никогда, не повторяются. Вместе с тем, можно видеть, что разработанная модель показывает выход продуктов (показано линиями) пиролиза на сопоставимом уровне с известными данными при более быстром выгорании водорода (Рисунок 2.6). Такое быстрое выгорание водорода на начальной стадии (0...0,3 с) способствует автотермичности процесса воспламенения в циклонном предтопке. Критерий $Bi \ll 0,5$ на всем протяжении процесса горения, (Рисунок 2.9), а критерий $Fo > 5$, что подтверждает предположение о пренебрежении теплопроводностью частицы твердой фазы топлива при моделировании. Температура смеси ($T_{см}$) на начальном участке может быть обеспечена на уровне 1800-2500 К и, по мере выгорания топлива, снижается до ~ 1200 К, (Рисунок 2.7). На время выхода влаги (τ_w) в общем случае влияют физические характеристики топлива и параметры процесса. Для исследуемого топлива на основе кузнецкого угля, с размером впрыскиваемой в предтопок частицы $\delta = 30$ мкм и содержанием влаги $W = 40$ % и при отсутствии предварительного подогрева топлива ($T_{вх}^{топ} \approx 300$ К) определяющей τ_w будет температура стенки предтопка ($T_{ст}$), Рисунок 2.10.

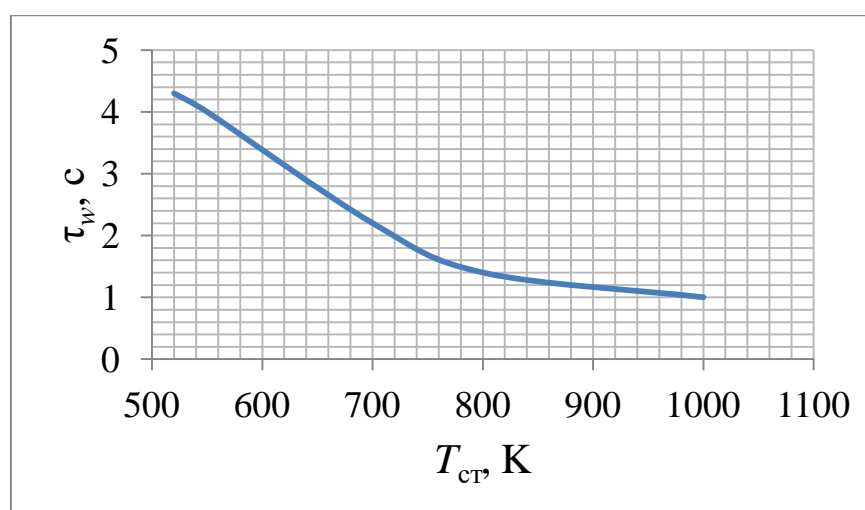


Рисунок 2.10 - Зависимость времени испарения от температуры стенки

Можно видеть, что при организации процессов в предтопках с температурой стенки на уровне 500-700 К (что характерно для охлажденных предтопков, с развитой системой отвода теплоты). Время испарения составляет 2-5 с. Для футерованных высоконапряженных предтопков (800-1000 К) время выхода влаги составляет 1,0-1,6 с, Рисунок 2.10.

2.4.2 Энергетические характеристики предтопка

Зависимость тепловой мощности предтопка (Q) от расхода топлива (G) прямопропорциональна, Рисунок 2.11.

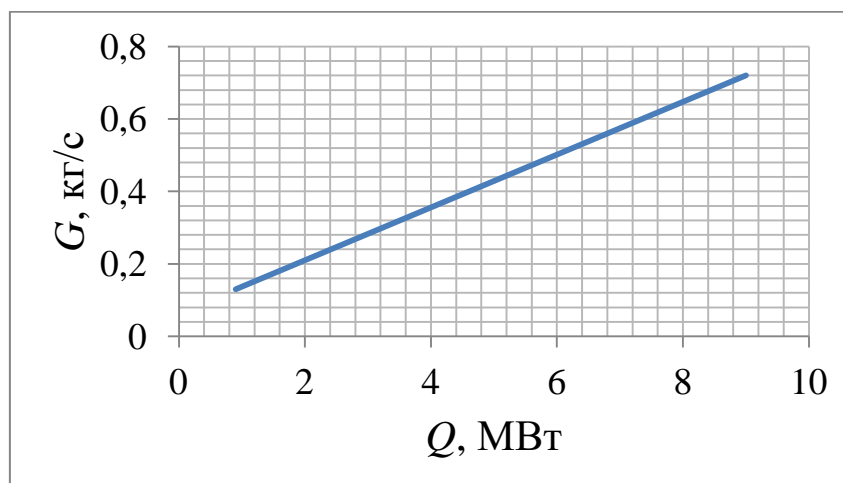


Рисунок 2.11 - Расход ТД ВУС в зависимости от тепловой мощности предтопка

В свою очередь расход топлива обуславливает все конструктивные характеристики предтопка, так как эта величина определяет выход продуктов сгорания и характерные скорости движения сред и размеры.

Выше отмечалось, что модель предтопка представлена следующим образом. Топливо в раскаленном виде поступает в некоторый канал с характерным размером (d), продвигаясь по которому претерпевает изменения (пиролиз, воспламенение, горение). Собственно канал имеет участок испарения влаги (L_w) и полную длину (L) и закручен в виде спирали с длиной витка ($L_{\text{витка}}$) по

образующей цилиндра с диаметром (D), который имеет линейный размер ($L_{\text{ц}}$) и является собственно предтопком. Спиралевидное движение потока обеспечивает послойное перемешивание среды в витках и между ними, что обуславливает конвективно-кондуктивный перенос механизма теплоты. Выше отмечалось, что предтопок в общем случае может иметь теплоотвод, например, за счет организации по его образующей поверхностей нагрева или быть высокотемпературным за счет футеровки.

Взаимное влияние тепловой мощности (Q) предтопка и скорости движения потока (ω) на характерный размер (d) канала горения показывает, что в диапазоне технически достижимых скоростей $\omega = 20-50$ м/с диаметр d может составлять 100-350 мм для мощностей 2-10 МВт.

В свою очередь, характерный участок испарения в зависимости от реализуемой скорости потока (ω) может составлять 2,5-200 м (Рисунок 2.13).

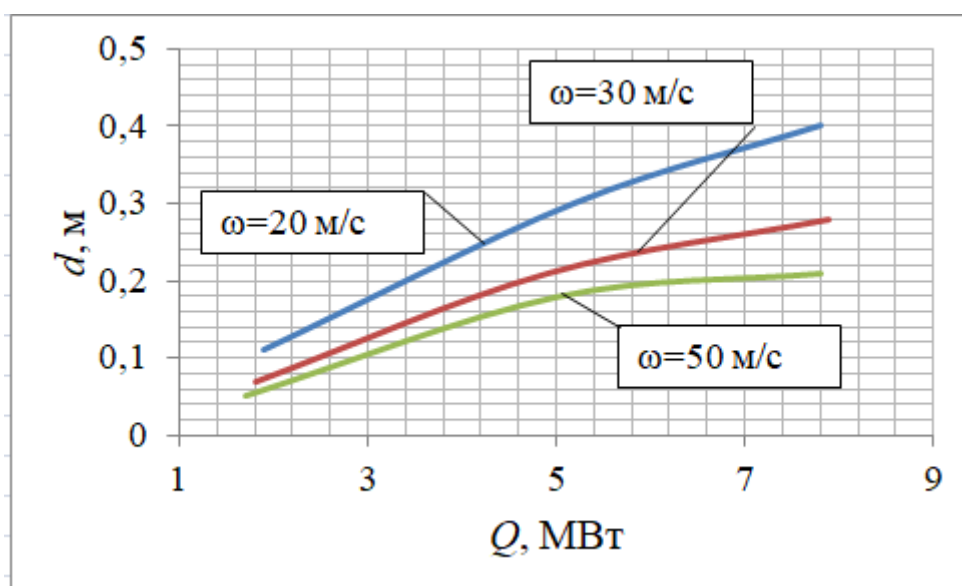


Рисунок - 2.12. Зависимость характерного размера канала горения от мощности предтопка и скорости потока

При этом на длину участка испарения (L_w) заметное влияние оказывает мощность предтопка. Так, при организации одинаковой скорости потока для предтопков

мощностью 2 и 8 МВт длина участка испарения в 2,3-2,4 раза меньше у более мощного предтопка, Рисунок 2.13.

Длина канала горения также зависит от скорости потока (ω) и температуры стенки ($T_{ст}$) и в диапазонах скоростей свыше $\omega=20$ м/с (такие скорости характерны для организации закрученных потоков) составляет $L=30$ м для высоконапряженных предтопков, Рисунок 2.14.

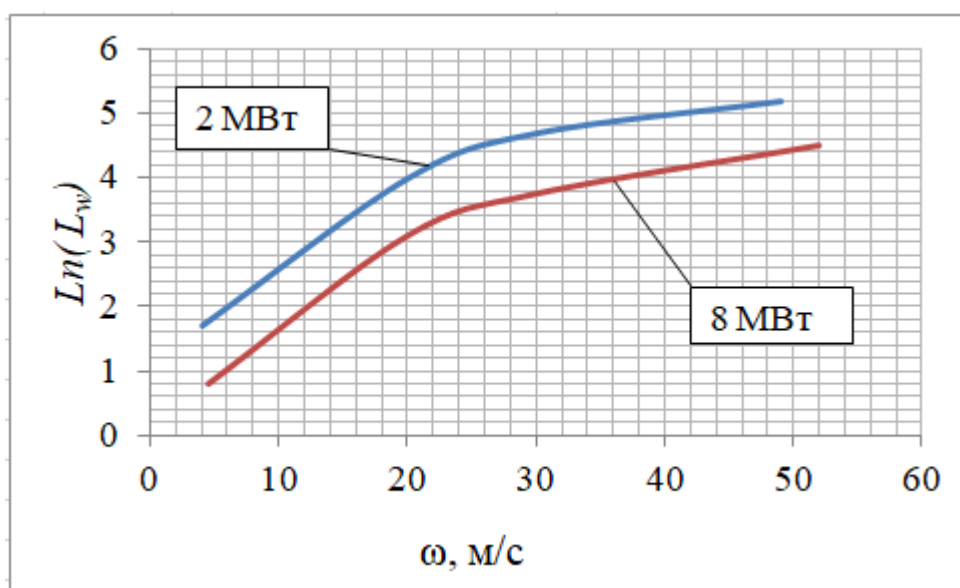


Рисунок 2.13 - Зависимость длины участка испарения от скорости потока

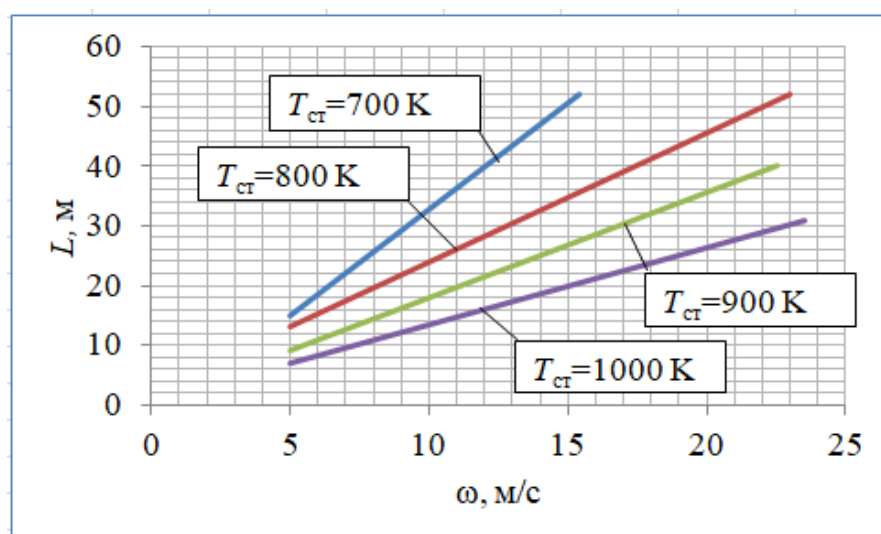
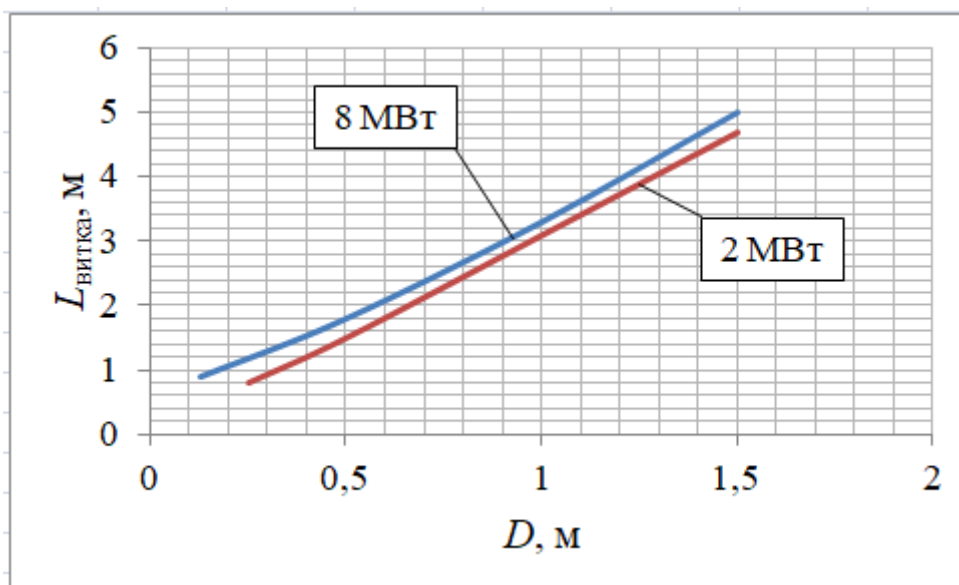


Рисунок 2.14 - Зависимость длины канала горения от скорости потока и температуры стенки

2.4.3 Конструктивные характеристики предтопка

В настоящем разделе проведен анализ конструктивных характеристик собственно циклонного предтопка. Можно видеть, что длина витка внутри циклона практически не зависит от его мощности, Рисунок 2.15.



Рисисунок 2.15 - Влияние мощности предтопка на его размеры при $\omega = 20$ м/с

В данном случае скорость потока (ω) принята $\omega = 20$ м/с, а угол его ввода (α) равен $\alpha = 6-17^\circ$ и зависит от характерного размера (d) канала горения.

Собственно предтопок может быть выполнен при разных соотношениях его длины ($L_{\text{ц}}$) и диаметру ($D_{\text{ц}}$). На это соотношение в общем случае оказывает влияние мощность (Q) и температура ($T_{\text{ст}}$) протекания процессов, характеризуемая температурой стенки ($T_{\text{ст}}$). Можно видеть, что влияние температуры менее заметно, чем влияние мощности, Рисунок 2.16.

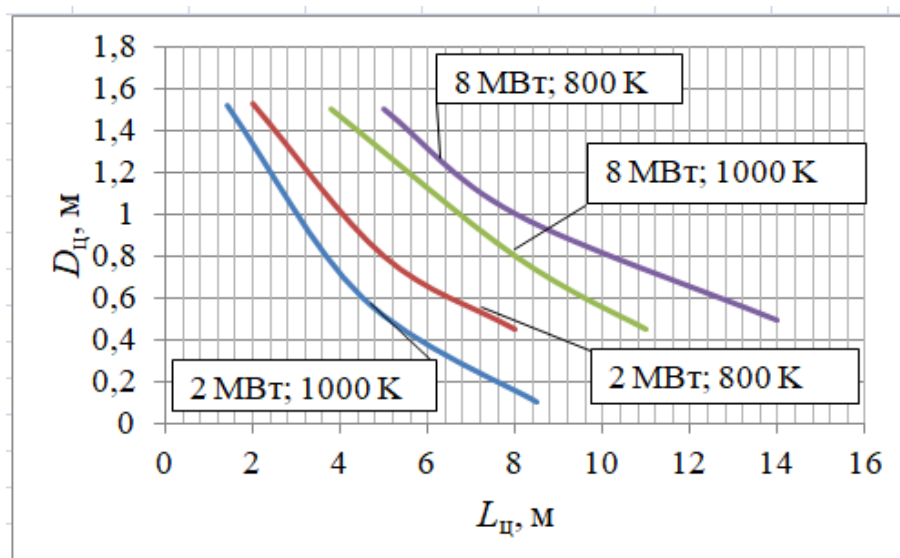


Рисунок 2.16 - Линейные размеры циклона в зависимости от мощности и температуры реакции при $\omega = 20$ м/с

Если принимать диаметр циклона ($D_{ц}$) на уровне 1-1,5 м (что соответствует, например, диаметрам амбразур энергетических котлов) при тепловой мощности 8-16 МВт, то длина аппаратов составит $L_{ц} = 4,5-10$ м, рис. 2.17.

При этом длина участка испарения составляет 0,4-0,55 от полной длины предтопка и зависит от мощности и температуры процессов. В то же время с ростом мощности циклона, влияние температуры процессов снижается, Рисунок 2.18.

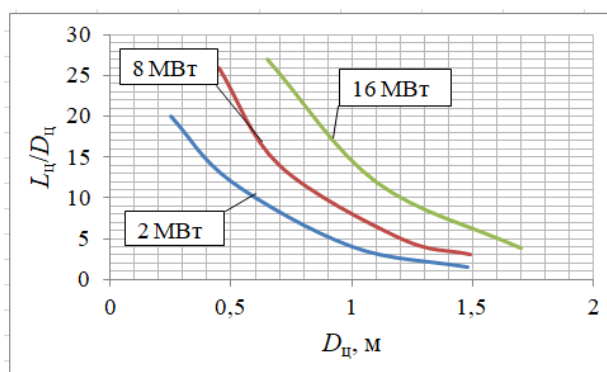


Рисунок 2.17 - Конструктивные характеристики предтопка в зависимости от его мощности ($\alpha = 6 \div 17^\circ$)

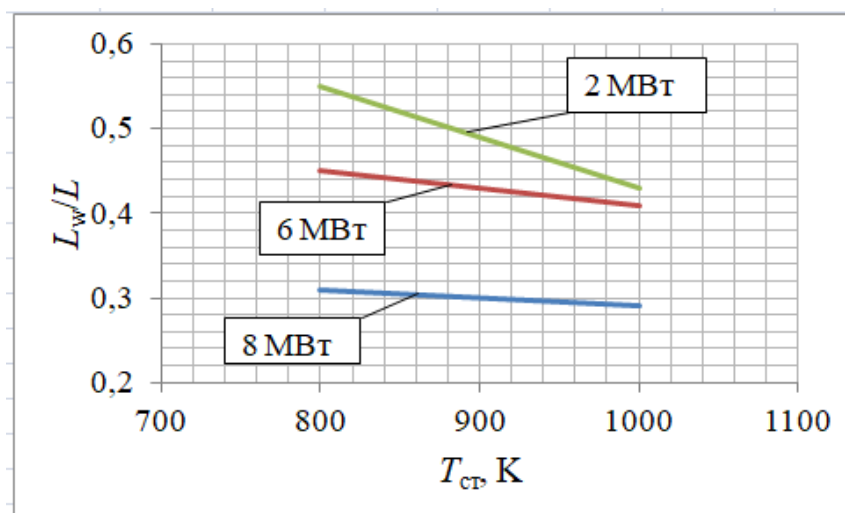


Рисунок 2.18 - Относительная длина участка испарения (L_w/L) в зависимости от температуры стенки ($T_{ст}$) для разных мощностей (Q) предтопка

2.5 Выводы

1. Разработана кинетическая модель пиролиза, воспламенения и горения тонкодисперсной водоугольной суспензии с учетом основных химических реакций. Работоспособность (достоверность) модели подтверждена сравнением с известными экспериментальными данными.
2. В результате моделирования пиролиза, воспламенения и горения ТД ВУС установлено, что на начальном этапе процесса (0-1 с) температура смеси ($T_{см}$) достигает значений 1800-2500 К с последующим снижением до ~1200 К. Высокая температура на начальном участке обусловлена полным выгоранием водорода топлива.
3. Установлено, что для ТД ВУС на основе кузнецкого угля с содержанием влаги 40 % время выхода влаги составляет 1-5 с в зависимости от температуры стенки предтопка, меняющейся от 500 до 1000 К. Меньшие значения τ_w характеризуют высоконапряженные предтопки, а большие — охлаждаемые.

4. Разработан метод конструкторского расчета циклонного предтопка в инженерной постановке. При этом выявлено, что при технически реализуемых скоростях $\omega > 20$ м/с, обеспечивающих надежную крутку потока, на конструктивные характеристики в общем случае будут влиять тепловая мощность (Q) предтопка, температура ($T_{ст}$) стенки и угол (α) ввода потока.
5. Показано, что при углах $\alpha = 6-17^\circ$ тепловая мощность предтопка не влияет на характеристику крутки потока.
6. Показано, что на линейные размеры предтопка оказывает влияние его тепловая мощность, а не температуры протекающих процессов.
7. Показано, что для диаметров циклонов $D_{ц} = 1,0-1,5$ м, характерных, например, для амбразур энергетических котлов, при тепловой мощности 8-16 МВт, длина аппаратов составляет $L_{ц} = 4,5-10$ м. Длина участка испарения L_w , в этом случае, составит 0,4-0,55 от полной длины, при этом с ростом мощности аппарата влияние температуры процессов на L_w снижается.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

3.1 Требования, предъявляемые к системе зажигания тонкодисперсных водоугольных суспензий

Наблюдение за сжиганием ВУТ в различных системах и анализ недостатков позволили сформулировать критерии идеального процесса сжигания сложного водоугольного топлива.

Система сжигания водоугольного топлива в энергетическом котле должна быть автоматической. Практически, все действия оператора должны сводиться к нажатию кнопки запуска установки. Контроль за управлением энергоагрегатами со стороны оператора оправдан только при настройке на режим.

Нежелательным является наличие нескольких видов топлив на энергоустановке. Это приводит к усложнению контроля над процессом зажигания основного и иницирующего топлив, усложняет систему топливоподачи, удорожает энергоустановку.

Практически все угольные энергоустановки имеют в своем составе мазутное хозяйство, которое обеспечивает розжиг основного топлива. Это крупный недостаток угольных энергоустановок.

Традиционные технологии приготовления ВУТ (ШБМ мокрого помола) содержат частицы до 200...300 мкм. Такие частицы способны забивать фильтры форсунок, и поэтому необходима установка механических фильтров на линиях топливоподачи. Водоугольное топливо, используемое в энергетических установках, должно быть однородным и содержать твердые частицы не более 50...60 мкм.

Тонкодисперсная водоугольная суспензия, к которой относится ТД ВУС,готавливаемая по предложенной в НГТУ технологической схеме, отвечает указанным требованиям. В соответствии с технологией приготовления ТД ВУС дробленый предварительно уголь, с размерами частиц 2...3 мм поступает в

дезинтегратор (высокоскоростная мельница ударно-скалывающего воздействия), где происходит дробление основной массы угля до размеров 25...35 мкм. Содержание фракций 0...10 мкм может составлять до 15%. Размолотый уголь активирован, время релаксации до 10 минут. За это время уголь поступает в смеситель, где смешивается с водой, прошедшей через кавитационный аппарат. Вода активирована в кавитационном поле, и смешение двух активных сред способствует созданию устойчивой топливной системы. После смешения в миксере водоугольная смесь поступает в основной гидродинамический кавитатор, где под действием высоких давлений и температур, возникающих при схлопывании кавитационных пузырьков в кавитационном поле кавитатора, происходит дальнейшее измельчение твердой фазы и осуществляется глубокая гомогенизация топливной системы. Введение разделительной среды - воды, в технологический процесс позволяет преодолеть так называемый «порог пластической текучести» [84; 85] измельченного материала и получить тонкодисперсный порошок в двухфазной системе (Рисунок 1.2).

По данным ИГИ (Москва), размеры частиц твердой фракции составили 2,5...3,5 мкм для топлива, полученного в НГТУ. [86]

Размеры остатков выгорания капель ВУТ имеют большое значение в технологии сжигания. Тонкодисперсные частицы угля в ТД ВУС в каплях образуют агломерации до 15...20 мкм за счет слипания. Эти образования нестойкие и разрушаются при высушивании и слабом механическом воздействии, что и зафиксировано в лабораторном исследовании ИГИ.

Исследования ТД ВУС с использованием микроскопа позволяют заключить, что основные размеры частиц составляют 2...3 мкм, одновременно с этим наблюдается большое количество частиц менее 1 мкм, но также в поле зрения микроскопа наблюдаются и слипание частиц в 10-15 мкм [86; 87].

Капли ВУТ при распыливании пневматическими форсунками имеют средний диаметр 50...60 мкм, что установлено экспериментально [88], и расчетным путем [89].

Капля размером 30...40 мкм содержит в себе 10...15 тысяч тонкодисперсных частиц. При ее перемещении в пространстве теплонапряженного муфеля эти частицы образуют сферический слой под поверхностью капли за счет действия центробежных сил при вращении капли. После испарения влаги образуется высокопористая сфера размерами 25...35 мкм, полая внутри. Сфера эта имеет различную прочность в зависимости от спекаемости угля. Дальнейшее развитие процесса горения капли ТД ВУС состоит в выгорании углерода и образовании в конце процесса «огарка» (char англ.). Однако «огарок» редко сохраняет сферическую форму, чаще всего он разваливается на осколки. Выполненный анализ золотого остатка ТД ВУС показал, что средний диаметр частиц в золе составляет от 9 до 16 мкм [90].

Особенностью ТД ВУС, как и всякого ВУТ является низкая реакционная способность топлива на начальном участке сжигания. Предложенный в НГТУ в прежние годы критерий воспламеняемости твердого топлива [88]

$$K = \frac{Q_{\text{лет}}}{c_{\text{т}} \cdot T_{\text{восп}}}, \quad (3.1)$$

где $Q_{\text{лет}}$ - тепло, выделяемое при сгорании летучих, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

$c_{\text{т}}$ - теплоемкость топлива, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

$T_{\text{восп}}$ - температура воспламенения твердого топлива (угля), К;

может быть распространен на ТД ВУС, если водоугольное топливо рассматривать как сильно обводненный уголь и при этом учитывать, что твердая фаза составляет только часть массы топлива и, что часть теплоты, выделяющаяся при сгорании летучих расходуется на испарение влаги, содержание в топливе которой достигает 40...50%.

Критерий воспламеняемости является системообразующим критерием: для антрацитов и полуантрацитов величина $K=2,5...3,8$, для каменных углей марки Т $K=6,5...7,5$, угли различных месторождений марок С, СС, ОС имеют значение K в интервале 7,8...8,5, угли марок Д и Г имеют $K=9...10$. Бурые угли Б1, Б2, Б3 имеют значение критерия воспламеняемости в интервале от 11 до 13.

Рассчитанный по указанной методике [91] критерий воспламеняемости для ВУТ и ТД ВУС из каменных углей имеет значение 4,3...5,8.

Таким образом, водоугольное топливо на стадии воспламенения является низкорекреационным топливом, которое требует для зажигания наличия постороннего высокотемпературного источника теплоты значительной мощности.

На основной стадии горения, топливо можно считать высокорекреационным, Рисунок 3.1.

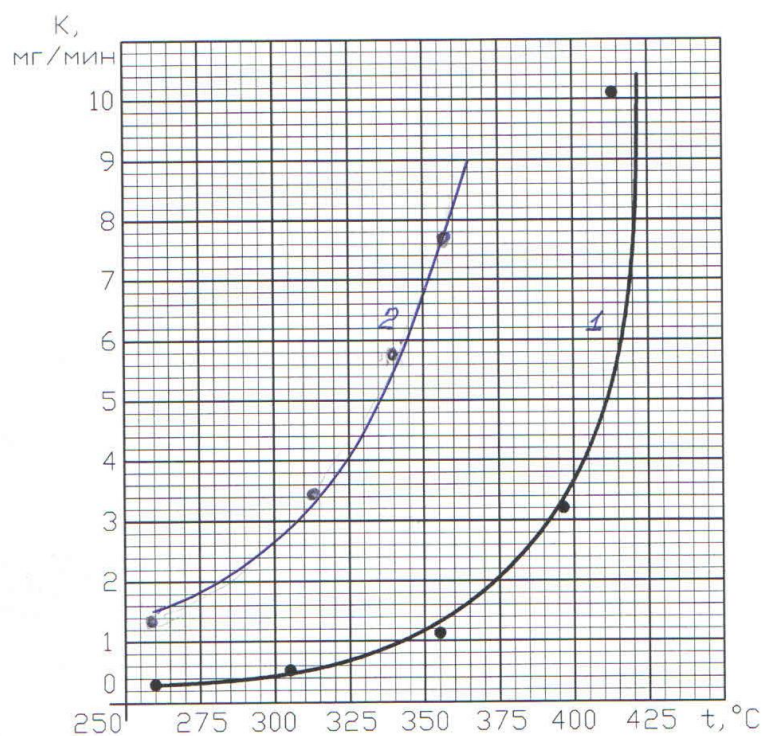


Рисунок 3.1 - Сравнение кинетики горения ТД ВУС в основной области горения и ультрадисперсного угля: 1 –ТД ВУС, 2 – ультрадисперсный уголь

3.2 Предложение по организации сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий

Указанные выше особенности сжигания ТД ВУС требуют разработки эффективной системы розжига котла и, поскольку кинетика горения ТД ВУС на

основном участке не требует каких-либо серьезных изменений в конструкции котла, то можно предложить следующую схему сжигания топлива для ТД ВУС:

- розжиг осуществляется в высокотеплонапряженном компактном предтопке, предвключенном к котлу;

- в предтопке процесс горения основного топлива должен пройти точку невозврата, когда цепные реакции горения охватывают всю массу топлива;

- дожигание топлива осуществляется в топке котла, где процесс горения охватывает 100% топлива, 60% выделяемого тепла вносятся с высокотемпературным газовым потоком из предтопка;

- выведение котлоагрегата на стационарный рабочий режим осуществляется на основном (рабочем) топливе постепенно и контролируется температурой стенки (футеровки) предтопка. При достижении температуры стенки 800-900 °С режим горения в предтопке становится самоподдерживающимся и сторонний, инициирующий горение источник может быть отключен;

- на этой стадии котел еще не выведен на рабочий режим, расход топлива через предтопок ограничен на уровне 15...20% от номинального расхода, дальнейшее повышение производительности котлоагрегата производится постепенно при постоянном увеличении расхода топлива через предтопок;

- контроль за ходом процесса осуществляется путем контроля за измерением температуры в топочном пространстве.

В работе проанализированы системы растопки котла при использовании ВУС в качестве топлива. Все системы предусматривают розжиг котла на растопочном топливе [91]. Такой способ растопки котлоагрегата является устаревшим и не учитывающим тех новых технологий, которые уже исследованы на настоящее время, например, плазменной технологии розжига котлоагрегатов, работающих на твердом топливе [91].

ТД ВУС – это топливо, которое соединяет в себе свойства углей и жидких топлив. По своему генезису – это производное от углей, можно сказать, что это один из видов угольного топлива. Поэтому логичным является перенос плазменных технологий на водоугольное топливо.

Такие исследования проводились в Институте Теплофизики и Институте Теоретической и Прикладной механики СО РАН [57]. Эти эксперименты показали возможность использования плазменных технологий для розжига водоугольного факела.

Таким образом, на основе анализа существующих способов сжигания водоугольного топлива и собственных исследований сформулированы основные принципы системы воспламенения ТД ВУС [92]:

- предполагаемая система не должна изменять конструкцию котлоагрегата;
- наиболее тяжелая часть процесса – воспламенение топлива – должна быть вынесена из топочного пространства в специальный предтопок, где процесс можно контролировать и легко управлять им;
- специальный предтопок должен быть циклонным, то есть компактным и теплонапряженным, чтобы обеспечить успешное воспламенение топлива на начальной стадии горения, когда это топливо малореакционно;
- на сегодняшний день наилучшей системой зажигания и сопровождения горения является бы плазменная система;
- управление системой зажигания, и сопровождение горения должно осуществляться автоматически при использовании компьютерного комплекса.

3.3 Условия горения тонкодисперсных водоугольных суспензий

Результаты сжигания тонкодисперсной водоугольной суспензии в циклонном предтопке

В результате исследования сжигания тонкодисперсной водоугольной суспензии (ТД ВУС) в циклонном предтопке (ЦП) получены выводы, которые необходимо учитывать при расчете мощности плазмотрона [92].

Относительная погрешность аналитического расчета тепловыделения в пределах ЦП составляет ~6%, погрешность измерения температуры на выходе из

ЦП в экспериментах составляет до 114 °С (~15 %), погрешность расчета температуры в численном математическом исследовании ~15 % (определяется погрешностью исходных параметров).

Экспериментальные исследования показали, что надежную непрерывную подачу ТД ВУС в ЦП с требуемым широким углом раскрытия факела из всех опробованных образцов обеспечила только пневмомеханическая форсунка [93].

Экспериментально подтверждена возможность организации стабильного горения ТД ВУС в циклонных предтопках (Рисунок 3.2 а, б), их работоспособность при высоких температурах (Рисунок 3.2 в, г) и возможность применения ЦП в качестве горелочных устройств для энергетических котлов ТЭС [93].

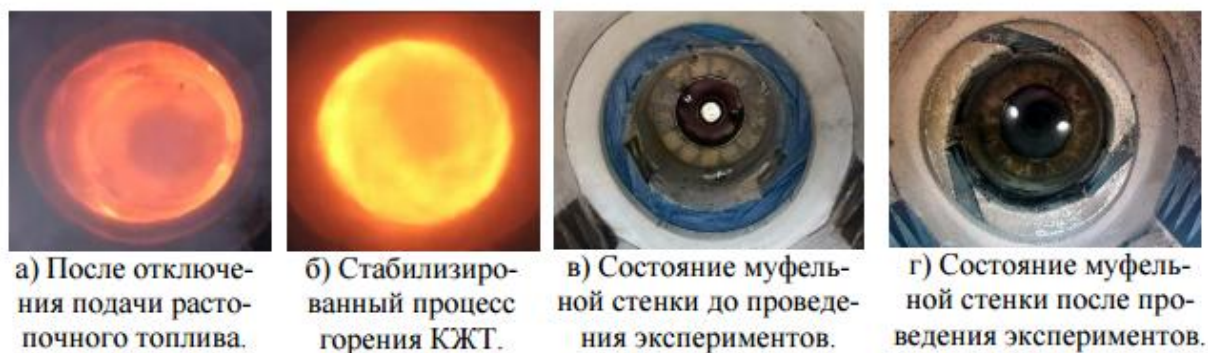


Рисунок 3.2 - Фотографии горения ТД ВУС и состояние футеровки.

Экспериментальные и численные исследования горения растопочного дизельного топлива (ДТ) (Рисунки 3.3-3.5) и ТД ВУС (Рисунки 3.6-3.10) показали их принципиальную сходимость [93]. Стабильное воспламенение ТД ВУС обеспечивается при температуре футеровки 800÷900 °С. В проведенных огневых экспериментах [93] отмечено формирование кольцевой структуры факела в поперечном сечении ЦП. Хорошо коррелируют абсолютные значения и распределение температур по длине ЦП, средняя температура газов на выходе из ЦП. Так, при работе на ТД ВУС, температура газов на выходе из ЦП составляет 1062 °С, что несколько ниже экспериментальных данных (1090÷1160 °С). Различие температур объясняется погрешностями измерений и расчетов,

различными характеристиками по механическому недожогу топлива (10,4% и 7,4% соответственно в выходном сечении ЦП) [93].

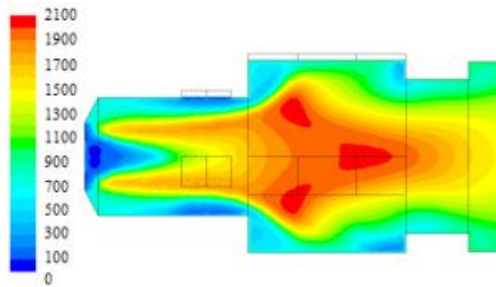


Рисунок 3.3 - Поле температур по оси ЦП (дизельное топливо), °С

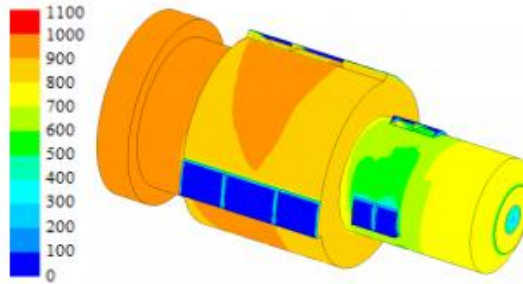
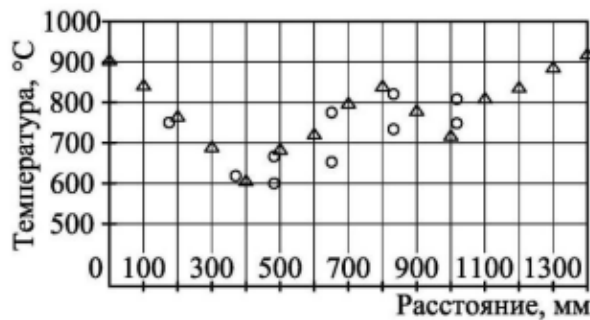


Рисунок 3.4 - Температура стенки (дизельное топливо), °С



Δ - расчетные значения ○ - экспериментальные данные

Рисунок 3.5 - Сравнение расчетных и экспериментальных температур футеровки ЦП (дизельное топливо)

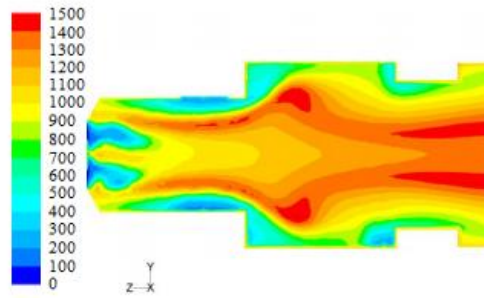


Рисунок 3.6 - Поле температур в продольном сечении по оси ЦП (ТД ВУС), °С

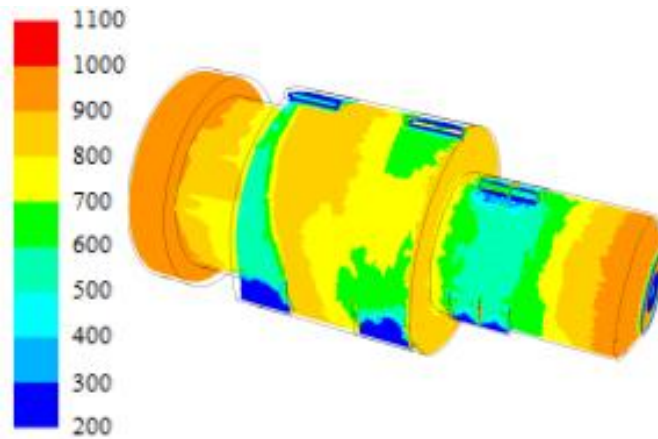


Рисунок 3.7 - Температура стенки ЦП (ТД ВУС), °С

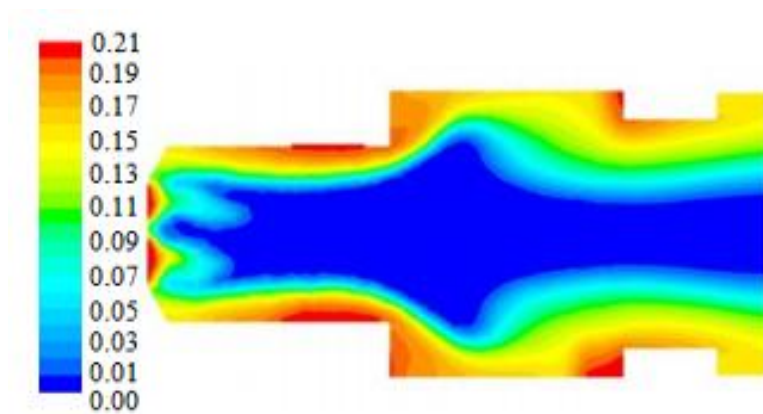


Рисунок 3.8 - Объемная доля кислорода в продольном сечении по оси ЦП (ТД ВУС)

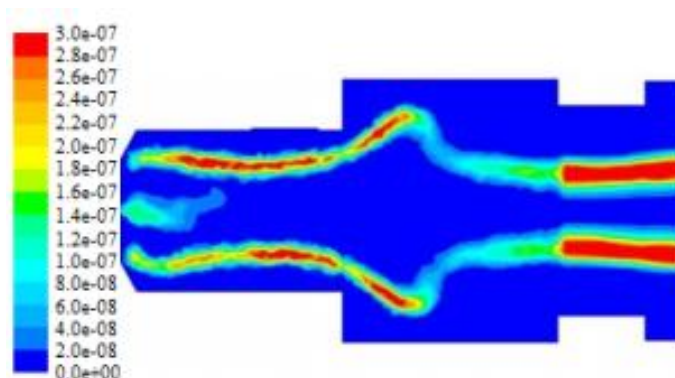
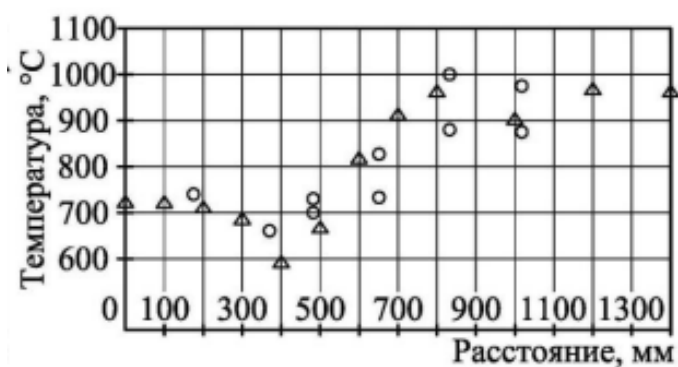


Рисунок 3.9 - Изменение массы кокса в продольном сечении по оси ЦП (ТД ВУС), кг/с

Полученные результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных подтверждают адекватность предложенной модели горения ТД ВУС для программного комплекса ANSYS Fluent (CFD) и необходимость корректировки кинетики горения ТД ВУС по сравнению с константами химического реагирования исходного угля.



Δ - расчетные значения ○ - экспериментальные данные

Рисунок 3.10 - Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик температур футеровки ЦП (ТД ВУС).

Так, для использованного в исследованиях кузнецкого угля марки Д, при проведении расчетов для ТД ВУС следует уменьшать по сравнению с исходным

Паропроизводительность, т/ч	160	220	320	420	500	670	820
Диапазон тепловых мощностей горелок, МВт	25-35	25-35	25-50	25-50	35-50	35-75	35-50
Рекомендуемая тепловая мощность ЦП ($0,3 \cdot Q_{\text{осн.гор}}$), МВт	7,5-10,5	7,5-10,5	7,5-15	7,5-15	10,5-10	10,5-21	10,5-21

Проверки разработанных конструктивно-компоновочных и расходно-термодинамических параметров ЦП выполнены для ЦП тепловой мощностью 12 МВт (Рисунок 3.11) при его совместной работе с серийным котлом (типа ДКВр-20-13).

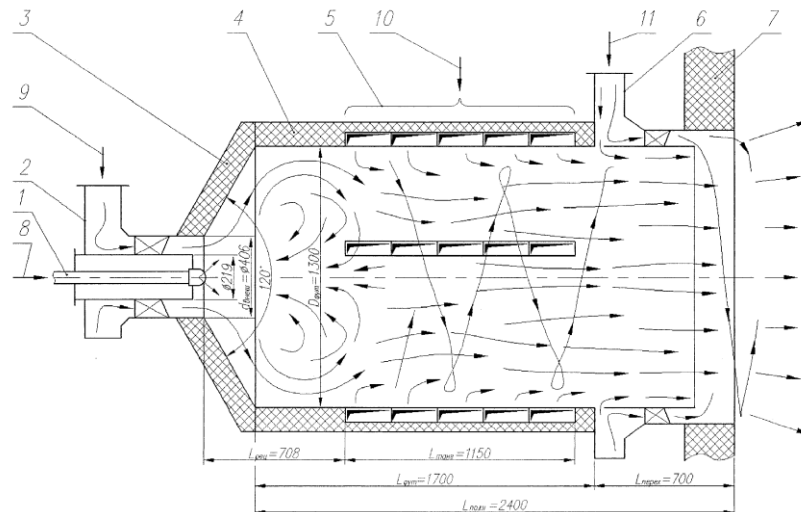


Рисунок 3.11 - Конструкция ЦП тепловой мощностью 12 МВт: 1— пневмомеханическая форсунка; 2-вихревая горелка; 3-передняя коническая стенка; 4-цилиндрический футеровочный корпус; 5-сопла тангенсального воздуха; 6-короб третичного воздуха; 7-стенка котла; 8-подача ТД ВУС; 9-подача аксиального воздуха; 10-подача тангенциального воздуха; 11-подача третичного воздуха

Результаты расчетов в ANSYS Fluent (Рисунки 3.12, 3.13) показывают высокую степень выгорания ТД ВУС в пределах ЦП ($\approx 60\%$), что обеспечивает достаточное тепловыделение для поддержания стабильности горения ТД ВУС. В

топочную камеру поступают газы с высокой температурой, где остатки несгоревшего топлива при подаче дополнительного воздуха эффективно сжигаются в высокотурбулизированном потоке. Недожог топлива в пределах топочной камеры не превышает 1÷2%. При полученном 60%-ном выгорании ТД ВУС в пределах ЦП температурный уровень внутри ЦП позволяет работать в режиме твердого шлакоудаления, что предпочтительно как для существующих, так и для новых котлов [93].

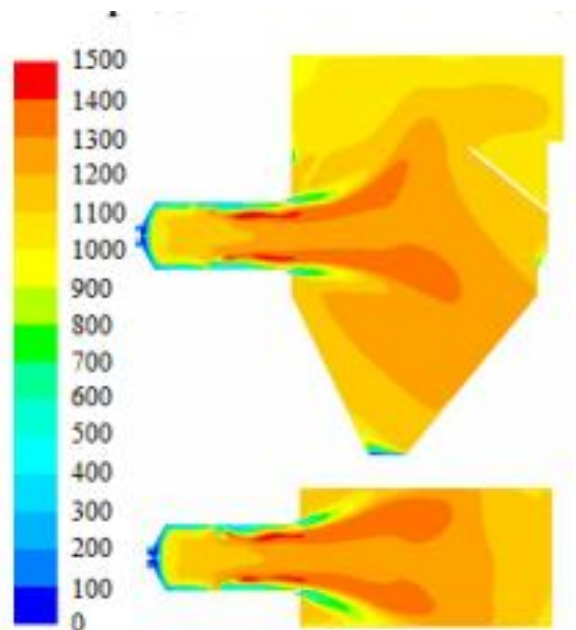


Рисунок 3.12 - Поля температур по оси ЦП, °С

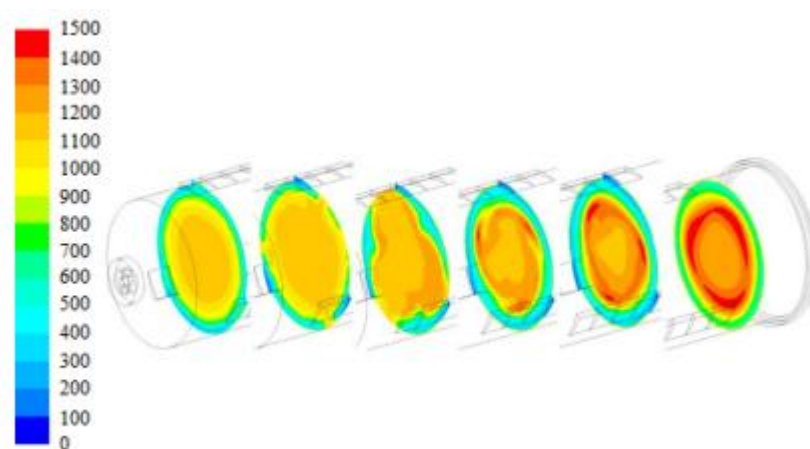


Рисунок 3.13 - Поля температур в поперечных сечениях ЦП, °С

Выполненная на основе многовариантных расчетов рационализация ЦП совместно с результатами экспериментальных исследований, позволила определить следующие параметры и зависимости [93].

- Рекомендуемое теплонапряжение объема ЦП: $q_{V\text{ доп}} = 3,7 \pm 0,22 \text{ МВт/м}^3$;
- Рекомендуемое теплонапряжение сечения ЦП: $q_{F\text{ доп}} = 9,0 \pm 0,54 \text{ МВт/м}^2$;
- Объем ЦП: $V_{\text{ЦП}} = (0,27 \pm 0,13) \cdot Q_{\text{ЦП}}$;
- Диаметр ЦП:
 - по теплонапряжению объема ЦП: $D_{\text{ЦП}}^V = (0,912 \pm 0,045) \cdot \sqrt[3]{V_{\text{ЦП}}}$, м;
 - по теплонапряжению сечения ЦП: $D_{\text{ЦП}}^F = (0,376 \pm 0,012) \cdot \sqrt{Q_{\text{ЦП}}}$, м;
- Длина ЦП: $L = (1,7 \pm 0,25) D_{\text{ЦП}}$, м;
- Внешний диаметр аксиального завихрителя: $d_{\text{акс}} = (0,32 \pm 0,02) \cdot D_{\text{ЦП}}$, м.

Диаметр ЦП мощностью до 12 МВт рекомендуется определять на основе теплонапряжения объема, свыше 12 МВт – на основе теплонапряжения сечения [93].

3.4 Методические основы расчета мощности плазмотронов для циклонных предтопок

Плазменные технологии в теплоэнергетике применяются в промышленных вариантах достаточно давно [94; 95]. Известны разработки СО РАН по использованию безмазутной плазменной растопки котлов, работающих на пылеугольном топливе с применением муфеля с плазмотроном (Институт Теплофизики, институт Теоретической и прикладной механики и др.). Результаты этих разработок были внедрены в промышленном масштабе на Гусиноозерской, Нерюнгринской, Партизанской, Черепетской ГРЭС в России, Улан-Баторской ТЭЦ-4 в Монголии и на некоторых других энергоустановках. Существует значительное количество плазменных установок, работающих периодически или

постоянно на промышленных предприятиях Новосибирска, Красноярска, Томска, Улан-Удэ и других сибирских городов.

В области энергетики и промышленных энерготехнологий хорошо известны имена таких специалистов, как В.В. Накоряков, С.В. Алексеенко, А.С. Аньшаков, В.С. Чередниченко, М.Ф. Жуков, А.П. Бурдуков, Е.И. Карпенко, В.Е. Мессерле, В.С. Перегудов и др.

Таким образом, в РФ, и в частности в Сибири, имеется солидная теоретическая и опытная база использования плазменных технологий в энергоустановках и в технологии термохимической подготовки к сжиганию с применением плазмы [92].

Схема муфеля при взаимодействии электродуговой плазмы с аэросмесью [92; 95] представлена на Рисунке 3.14.

Ранее была рассмотрена система инициации и мониторинга ВУТ в топке котлоагрегата с использованием плазмотрона [96].

Ввиду низкой реакционной способности ВУТ, особенно на начальном участке горения, для компенсации недостающего тепла предполагалось часть топлива газифицировать в плазменном газификаторе с последующим смешиванием полученного высокорекреационного топлива с основным потоком.

Камеру электрохимической подготовки топлива (ЭТХ ПТ) для стабилизации горения факела предполагалось выполнить в виде муфельной горелки, оснащенной плазмотроном.

Моделирование по программе АСТРА-4 показывает, что в процессе плазменно-паровой газификации будет получен высококалорийный синтез-газ, с высоким содержанием ($\text{CO}+\text{H}_2$) смеси при температуре 1200 К. Калорийность получаемого синтез-газа составляет $1800 \dots 2800 \text{ ккал/м}^3$.

Удельные энергозатраты находятся на уровне $0,5 \dots 3,5 \frac{\text{кВтч}}{\text{кг}}$ и сильно зависят от температурного процесса, влажности и реакционной способности твердой фазы. Энергозатраты на плазмотрон составляют от 3,5 до 4,5% от энергетической мощности потока топлива (тепловой мощности топки).

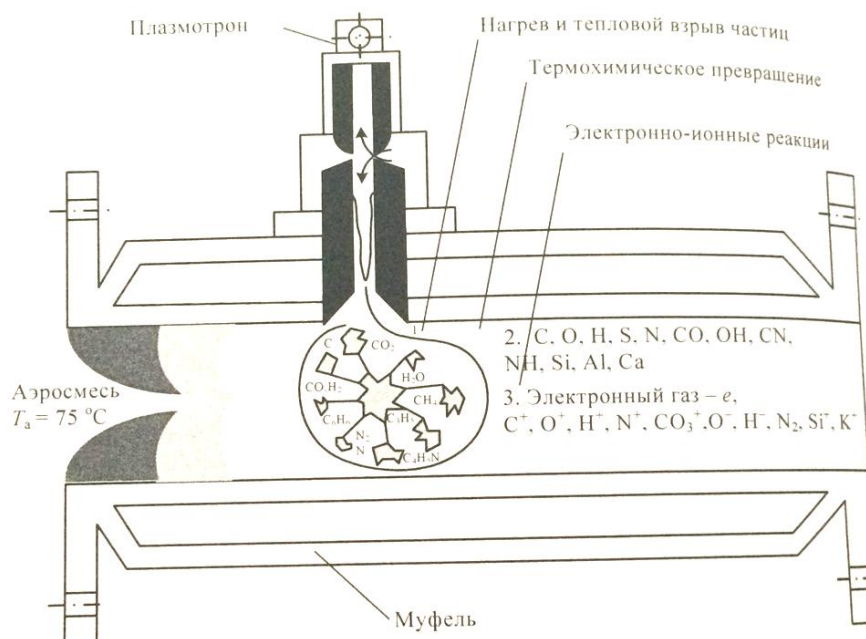


Рисунок 3.14 - Особенности взаимодействия электродуговой плазмы с аэрозолью в плазменной системе воспламенения углей (муфельная камера с плазмотроном)

Расчеты показывают нецелесообразность газификации высокообводненных топлив в плазменном газификаторе вследствие высоких удельных затрат. Ступенчатое сжигание ВУТ в ЦП позволяет снизить мощность плазменного инициатора горения топлива.

Процесс воспламенения топлива (ВУТ, угольная пыль) согласно теории цепных реакций горения происходит лавинообразно за счет развития в потоке в геометрической прогрессии центров инициации горения в виде активных молекул или кластеров. С учетом сказанного, схема горения топлива в ЦП может быть представлена в следующем виде (Рисунок 3.15).

В диссертации разработан метод плазменного зажигания и мониторинга процесса горения ВУТ с учетом цепных реакций [97]. Применение метода позволяет резко уменьшить мощность плазмотрона для инициации воспламенения ТД ВУС (подробный расчет представлен в пункте 3.6).

3.5 Метод термодинамического расчета мощности плазмотрона

Исходные данные для расчета:

- тепловая мощность топки с учетом всех потерь, включая потери от неполноты сгорания топлива, Q_T , МВт (кВт);

- m_{III}, m_{II}, m_I - доля топлива, поступающего в зону горения;

- основные характеристики ТД ВУС:

Теплоемкость твердой фазы $c_{уг}$, кДж/кг·К; температура воспламенения, T_v , К; массовая доля жидкой фазы $m_{ж}$, m_T – твердой фазы, соответственно, в ТД ВУС; теплота парообразования жидкой фазы r , МДж/кг (кДж/кг); теплота сгорания ТД ВУС, $Q_{нТДВУС}^p$, МДж/кг (кДж/кг), $Q_{нуг}^p$, МДж/кг (кДж/кг).

Метод расчета: на основании выполненных исследований и модельных расчетов [98] устанавливаем соотношение между количеством теплоты, выделяемой при сжигании топлива, непосредственно подаваемого в топку и теплотой, подаваемой из ЦП:

$$Q_{топ} = 0,4Q_T \text{ (топка);} \quad (3.2)$$

$$Q_{топ} = 0,6Q_T \text{ (предтопок).} \quad (3.3)$$

Далее рассматриваем теплоту, получаемую в циклонном предтопке в зоне II.

Расход топлива в этой зоне, кг/с:

$$B_{II} = \frac{Q_{ЦП}}{Q_n^p} \quad (3.4)$$

Это топливо содержит $m_{ж}$ – долю жидкости (воды) и долю твердой фазы m_T – долю угля.

Дериватографические исследования сжигания ТД ВУС демонстрируют две фазы горения: первая фаза (сушка) – выход воды из угольной массы и ее испарение и вторая фаза – горение мелкодисперсного твердого топлива, практически не отличающегося от горения ультрадисперсного высокорекреационного угля. Таким образом, мы имеем суперпозицию двух

процессов. В этом случае общее необходимое тепло для воспламенения ТД ВУС в зоне II складывается из теплоты испарения влаги, МВт (кВт):

$$Q_{II_{\text{вл}}} = B_{II} \cdot m_{\text{ж}} \cdot r; \quad (3.5)$$

и теплоты доведения твердой фазы до воспламенения МВт (кВт):

$$Q_{II_{\text{тв}}} = B_{II} \cdot m_{\text{т}} \cdot c \cdot (T_{\text{в}} - 273). \quad (3.6)$$

Общее количество теплоты, таким образом, равно

$$Q_{II} = Q_{II_{\text{вл}}} + Q_{II_{\text{тв}}}. \quad (3.7)$$

Для выделения этого количества теплоты потребуется сжечь в I зоне количество топлива, кг/с:

$$B_I = 1,3 \cdot \frac{Q_{II}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}, \quad (3.8)$$

где $k=1,3$ – коэффициент запаса, обеспечивающий надежное воспламенение топлива во II зоне.

Расчет расхода топлива и процесса воспламенения этого топлива в I-ой зоне даст возможность рассчитать расход топлива через муфели плазмотронов в зоне ТХПТ и мощности самих плазмотронов (или общую мощность), МВт (кВт):

$$N_{\text{пл}} = \frac{Q_{\text{ТХПТ}}}{\eta_{\text{пл}}}, \quad (3.9)$$

где $\eta_{\text{пл}}$ - КПД плазмотрона, учитывающий волновые процессы.

На Рисунке 3.15 представлена схема циклонного предтопка с плазмотроном.

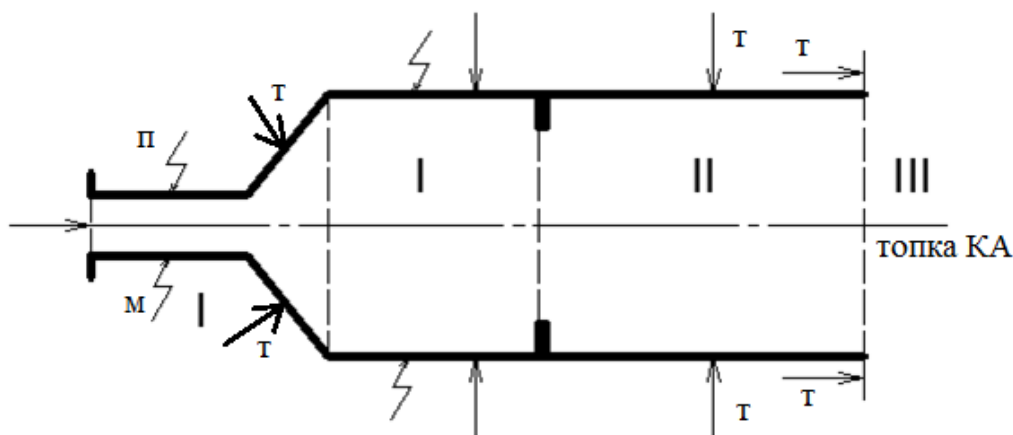


Рисунок 3.15 - Схема ступенчатого сжигания ТД ВУС в ЦП.

Зоны горения I, II, III; м – муфель, п – плазмотрон, т – топливные форсунки

3.6 Термодинамический расчет мощности плазмотрона

Используя метод, представленный в главе 3, пункт 3.5. Рассчитаем мощность плазмотрона для системы плазменного розжига котла ДКВр-20-13.

Пример расчета.

Исходные данные:

Тепловая мощность топки – 15 МВт.

Характеристики топлива: ТД ВУС на основе междуреченского угля

(Кузбасс) марка Д: $Q_n^p = 25116 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $T_b = 579 \text{ К}$; $m_{III}, m_{II}, m_I : 0,4; 0,4; 0,2$.

ТД ВУС: $m_{ТВ} = 0,6; m_{ж} = 0,4; Q_{н\text{ТДВУС}}^p = 14302 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Расчет процесса горения:

1. Расход топлива на сжигание: $B_{\text{Тсж}} = \frac{Q_{\text{т}}}{Q_{н\text{ТДВУС}}^p} = \frac{15000}{14302} = 1,0488 \text{ кг/с}$.

2. В топку вводится: $B_{\text{т}} = 0,4 \cdot B_{\text{Тсж}} = 0,42 \text{ кг/с}$.

из них:

- твердая фаза: $m_{\text{ТВ}} = 0,6 \cdot 0,42 = 0,252 \text{ кг/с}$
- жидкая фаза: $m_{\text{ж}} = 0,4 \cdot 0,42 = 0,168 \text{ кг/с}$

Тепло на воспламенение твердой фазы:

$$q_{\text{ТВ}} = m_{\text{ТВ}} \cdot c_p \cdot (T_b - 273) = 81,74 \text{ кВт};$$

Тепло на воспламенение жидкой фазы:

$$q_{\text{ж}} = m_{\text{жид}} \cdot r = 0,168 \cdot 2500 = 420 \text{ кВт}$$

где $r = 2500 \text{ кДж/кг}$ - теплота испарения влаги из ТД ВУС.

Всего, для зажигания топлива в топке КА требуется:

Для воспламенения 1 кг топлива нужно $Q_{\text{теп}} = 1194,616 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

От сжигания топлива, введенного в топку, выделится:

$$Q_{\text{топок}} = B_{\text{топ}} \cdot Q_{н\text{ТДВУС}}^p = 0,42 \cdot 14302 = 6006,84 \text{ кВт}.$$

3. Вторая зона, расчет повторяет расчет топки.

4. Первая зона, результаты расчета приведены в таблице.

5. Топливо, которое надо подать через муфель: $\frac{250,86}{14302} = 0,0175 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$

Таблица 3.2 – Рассчитанные величины (Рисунок 3.15)

№ п.п.	Величина	Зона III	Зона II	Зона I	Муфель
1	Топливо в зону, кг/с	0,42	0,42	0,21	
2	Для воспламенения требуется $Q_{ин}$, кВт	501,74	501,74	250,8 6	
3	Выделение тепла при сжигании топлива в зоне, кВт	6006,8 4	6006,8 4	3003, 42	
4	Топливо в муфель, кг/с				0,0175
5	Электрическая мощность плазмотрона, кВт				21
6	Тепло от муфеля к I зоне, кВт				250,28+21=271,28

6. Тепло в топку:

$$Q_{\text{топ}} = Q_{\text{муф}} + Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_T = 271,28 + 3003,42 + 6006,84 + 6006,84 = 15288,38 \text{ кВт.}$$

7. При прямом воздействии на поток топлива в топку котла для воспламенения этого потока нужно подвести энергию:

- На воспламенение твердой фазы:

$$m_{\text{ТВ}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{в}} - 273) = 1,05 \cdot 0,6 \cdot 1,06 \cdot 306 = 204,346 \text{ кВт}$$

- На испарение воды

$$m_{\text{ж}} \cdot r = 1,05 \cdot 0,4 \cdot 2500 = 1050 \text{ кВт}$$

Итого: $204,346 + 1050 = 1254,346 \text{ кВт.}$

При плазменном методе воспламенения потребуется меньше энергии, чем при воспламенении, используя растопочное топливо в:

$$z = \frac{1254,346}{21} = 59,73 \approx 60 \text{ раз.}$$

3.7 Выводы

1. Сформулированы требования для системы зажигания ТД ВУС в циклонном предтопке с применением плазмотронов.
2. Предложен метод расчета мощности плазмотрона, который учитывает деление предтопка на зоны и количество теплоты, которое необходимо подвести в каждую из них для испарения влаги и воспламенения ТД ВУС.
3. Показано, что при мощности предтопка на уровне ~ 15 МВт мощность плазмотрона составит 21 кВт. Этот показатель в ~ 60 раз меньше, чем при розжиге растопочным или резервным топливом. Показано, что для котла ДКВр-20-13, работающего на ТД ВУС на основе Междуреченского угля марки Д. Мощность плазмотрона составила $\sim 1,2$ МВт.

ГЛАВА 4 МЕТОД КОРРЕКТИРОВКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЖИГАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ В КОТЛОАГРЕГАТЕ

4.1 Неопределенность исходной информации на функционирующей теплоэнергетической установке и методы снижения этой неопределенности

Важной особенностью процесса функционирования ТЭУ в реальных условиях является неопределенность истинного ее состояния в каждый момент времени.

Природа этой неопределенности связана с рядом причин, из которых важнейшими являются следующие:

- некоторые параметры не измеряются;
- численные значения измеряемых величин (параметров) оцениваются зачастую с большими ошибками измерений (что обусловлено сравнительно низкой точностью промышленных методов контроля и регистрации данных);
- узкие диапазоны изменения ряда параметров соизмеримы с погрешностью контрольно-измерительной аппаратуры;
- инерционность и колебания показателей и характеристик процессов в энергооборудовании ТЭУ, что обуславливает «запоздания» в объекте и усиливает несходимость материального и энергетического балансов.

По свойству достоверности исходную информацию можно подразделить на детерминированную, вероятностную, вероятностно-неопределенную и, собственно, неопределенную. Для функционирующей ТЭУ к детерминированной информации, то есть информации, задаваемой единственным значением соответствующего показателя, следует отнести состав функционирующего оборудования. К вероятностной информации (для которой известны параметры и

законы распределения случайных величин) относят измеряемые показатели. В этом случае имеется погрешность информации в общепринятом смысле – рассматриваемый показатель может принимать разные значения, отклоняющиеся от среднего (математическое ожидание). Третья форма (вероятностно-неопределенная) задания исходной информации предполагает неточное знание закона распределения. К этой форме можно отнести большинство измеряемых показателей, а к собственно неопределенной информации – все неизмеряемые показатели, для которых задают диапазон вероятных значений. В наибольшей степени исходная информация о функционировании ТЭУ является вероятностно-неопределенной и собственно неопределенной. Вместе с тем, анализ и оптимизация функционирования ТЭУ требует такого объема (состава) показателей, который позволил бы рассчитать материальные и энергетические балансы по всем технологическим связям теплоэнергетической установки. В этом плане требуется разработка методов получения информации с минимально возможной неопределенностью.

В соответствии с разрабатываемым подходом, каждый агрегат сложной системы или теплоэнергетическая установка в целом рассматривается как многомерный технологический оператор, качественно (или) количественно преобразующий физические материальные и энергетические технологические потоки $E_i^{(x)} = (E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{in})$ на входе в соответствующие материальные и энергетические технологические потоки $E_i^{(y)} = (E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{im})$ на выходе из оператора, характеристика агрегата (или агрегативной подсистемы) может быть унифицирована. В такой форме характеристика является модулем математической модели ТЭУ.

Построение характеристики функционирующего агрегата непосредственно в виде $E_i^{(y)} = f(E_i^{(x)})$ в большинстве случаев невозможно, вследствие того, что не все потоки из $E_i^{(x)}, E_i^{(y)}$ могут быть измерены. Однако, $E_i^{(x)}, E_i^{(y)}$ могут быть рассчитаны по измеряемым параметрам:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}), Y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}),$$

как

$$\begin{aligned} E_{li} &= f_1(X_i), \dots, E_{ki} = f_k(X_i); \\ E_{il} &= \varphi_1(Y_i), \dots, E_{ij} = \varphi_j(Y_i) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Учесть все входные переменные X_i , влияющие на ход технологического процесса (происходящего в агрегате), и выходных переменных Y_i принципиально невозможно и практически нецелесообразно. При моделировании функционирующей ТЭУ приходится ограничиваться только небольшой частью основных входных переменных $X = (x_1, \dots, x_j)$, которые, измеряются на функционирующей установке, а остальные относить к неконтролируемым возмущениям (шумам). В этом случае $E_i^{(x)}$, $E_i^{(y)}$ могут быть рассчитаны как:

$$\begin{aligned} \{E_{li} = f_1(X_i), \dots, E_{ki} = f_k(X_i) \\ E_{il} = \varphi_1(Y_i), \dots, E_{ij} = \varphi_j(Y_i); y_{il} = \psi_1(X), \dots, y_{im} = \psi_m(X)\} \forall i \in J \end{aligned} \quad (4.2)$$

Из сказанного, очевидно, что для агрегата, как технологического оператора, характерна неопределенность информации. Выбор входных переменных $X = (x_1, \dots, x_j)$ диктуется технологическими причинами, определяемыми возможностью измерения и преобразования информации, а не степенью и формой влияния на выходные переменные Y_i каждого агрегата. Кроме того, исходя из модельного принципа

$$X = idem \forall i \in J \quad (4.3)$$

Выбор Y_i не представляет затруднений, поскольку зависит от известной цели использования характеристик агрегата.

Приведенное представление агрегата как технологического оператора дает возможность применить известные методы математического описания. Так для агрегата каждая из независимых выходных переменных определяется всеми входными переменными. В этом случае для описания агрегата необходимо иметь m операторов вида:

$$y_{im} = \Phi(a_{im} X) + \xi, \quad (4.4)$$

где a_{im} - вектор параметров в выбранном классе функций Φ ,

ξ - ошибка, возникающая вследствие приближенного соответствия между стохастическим отображением $y_{im} = \psi_{im}(X)$ и выбранной аппроксимирующей функцией $\Phi(a_{im}X)$ и указанных выше причин.

Учитывая то, что оператор $\Phi(a_{im}X)$ восстанавливается на некоторой выборке параметров, x, y_i , удобно его представить в виде функции:

$$\Phi(a_{im}X) = \sum_{j=0}^n (a_{im}) \hat{x}_j \quad (4.5)$$

которая является линейной относительно искомых коэффициентов и содержит в качестве \hat{x}_j не только значения исходного вектора X , но и комбинации типа x_k, x_j, x_j^2 и т.п.

Рассчитанные по (4.5) величины $y_{i1}, \dots, y_{im} \forall i \in J$, являются составляющими энергобаланса, который для функционирующей ТЭУ может быть записан в виде:

$$f(X, Y) = ABS(\delta_{x,y}) > \delta_f, Y = (Y_1, \dots, Y_i) \quad (4.6)$$

где δ_f - допустимая погрешность согласования баланса;

$\delta_{x,y}$ - несходимость энергобаланса, обусловленная погрешностью измерения входных переменных X и погрешностью позиционирования Y . Задача согласования энергобаланса при $ABS(\delta_{x,y}) > \delta_f$ формируется как задача минимизации $f(X, Y)$.

Заметим, что согласованное уравнение баланса ТЭУ является истинным уравнением, поскольку испытания и исследование функционирующих теплоэнергоустановок вообще имеет смысл проводить только в условиях стационарности режима:

$$f(X, Y) = ABS(\delta_{x,y}) = 0 \quad (4.7)$$

Поэтому процесс согласования балансового уравнения (4.6) и приведение его к согласованному состоянию (4.7) – это есть процесс адаптации информационной модели к реальным условиям [99].

Минимизация функции $f(X, Y)$ осуществляется в области G , определяемой ограничениями:

$$X^{(*)} \leq X \leq X^{(**)}, Y^{(*)} \leq Y \leq Y^{(**)}. \quad (4.8)$$

Таким образом, задана целевая, в общем случае, нелинейная функция $f(X, Y)$. Требуется найти такие $\{X^*, Y^*\} \in G$, для которых справедливо:

$$f(X^*, Y^*) = \min f(X, Y); \{X, Y\} \in G, \quad (4.9)$$

В этой формулировке $X^{(*)}, X^{(**)}, Y^{(*)}, Y^{(**)}$ определяют минимальные и максимальные значения векторов X, Y . Значения устанавливаются на основе вектора предельной погрешности Δx измерения X как:

$$X^{(*)} = X - \Delta x, X^{(**)} = X + \Delta x, \quad (4.10)$$

а значения $Y^{(*)}, Y^{(**)}$ - на основе вектора доверительных интервалов Δy :

$$Y^{(*)} = Y - \Delta y, Y^{(**)} = Y + \Delta y. \quad (4.11)$$

Любая пара векторов $\{X, Y\} \in G$ является допустимой. Набор всех допустимых пар векторов образует допустимое множество решений задачи согласования энергобаланса. Допустимая пара векторов, обеспечивающая значение функции (4.9) меньшее, чем любая другая допустимая пара векторов, считается оптимально согласованной парой векторов $\{X^*, Y^*\}$.

Однако, следует заметить, что вследствие наличия ограничений на диапазон изменения величин X и Y и случайного характера распределения (нормальный закон), отклонений от истинного значения. любые из допустимого множества решений является более точным, чем множество измеряемых и вычисленных параметров.

Таким образом, согласование балансового уравнения представляет собой адаптацию информационной системы к реальному состоянию теплоэнергетического оборудования.

В самом общем случае, когда $ABS(\delta_{x,y}) > \delta_f$, согласование энергобаланса на заданном R -том режиме работы ТЭС производится в итерационном процессе:

$$f[X_R^*, Y_R^{*(\lambda)}] = \min f[X_R, Y_R^{*(\lambda-1)}], \{X_R, Y_R^{*(\lambda-1)}\} \in G, \quad (4.12)$$

который заканчивается при выполнении условия:

$$f [X_R^*, Y_R^{*(\lambda)}] \leq \delta_f, \quad (4.13)$$

где $Y_R^{*(\lambda)}$ - λ -ое приближение выходных параметров агрегатов к вектору действительных параметров ТЭУ на R -том режиме.

4.2 Некоторые методики согласования балансовых уравнений в энергетических установках

Уравнение энергетического или субстанциального баланса ТЭУ в целом, или любой подсистемы этой установки, выражает собой закон сохранения энергии и вещества. При стационарных условиях (режимах) функционирования ТЭУ балансовое уравнение имеет вид

$$f(x, y) = \delta(x, y) = 0, \quad (4.14)$$

где x, y – члены балансового уравнения объекта, измеренные (или вычисленные на основе измерений) одновременно на контрольной поверхности, методически ограничивающей рассматриваемый объект

$\delta(x, y)$ - небаланс уравнения, который, при указанных условиях, очевидно, равен нулю.

Уравнение (4.14) является согласованным в том смысле, что все члены этого уравнения соответствуют реальным значениям измеряемых параметров.

Как было показано в разделе 4.1 появление небаланса в уравнении (4.14), не равного нулю при условиях стабильного режима функционирования ТЭУ соответствует несогласованному балансовому уравнению

$$f(x, y) = \delta(x, y) \neq 0, \quad (4.15)$$

члены которого по причинам, указанным выше (см 4.1) не соответствуют точным значениям параметров функционирующей установки.

Процесс приведения несогласованного балансового уравнения к согласованному какими-либо информационными методами является, таким образом, процессом адаптации несогласованного баланса к реальным условиям. При завершении адаптации все члены балансового уравнения приобретают точное значение параметров функционирования.

Все информационные методы адаптации делятся на аналитические и методы случайного поиска.

В качестве методического обеспечения разработки программ мониторинга процесса сжигания ТД ВУС в энергетическом котлоагрегате предлагаются две хорошо проверенные методики согласования балансов: аналитическая и методика случайного поиска с использованием граничной функции.

Аналитическая методика, представленная в монографии Академика ПАН проф. Я. Шагурта [100], отличается всесторонним учетом особенностей погрешностей при составлении балансовых уравнений. Сложность математического аппарата для получения системы уравнений условий согласования балансов приводит к большому объему вычислений при согласовании системы уравнений условий. Методика отличается солидной математической базой. Основной недостаток в том, что попытка решения задачи основанной на случайных процессах детерминированным способом не может дать абсолютно точный результат. В конечном расчете остается остаточная неопределенность.

Ниже приведен более полно основной методический подход методики согласования балансовых уравнений в аналитической методике по Я.Шаргугу.

Методика согласования балансов по Я.Шаргугу [100]

При составлении уравнений энергетического или материального баланса для агрегатов ТЭУ или для системы в целом некоторые величины невозможно измерить в реальном темпе времени, в таком случае принимают на основе экспертной оценки, приближенно. Также экспертно можно оценить диапазон их вероятного значения. Эти величины принято называть «неизвестные». Далее по тексту следуем наименования и обозначения, в терминологии автора.

В технических задачах, особенно в области химических процессов, особое внимание следует уделять условию взаимной независимости балансовых уравнений. В случае сомнения о взаимной независимости уравнений условий задачи, следует провести исследование на взаимную независимость уравнений условий:

$$F_k = F_k(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta_1, \dots, \beta_u); (k = 1 \dots r), \quad (4.16)$$

где α_i - величина, следующая из измерения ($i = 1 \dots n$),

β_l - неизвестная величина ($l = 1 \dots u$),

методами, известными из теории функций.

Уравнение условий (4.14) не соблюдаются при подстановке наблюдаемых l_i , а также приближенных значений неизвестных x_l .

$$F_k(l_1, \dots, l_n, x_1, \dots, x_u) = -\omega_k, \quad (4.17)$$

где l_i - измеряемая величина ($i = 1 \dots n$);

x_l - приближенное значение неизвестной ($l = 1 \dots u$);

ω_k - несходимость R -того уравнения условий ($k = 1 \dots r$).

Для нахождения истинных значений величин l, x следует ввести поправки V_i для измеряемых и y_l для приближенных значений неизвестных.

$$F_k(l_1 + V_1, \dots, l_n + V_n, x_1 + y_1, \dots, x_u + y_u) = 0. \quad (4.18)$$

Для линеаризации уравнений (4.17) функцию (4.18) разложим в ряд Тейлора в окрестности точки $(l_1 \dots l_n, x_1 \dots x_u)$ и отбросим все выражения высших порядков малости кроме первого.

$$\begin{aligned} F_k(l_1 + V_1, \dots, l_n + V_n, x_1 + y_1, \dots, x_u + y_u) &\approx \\ &\approx F_k(l_1, \dots, l_n, x_1, \dots, x_u) + \left(\frac{dF_k}{d\alpha_1} \right)_0 V_1 + \dots + \left(\frac{dF_k}{d\alpha_n} \right)_0 V_n + \left(\frac{dF_k}{d\beta_1} \right)_0 y_1 + \dots + \left(\frac{dF_k}{d\beta_u} \right)_0 y_u, \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\text{где } \left(\frac{dF_k}{d\alpha_i} \right)_0 = a_{ki}; \quad (4.20)$$

$$\left(\frac{dF_k}{d\beta_l} \right)_0 = b_{kl}, \quad (4.21)$$

являются частными производными функции F_k относительно точных значений измеряемых α_i и относительно точных значений неизвестных β_l , вычисленных в точке $(l_1 \dots l_n, x_1 \dots x_u)$.

После подстановки в выражение (4.18) зависимости (4.19) и обозначений (4.20) и (4.21) линеаризованное уравнение условий принимает форму

$$\sum_{i=1}^n a_{ki} V_i + \sum_{l=1}^u b_{kl} y_l = \omega_k; (k = 1 \dots r) \quad (4.22)$$

Наиболее вероятные значения поправок измеряемых величин вычисляются из условия минимума взвешенной суммы квадратов поправок V_i

$$\sum_{i=1}^n \frac{V_i^2}{m_i^2} = \min, \quad (4.23)$$

где m_i является средней абсолютной погрешностью величины, выступающей в уравнениях условий.

Минимум, выраженный в уравнении (4.23), обусловлен условиями (4.22). Экстремум условий выражен при помощи метода Лагранжа при введении неопределенных величин k_k , известных, как корреляты. Одновременное исполнение условий (4.22) и (4.23) равнозначно исполнению зависимости:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \frac{V_i^2}{m_i^2} - 2 \sum_{k=1}^r \left[k_k \left(\sum_{i=1}^n a_{ki} V_i + \sum_{l=1}^u b_{kl} y_l - \omega_k \right) \right] = \min. \quad (4.24)$$

Обязательным условием существования экстремума функции Φ является выполнение следующих уравнений:

$$\frac{V_i}{m_i^2} = \sum_{k=1}^r a_{ki} k_k; (i = 1 \dots n) \quad (4.25)$$

$$\sum_{k=1}^r b_{kl} k_k = 0; (l = 1 \dots u) \quad (4.26)$$

Системы линейных уравнений (4.22), (4.25) и (4.26) в количестве $n+u+r$ охватывают решение задачи, поскольку дают возможность определить корреляты k_k , поправки к измеряемым величинам V_i и поправки к неизвестным y_l . Число уравнений этой системы можно уменьшить путем вычисления из уравнения (4.25) поправок V_i и подстановки их в (4.22). Тогда получим систему из $u+r$ уравнений, состоящую из уравнения (4.26) и зависимости

$$\sum_{p=1}^r \sum_{i=1}^n m_i^2 k_p a_{ki} a_{pi} + \sum_{l=1}^u b_{kl} y_l = \omega_k; (k = 1 \dots r) \quad (4.27)$$

Изложенная методика решения проблемы согласования балансов основана на классическом положении о допустимости исключения членов ряда высшего порядка в разложении (4.19). Однако это допущение является причиной

неоднозначности результатов расчетов. Результаты зависят, как известно, от способа предварительного определения неизвестных. Поэтому результаты согласования не следуют точно условиям нелинеаризованных уравнений. Это различие не имеет большого значения, если выражения высшего порядка малости в ряду Тейлора (4.19) действительно очень малы, что имеет место тогда, когда относительные погрешности измерений невелики.

4.3 Метод и алгоритм согласования балансовых уравнений методом случайно-направленного поиска при наличии граничных условий

Согласование несогласованного уравнения энергетического и материального баланса осуществляется в итерационном процессе адаптации членов балансового уравнения к их истинным значениям. При достижении этого результата выполняется условие (4.13) [118].

При этом принимаются допущения, что истинное значение искомым величин x^* , y^* лежит в зоне вариативного поиска, которая определяется из условия (4.10).

Вариативный поиск истинных значений членов балансового уравнения x_i^* , y_i^* производится путем введения в уравнение случайных значений x, y , выбор этих значений производится хаотически при помощи генератора случайных чисел.

$$f(x, y)^\lambda = ABS(\delta xy)^\lambda = Deb.R^\lambda .$$

Процесс адаптации обеспечивается граничными условиями, при которых небаланс R^λ итерации должен быть меньше абсолютной величины, чем небаланс $R^{\lambda-1}$ итерации.

Алгоритм решения проблемы состоит из следующих положений:

1. Все компоненты балансового уравнения имеют одинаковую размерность и могут быть представлены в виде векторов, лежащих на одной оси (Рисунок 4.1). Это сокращает объем зоны поиска истинных значений компонентов и объем расчетов.

2. Известны измеренные, рассчитанные и принятые конвенционально (экспертно) все компоненты балансового уравнения и относительная погрешность их определения δ_x , поскольку известны и инструментарий и методика измерения и может быть определен доверительный интервал разброса значений конвенциональных величин.
3. На рисунке 4.1 представлена схема λ -ой итерации поиска истинного значения x_i^* - члена балансового уравнения.

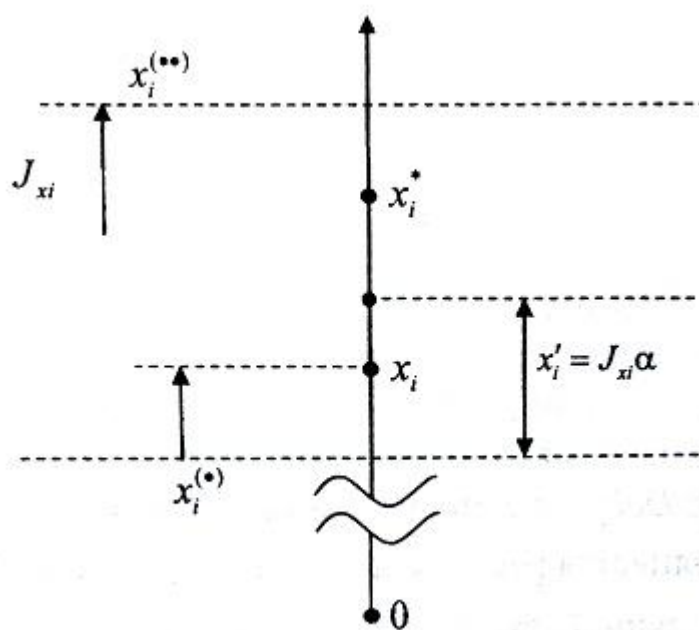


Рисунок 4.1 - Схема λ -ой итерации поиска x_i^*

x_i^*, y_i^* - истинное значение компонентов, неизвестное нам;

x_i, y_i - измеренное или принятое значение компонента;

δ_x, δ_y - относительная погрешность определения компонента.

4. Зона поиска истинного значения компонента определяется максимальным и минимальным его отклонением от измеренного значения:

Интервал зоны поиска равен :

$$J_x = [x^{(\bullet\bullet)} - x^{(\bullet)}] = 2x_i \delta_{xi} \quad (4.28)$$

Введем случайный коэффициент поиска $x_i^* - \alpha'_x$, тогда новое значение измеренного компонента равно:

$$x'_i = x_i^{(\bullet)} + J_{xi} \alpha'_x; \{0 \leq \alpha_x \leq 1, 0\} \quad (4.29)$$

5. Такая операция выполняется для всех членов балансового уравнения:

$$f(x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_j)_0 = ABS\delta(x, y)_0 = Deb_0 \quad (4.30)$$

и на основе полученных величин первого шага процесса итерационной адаптации случайным поиском составляется балансовые уравнения первого шага приближения:

$$f_1(x'_i, y'_i) = ABS\delta(x'_i, y'_i)_0 = Deb_1 \quad (4.31)$$

В уравнениях (4.30) и (4.31), подсчитанные небалансы сравниваются между собой по модулю:

- если $Deb_1 < Deb_0$, то уравнение 1-го шага принимается за исходное и расчет продолжается по описанной схеме;
- если $Deb_1 \geq Deb_0$, то производится возвращение к исходному уравнению и выполняется расчет с новыми коэффициентами α_{x_i} и α'_{x_j} .

6. Расчеты по данной схеме продолжаются до тех пор, пока в результате на λ -ом шаге не будет получено $Deb_R \approx 0$ или $Deb_\lambda \leq Deb_{\min}$ удовлетворяющего условию (4.13) точности адаптации несогласованного балансового уравнения к согласованному.

При этом все компоненты балансового уравнения будут максимально приближены к истинным значениям. Описанный выше алгоритм представлен ниже на Рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 - Схема и алгоритм согласования балансового уравнения методом случайного поиска с применением граничной функции

Пример согласования балансового уравнения

Ниже приведен простой пример использования метода с целью коррекции исходной информации по энергоустановке.

Технологический преобразователь (Рисунок 4.3) имеет следующие энергетические потоки:

- поток химической энергии топлива P_1^* , кВт (вход);
- поток электрической энергии P_2^* , кВт (выход);
- поток низкопотенциальной тепловой энергии к нижнему источнику тепла P_3^* , кВт (выход).

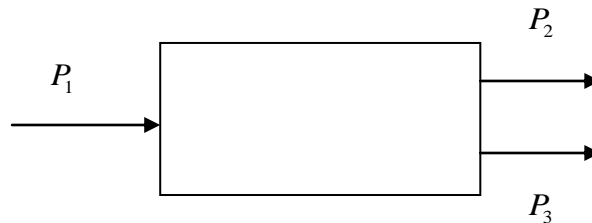


Рисунок 4.3 - Схема энергетического преобразователя

Измеренные потоки P_1, P_2, P_3 отличаются от истинных значений, оценены погрешности измеряемых величин. Все исходные данные значения задачи представлены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Исходные данные для задачи согласования баланса

№ п/п	P_i^* , кВт	Относительная погрешность δP_i	Абсолютная погрешность m_i , кВт	Измеренное P_i , кВт
1	12	0,05	0,6	12,4
2	4	0,03	0,12	4,1
3	8	0,08	0,64	7,4

Необходимые вычисления проводим в соответствии с алгоритмом последовательности действий по методу:

определим небаланс уравнения по измеренным значениям потоков:

$$F(x_1, x_2, x_3) = (12, 4 - 4, 1 - 7, 4) = ABS\delta(x) = 0, 9;$$

определим интервал неопределенности для $x_1(P_1), x_2(P_2), x_3(P_3)$:

$$J_{x_1} = 1, 2; J_{x_2} = 0, 24; J_{x_3} = 1, 28.$$

В соответствии с формулой :

$$x_i' = x_{i\min} + J_{x_i} \alpha_i'$$

Рассчитываем балансовые уравнения первого шага:

для x_1'

$$\alpha_1' = 0, 9; x_{1\min} = 12, 4 - 0, 6 = 11, 8; J_{x_1} \alpha_1' = 1, 2 \cdot 0, 9 = 1, 08;$$

$$x_1' = 11, 8 + 1, 08 = 12, 88;$$

для x_2'

$$\alpha_2' = 0, 7; x_{2\min} = 4, 1 - 0, 12 = 3, 98; J_{x_2} \alpha_2' = 0, 24 \cdot 0, 7 = 0, 168;$$

$$x_2' = 3, 98 + 0, 168 = 4, 148;$$

для x_3'

$$\alpha_3' = 0, 7; x_{3\min} = 7, 4 - 0, 64 = 6, 76; J_{x_3} \alpha_3' = 1, 28 \cdot 0, 7 = 0, 896;$$

$$x_3' = 6, 76 + 0, 896 = 7, 656;$$

Уравнение первого шага: $12, 88 - 4, 148 - 7, 656 = 1, 076$.

Сравнение небаланса $Deb_1 > Deb_0 \Rightarrow$ возврат к нулевому варианту.

Второй шаг.

$$12, 4 - 0, 6 = 11, 8; 4, 1 - 0, 12 = 3, 98; 7, 4 - 0, 64 = 6, 76;$$

$$x_1'' = 11, 8 + 1, 2 \cdot 0, 4 = 12, 28;$$

$$x_2'' = 3, 98 + 0, 24 \cdot 0, 3 = 4, 052;$$

$$x_3'' = 6,76 + 1,28 \cdot 0,5 = 7,4.$$

Баланс:

$$12,28 - 4,052 - 7,4 = 0,828 < 0,9.$$

Переходим к третьему шагу на основе балансового уравнения второго шага.

Третий шаг:

$$12,28 - 0,6 = 11,68 \Rightarrow 11,68 + 1,2 \cdot 0,3 = 12,04;$$

$$4,052 - 0,12 = 3,932 \Rightarrow 3,932 + 0,24 \cdot 0,4 = 4,028;$$

$$7,4 - 0,64 = 6,76 \Rightarrow 6,76 + 1,28 \cdot 0,7 = 7,656$$

$$12,04 - 4,028 - 7,656 = 0,356 < 0,828.$$

Переходим к четвертому шагу:

Остальные шаги тренда эволюции представлены в Таблице 4.2.

Результаты согласования балансового уравнения:

а) небаланс уравнения по отношению к потокам энергии:

$$E_{\text{вх}} = E_{\text{вых}} = 12 \text{ кВт}$$

- до согласования

- после согласования

$$ABS\delta(x) = \frac{0,9}{12} = 0,075(7,5\%);$$

$$Deb = \frac{0,052}{12} = 0,00433(0,433\%).$$

б) по измерениям потоков:

- до согласования

- после согласования

$$ABS\delta(x_1) = \delta P_1 = \frac{0,4}{12} = 0,033(3,3\%);$$

$$ABS\delta(x_2) = \delta P_2 = \frac{0,1}{4} = 0,025(2,5\%);$$

$$ABS\delta(x_3) = \delta P_3 = \frac{0,6}{8} = 0,075(7,5\%);$$

$$Deb_1 = \frac{12-11,96}{12} = 0,0033(0,33\%);$$

$$Deb_2 = \frac{4-3,956}{4} = 0,011(1,1\%);$$

$$Deb_3 = \frac{8-7,952}{8} = 0,006(0,6\%).$$

Таким образом, результаты приведенного выше расчетного эксперимента подтверждают высказанное ранее предположения о том, что согласование балансового уравнения методом случайного поиска при наличии граничной функции сближают корректируемые значения компонентов балансового уравнения с их истинными значениями.

Методика коррекции компонентов балансовых уравнений на основе случайно-направленного поиска при использовании граничных условий является оригинальной разработкой кафедры ТЭС НГТУ и опубликована в нескольких статьях [101-103], а также в работе [104].

Идейной основой разработки является развиваемая в настоящее время теория хаотических процессов, в частности в работах Лауреата Нобелевской премии по физике И.Р. Пригожина [105; 106] и других известных ученых [107-109], а также современного известного английского ученого Стивена Хоккинга.

Таблица 4.2 - Сводная таблица расчета тренда согласования балансового уравнения

Шаг	x_1	x_2	x_3	α_1	α_2	α_3	x'_1	x'_1	x'_1	$ABS\delta(x)$	Примечание
0	12,4	4,1	7,4	-	-	-	-	-	-	0,9	Базовое
1	12,4	4,1	7,4	0,9	0,7	0,7	12,88	4,148	7,656	1,076	Возврат к нулевому шагу
2	12,4	4,1	7,4	0,4	0,3	0,5	12,88	4,052	7,4	$0,828 < 0,9$	Базовое
3	12,28	4,052	7,4	0,3	0,4	0,7	12,04	4,028	7,656	$0,356 < 0,828$	Базовое
4	12,04	4,028	7,656	0,3	0,4	0,8	11,8	4,004	8,04	$0,244 < 0,356$	Базовое
5	11,8	4,004	8,04	0,3	0,5	0,5	11,56	4,004	8,04	$0,484 > 0,244$	Возврат к 4-му шагу
6	11,8	4,004	8,04	0,8	0,4	0,2	12,16	3,98	7,656	$0,524 > 0,244$	Возврат к 4-му шагу
7	11,8	4,004	8,04	0,6	0,3	0,4	11,96	3,956	7,952	0,052	Удовлетворительная точность

4.4 Сравнительный расчет согласования балансовых уравнений аналитическим методом и методом случайно-направленного поиска

Метод согласования балансов при аналитическом подходе к решению задачи, или при случайно-направленном поиске решения, в своей основе имеет случайные, т.е. непредсказуемые отклонения величин от истинного значения.

Независимо от того, каким методом мы решаем проблему согласования баланса или, говоря другими словами, снижаем неопределенность информации, поступающей от функционирующей энергоустановки или системы, невозможно утверждать, что в конечном результате будет получена абсолютно достоверная информация по параметрам процесса.

Это происходит вследствие того, что производится попытка случайные явления «загнать» в математическую конструкцию, построенную на детерминированных соотношениях, аппроксимировать нелинейные функции линейными уравнениями при этом, упростив их, подогнать под идеализированные соотношения распределения этих случайных величин. При этом математическая модель становится неадекватной явлению, и в результате возникает остаточная неопределенность, которая, заметим, существенно меньше, чем неопределенность исходного уравнения.

Случайные методы поиска согласования балансового уравнения основана на хаотических процессах изменения компонентов балансового уравнения, которые рассматриваются как переменные x и y . Однако, хаотизация поиска решения задачи управляема путем применения граничного условия, которое организует эволюцию поиска в направлении к аттрактору (все траектории из некоторой окрестности которого стремятся к нему при времени, стремящемся к бесконечности) в случае реальных процессов и к $\delta(x, y) = 0$ в случае согласования балансового уравнения в виртуальном пространстве.

В случае управляемого хаоса вводится дискретность процесса эволюции при введении случайных коэффициентов. Именно это и определяет

итерационность процесса согласования балансовых уравнений, именно поэтому в конечном результате остается некоторая неопределенность, которая теоретически может быть намного меньше, чем при аналитическом решении задачи.

Таким образом, все известные нам методы согласования не решают проблему полной достоверности результата, что не исключает решения на уровне достаточной точности.

Поэтому эффективность метода должна определяться следующими факторами:

- сложность и громоздкость вычислений или четкий и понятный алгоритм расчетов при согласовании балансов;
- простота и лаконичность программы и применение информационно-вычислительной системы;
- время расчетов для согласования балансовых уравнений.

Ниже приведен сравнительный расчет субстанциального баланса процесса горения топлива при совместном сжигании в топке котлоагрегата угольной пыли и доменного газа на промышленной ТЭЦ металлургического комбината в ПНР. Работа является частью НИР, выполненных в Силезком политехническом институте по методике [100]. Расчеты заимствованы из сборника методических разработок по результатам НИР в Силезком политехническом институте [110].

Перевод текста выполнен без каких-либо изменений, система обозначений оставлена оригинальной.

В сравнительном расчете, выполненном по предлагаемой методике согласования балансов методом случайного-направленного поиска при использовании граничных условий, постановка задачи оставлена по оригиналу [100], как и все исходные данные.

Постановка задачи

- а) уточнение субстанциального балансов в процессах сжигания, аналитический метод.

В результате уточнения субстанциального баланса процесса сжигания в паровом котле вычислить:

- поток продуктов сгорания, отходящих от котла;
- степень увлажнения продуктов сгорания;
- поток воздуха, поступающего в котел;
- содержание пыли в отходящих продуктах сгорания.

Данные для вычислений:

- в котле сжигается угольная пыль во взвеси с воздухом и одновременно доменный газ с параметрами $t_r = 40^\circ\text{C}$, $\varphi_r = 100\%$, $P_r = 1,2$ бар.;
- параметры воздуха $t_a = 31^\circ\text{C}$, $\varphi_a = 82\%$, $P_a = 1$ бар.

Остальные результаты измерений, а так же их средние абсолютные погрешности представлены в Таблице 4.3.

Таблица 4.3. - Список результатов измерений по паровому котлу и их средних абсолютных погрешностей

№ п.п	Величина	Обозначение	Размерность	Результат измерения	Средняя абсолютная погрешность
1	Массовая доля	C	-	0,6390	0,00500
		H	-	0,0380	0,00095
		S	-	0,0077	0,00270
		N	-	0,0110	0,00220
		W	-	0,0885	0,00750
		P	-	0,1084	0,00310
2	Мольные доли составляющих сухой доменный газ	CO ₂	-	0,084	0,003
		CO	-	0,276	0,003
		O ₂	-	0,010	0,003
		H ₂	-	0,018	0,003
3	Поток сжигаемой угольной взвеси	\dot{P}	кг/с	1,6500	0,00628
4	Поток сухого доменного газа	$n_{г.с.}$	кмоль/с	0,0742	0,00064
5	Поток отводимого шлака	$\dot{G}_{шл}$	кг/с	0,0372	$1,117 \cdot 10^{-6}$

Продолжение таблицы 4.3

№ п.п	Величина	Обозначение	Размерность	Результат измерения	Средняя абсолютная погрешность
6	Поток золы, отводимой из камеры сжигания	$\dot{G}_з$	кг/с	0,00040	$0,119 \cdot 10^{-6}$
7	Поток золы, отводимой из циклона	$\dot{G}_{зц}$	кг/с	0,0073	$0,217 \cdot 10^{-6}$
8	Массовая доля углерода в шлаке	$C_{ш}$	-	0,010	0,00104
	— в золе камеры сгорания	$C_з$	-	0,023	0,0010
	— в золе из циклона	$C_{зц}$	-	0,071	0,0034
	— в золе, уносимой с продуктами сгорания	$C_{ун}$	-	0,071	0,0034
9	Мольные доли компонентов сухих продуктов сгорания	$[CO_2]$	-	0,138	0,003
		$[O_2]$	-	0,060	0,003

Субстанциональный баланс процесса горения в топке котла и уравнения сумм мольных и массовых долей составляют систему уравнений условий:

Баланс углерода

$$\dot{P} \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} \right) + \dot{n}_{г.с.} ([CO_2] + [CO]) = \dot{n}_{с.гс} [CO_2] + \frac{1}{12} \left(\dot{G}_{ш} C_{ш} + \dot{G}_з C_з + \dot{G}_{зц} C_{зц} + \dot{G}_{ун} C_{ун} \right). \quad (4.32)$$

Баланс свободного кислорода

$$\dot{P} \left(\frac{0}{32} - \frac{h}{4} \right) + \dot{n}_{гс} \left([CO_2] + \frac{1}{2}[CO] + O_2 - \frac{1}{2}[H_2] \right) + 0,21 \dot{n}_a = \dot{n}_{сгс} ([CO_2] + [O_2]) \quad (4.33)$$

Баланс азота

$$\dot{P} \frac{n}{28} + \dot{n}_{гс} [N_2] + 0,79 \dot{n}_a = \dot{n}_{сгс} [N_2] \quad (4.34)$$

Баланс минеральной части

$$\dot{P} \cdot p \cdot \alpha = \dot{G}_{ш} (1 - C_{ш}) + \dot{G}_з (1 - C_з) + \dot{G}_{зц} (1 - C_{зц}) + \dot{G}_{ун} (1 - C_{ун}). \quad (4.35)$$

$$C+h+S+n+O+p+W=1 \quad (4.36)$$

$$[\text{CO}_2]+[\text{CO}]+[\text{O}_2]+[\text{H}_2]+[\text{N}_2]=1 \quad (4.37)$$

$$[\text{CO}_2]''+[\text{O}_2]''+[\text{N}_2]''=1 \quad (4.38)$$

В уравнении (4.4) величина α означает контракцию (угар) минеральной части топлива ($\alpha=0,85$ для котлов на угольной пыли). Из уравнений (4.38),(4.39) и (4.40) определяются величины $O, [\text{N}_2], [\text{N}_2]''$, не измеряемые непосредственно, и вводятся в уравнения (4.33) и (4.35).

Получается система четырех уравнений с тремя неизвестными $\dot{n}_{\text{с.пс}}, \dot{n}_a$ и $\dot{G}_{\text{ун}}$.

$$\dot{P}\left(\frac{C}{12}+\frac{S}{32}\right)+\dot{n}_{\text{гс}}([\text{CO}_2]+[\text{CO}])-\dot{n}_{\text{с.пс}}[\text{CO}_2]''-\frac{1}{2}\left(\dot{G}_{\text{ш}}\cdot C_{\text{ш}}+\dot{G}_3\cdot C_3+\dot{G}_{\text{зц}}\cdot C_{\text{зц}}+\dot{G}_{\text{ун}}\cdot C_{\text{ун}}\right)=0 \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} \dot{P}\frac{1}{32}(1-C-9h-S-n-W-P)+\dot{n}_{\text{гс}}\left([\text{CO}_2]+\frac{1}{2}[\text{CO}]+[\text{O}_2]-\frac{1}{2}[\text{H}_2]\right)+ \\ +0,21\dot{n}_a-\dot{n}_{\text{с.пс}}([\text{CO}_2]''+[\text{O}_2]'')=0 \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\dot{P}\frac{1}{28}+\dot{n}_{\text{гс}}(1-[\text{CO}_2]-[\text{CO}]-[\text{O}_2]-[\text{H}_2])+0,79\dot{n}_a-\dot{n}_{\text{с.пс}}(1-[\text{CO}_2]''-[\text{O}_2}'')=0 \quad (4.41)$$

$$\dot{P}\cdot P\alpha-\dot{G}_{\text{ш}}(1-C_{\text{ш}})-\dot{G}_3(1-C_3)-\dot{G}_{\text{зц}}(1-C_{\text{зц}})-\dot{G}_{\text{ун}}(1-C_{\text{ун}})=0 \quad (4.42)$$

Согласование субстанционального баланса котла производится в соответствии с методикой [100]. Для этой цели определяются значения неизвестных и несходимость W_2 в уравнении (4.41).

$$\dot{n}_{\text{с.пс}}=0,82758\frac{\text{кмоль}}{\text{с}}, \dot{n}_a=0,78189\frac{\text{кмоль}}{\text{с}}$$

$$\dot{G}_u=0,11253\text{кг/с}, W_2=-0,00678\text{кмоль/с}$$

Необходимые при согласовании коэффициенты a_{ki} , а также b_{ki} представлены в Таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Частные производные в уравнениях условий a_{ki} и b_{ki} в субстанциональном балансе процесса сгорания топлива.

k	i																					l					
	1 C	2 H	3 S	4 N	5 W	6 p	7 \dot{n}_{gs}	8 \dot{n}_{gs}	9 [CO]	10 [O ₂]	11 \dot{p}	12 \dot{n}_{gs}	13 \dot{G}_z	14 \dot{G}_p	15 \dot{G}_{pc}	16 C_z	17 C_p	18 C_{pc}	19 C_u	20 [CO ₂]	21 [O ₂]	1 \dot{n}_{ss}	2 \dot{n}_a	3 \dot{G}_u			
16(23)	$\frac{\dot{p}}{12}$	0	$\frac{\dot{p}}{32}$	0	0	0	\dot{n}_{gs}	\dot{n}_{gs}	0	0	$\frac{C}{12} + \frac{S}{32}$	[CO ₂]+[CO]	$-\frac{C_z}{12}$	$-\frac{C_p}{12}$	$-\frac{C_{pc}}{12}$	$-\frac{\dot{G}_z}{12}$	$-\frac{\dot{G}_p}{12}$	$-\frac{\dot{G}_{pc}}{12}$	$-\frac{\dot{G}_u}{12}$	$-\dot{n}_{ss}$	0	-[CO ₂]	0	0	$-\frac{C_u}{12}$		
17(24)	$-\frac{\dot{p}}{32}$	$-\frac{\dot{p}}{32}$	$-\frac{\dot{p}}{32}$	$-\frac{\dot{p}}{32}$	$-\frac{\dot{p}}{32}$	$-\frac{\dot{p}}{32}$	\dot{n}_{gs}	$\frac{1}{2}\dot{n}_{gs}$	\dot{n}_{gs}	$-\frac{1}{2}\dot{n}_{gs}$	$\frac{1}{32}$	$\begin{pmatrix} 1-C- \\ -9H- \\ -S-O- \\ -P-W \end{pmatrix}$	[CO ₂]+ $\frac{1}{2}$ [CO]	0	0	0	0	0	0	0	0	$-\dot{n}_{ss}$	$-\dot{n}_{ss}$	-[CO ₂]	-[O ₂]	0, 21	0
18(25)	0	0	0	$\frac{\dot{p}}{28}$	0	0	$-\dot{n}_{gs}$	$-\dot{n}_{gs}$	$-\dot{n}_{gs}$	$-\dot{n}_{gs}$	$\frac{n}{28}$	1-[CO ₂]-[CO]	0	0	0	0	0	0	0	0	\dot{n}_{ss}	\dot{n}_{ss}	-1+[CO ₂]	+ [O ₂]	0, 79	0	

Продолжение таблицы 4.4.

k	i																				l				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	1	2	3	
	C	H	S	N	W	p		[CO ₂]	[CO]	[O ₂]	\dot{p}	\dot{n}_{gs}	\dot{G}_z	\dot{G}_p	\dot{G}_{pc}	C_z	C_p	C_{pc}	C_u	[CO ₂]	[O ₂]	\dot{n}_{ss}	\dot{n}_a	\dot{G}_u	
19(26)	0	0	0	0	0	\dot{p}_a	0	0	0	0	\dot{p}_a	0	$-(1-C_z)$	$-(1-C_p)$	$-(1-C_{pc})$	\dot{G}_z	\dot{G}_p	\dot{G}_{pc}	\dot{G}_u	0	0	0	0	0	$-(1-C_u)$

Система уравнений, позволяющих вычислить поправки к измеренным величинам V_i следующая:

$$\begin{aligned}
& \frac{\dot{p}}{12} v_1 + \frac{\dot{p}}{32} v_3 + \dot{n}_{gs} v_7 + \dot{n}_{gs} v_8 + \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} \right) v_{11} + ([CO_2] + [O_2]) v_{12} - \frac{C_z}{12} v_{13} - \frac{C_p}{12} v_{14} - \\
& - \frac{C_{ps}}{12} v_{15} - \frac{\dot{G}_z}{12} v_{16} - \frac{\dot{G}_p}{12} v_{17} - \frac{\dot{G}_{ps}}{12} v_{18} - \frac{\dot{G}_u}{12} v_{19} - \dot{n}_{ss} v_{20} - [CO_2]'' y_1 - \frac{C_u}{12} y_3 = 0 \\
& - \frac{\dot{p}}{32} (v_1 + 9v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6) + \dot{n}_{gs} \left(v_7 + \frac{1}{2} v_8 + v_9 - \frac{1}{2} v_{10} \right) + \frac{1}{32} \left(\frac{1-C-9H-S}{N-P-W} \right) v_{11} + \\
& + \left([CO_2] + \frac{1}{2} [CO] + [O_2] - \frac{1}{2} [H_2] \right) v_{12} - \dot{n}_{ss} (v_{20} - v_{21}) - ([CO_2]'' + [O_2]'' y_1 + 0,21 y_2 = W_2 \\
& \frac{\dot{p}}{28} v_4 - \dot{n}_{gs} (v_7 + v_8 + v_9 + v_{10}) + \frac{n}{28} v_{11} + (1 - [CO_2] - [CO] - [O_2] - [H_2]) v_{12} + \\
& + \dot{n}_{ss} (v_{20} + v_{21}) - (1 - [CO_2]'' + [O_2]'' y_1 + 0,79 y_2) = 0 \\
& \dot{P} a v_6 + P a v_{11} = (1 - C_z) v_{13} - (1 - C_p) v_{14} - (1 - C_{pc}) v_{15} + \dot{G}_z v_{16} + \dot{G}_p v_{17} + \\
& + \dot{G}_{pc} v_{18} + \dot{G}_u v_{19} - (1 - C_u) y_3 = 0
\end{aligned} \tag{4.43}$$

$$m_1^{-2} v_1 = \frac{\dot{p}}{12} k_1 - \frac{\dot{p}}{12} k_2;$$

$$m_2^{-2} v_2 = -\frac{9\dot{p}}{32} k_2;$$

$$m_3^{-2} v_3 = \frac{\dot{p}}{32} k_1 - \frac{\dot{p}}{32} k_2;$$

$$m_4^{-2} v_4 = -\frac{\dot{p}}{32} k_2 + \frac{\dot{p}}{28} k_3;$$

$$m_5^{-2} v_5 = -\frac{\dot{p}}{32} k_2;$$

$$m_6^{-2} v_6 = -\frac{\dot{p}}{32} k_2 - \dot{p} a k_4;$$

$$m_7^{-2} v_7 = \dot{n}_{gs} (k_1 + k_2 - k_3);$$

$$m_8^{-2} v_8 = \dot{n}_{gs} \left(k_1 + \frac{1}{2} k_2 - k_3 \right);$$

$$m_9^{-2} v_9 = \dot{n}_{gs} (k_1 - k_3);$$

$$m_{10}^{-2} v_{10} = -\dot{n}_{gs} \left(\frac{1}{2} k_2 + k_3 \right);$$

$$m_{11}^{-2}v_{11} = \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32}\right)k_1 - \frac{1}{32}(1-C-9H-S-N-P-W)k_2 + \frac{N}{28}k_3 + Pak_4;$$

$$m_{12}^{-2}v_{12} = ([CO_2]-[CO])k_1 + \left([CO_2] + \frac{1}{2}[CO] + [O_2] - \frac{1}{2}[H_2]\right)k_2 - (1-[CO_2]-[CO]-[O_2]-[H_2])k_3;$$

$$m_{13}^{-2}v_{13} = -\frac{C_z}{12}k_1 - (1-C_z)k_4;$$

$$m_{14}^{-2}v_{14} = -\frac{C_p}{12}k_1 - (1-C_p)k_4;$$

$$m_{15}^{-2}v_{15} = -\frac{C_{pc}}{12}k_1 - (1-C_{pc})k_4;$$

$$m_{16}^{-2}v_{16} = -\frac{\dot{G}_z}{12}k_1 - \dot{G}_z k_4;$$

$$m_{17}^{-2}v_{17} = -\frac{\dot{G}_p}{12}k_1 - \dot{G}_p k_4;$$

$$m_{18}^{-2}v_{18} = -\frac{\dot{G}_{pc}}{12}k_1 - \dot{G}_{pc} k_4;$$

$$m_{19}^{-2}v_{19} = -\frac{\dot{G}_u}{12}k_1 - \dot{G}_u k_4;$$

$$m_{20}^{-2}v_{20} = -\dot{n}_{ss} k_1 - \dot{n}_{ss} k_2 + \dot{n}_{ss} k_3;$$

$$m_{21}^{-2}v_{21} = -\dot{n}_{ss} k_2 + \dot{n}_{ss} k_3;$$

$$-[CO_2]''k_1 - ([CO_2]'' + [O_2]'')k_2 - (1-[CO_2]'' + [O_2]'')k_3 = 0;$$

$$0,21k_2 + 0,79k_3 = 0;$$

$$-\frac{C_u}{12}k_1 - (1-C_u)k_4 = 0.$$

Средние абсолютные погрешности измеряемых величин m_i

представлены в Таблице 4.5. Результаты, полученные после введения данных и решения системы уравнений условий представлены в Таблице 4.6.

Таблица 4.5 - Значение величин измеренных и неизвестных в результате согласования субстанциональных балансов процесса сгорания топлива

№ п.п	Величина	Обозначение	Размерность	Поправка	Величина после согласования
1	Массовые доли элементного состава угля	C	-	0,00033	0,63933
		h	-	0,00014	0,03814
		S	-	0,00013	0,00783
		n	-	0,00011	0,01111
		W	-	0,00098	0,08948
		p	-	0,00017	0,10857
2	Мольные доли сухого газового топлива (доменный газ)	[CO ₂]	-	0,00031	0,08369
		[CO]	-	0,00019	0,27581
		[O ₂]	-	0,00028	0,00972
		[H ₂]	-	0,00005	0,01805
3	Поток сжигаемой угольной пыли	\dot{P}	кг/с	0,00002	1,65002
4	Поток сжигаемого сухого доменного газа	$\dot{n}_{гс}$	кмоль/с	-0,00029	0,07391
5	Поток отводимого шлака	$\dot{G}_{ш}$	кг/с	0,0	0,0372
6	Поток золы, отводимой из камеры сгорания	$\dot{G}_з$	кг/с	0,0	0,0040
7	Поток золы, отводимой из циклона	$\dot{G}_{зц}$	кг/с	0,0	0,0073

№ п.п	Величина	Обозначение	Размерность	Поправка	Величина после согласования
8	Массовые доли углерода в шлаке, в золе, в золе из циклона, в золе, уносимой продуктами сгорания	$C_{ш}$	-	0,0	0,010
		$C_з$	-	0,0	0,023
		$C_{зи}$	-	0,0	0,071
		$C_{ун}$	-	0,0	0,71
9	Мольные доли компонентов сгорания	$[CO_2]$	-	0,0034	0,1414
		$[O_2]$	-	0,0025	0,0625
10	Поток сухих продуктов	$\dot{n}_{с.пс}$	кмоль/с	-0,02035	0,80723
11	Поток сухого воздуха	\dot{n}_a	кмоль/с	-0,02693	0,75496
12	Количество уносимой золы	\dot{G}	кг/с	0,00026	0,11279
13	Несходимость	W_2	-	-	-0,00012

Степень увлажнения продуктов сгорания можно вычислить из уравнения баланса водорода

$$\dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{H_2O} + X_{в.а} \cdot \dot{n}_a + X_{в.г} \cdot \dot{n}_{г.с} = \dot{n}_{с.пс} \cdot X''_в \quad (4.44)$$

откуда $X''_в = 0,009907$ кмоль H_2O /кмоль сух.пр.сгор.

В уравнении (4.44) основные величины скорректированы, а так же степень увлажнения воздуха составляет

$$X_{в.а} = 0,03648 \text{ кмоль } H_2O / \text{кмоль сухого воздуха}, \quad (4.45)$$

Степень увлажнения доменного газа составляет

$$X_{в.г} = 0,07882 \text{ кмоль } H_2O / \text{кмоль сухого газа}. \quad (4.46)$$

Плотность золы в уходящих продуктах сгорания составляет

$$\rho_{ун} = \frac{\dot{G}_{ун}}{\dot{n}_{с.пс}} = 0,140 \text{ кг/кмоль}. \quad (4.47)$$

б) Уточнение субстанциальных балансов в процессах сжигания, метод случайного поиска при наличии граничной функции.

Ниже в Таблице 4.6 приведены исходные данные, заимствованные из предыдущего раздела а). Исходные данные и вся задача согласования рассмотрены в системе СИ в соответствии с российской технической традицией.

Таблица 4.6 - Исходные величины к топочному процессу

№ п.п	Величина	Обозначение	Размерность	Измерение	Погрешность δ_i
1	Поток угольной пыли на сжигание	G_i	кг/с	1,6500	0,00628
2	Состав твердого топлива	C	-	0,6390	0,00500
		H	-	0,0380	0,00095
		S	-	0,0077	0,00270
		N	-	0,0110	0,00220
		W	-	0,0885	0,0750
		A	-	0,1084	0,0310
3	Сухое газовое топливо	O	-	0,1074	0,00280
		m'_{CO_2}	кг/с	0,2722	0,00081
		m'_{CO}	кг/с	0,57078	0,00171
		m'_{O_2}	кг/с	0,0237	0,00071
		m'_{H_2}	кг/с	0,00267	0,00008
		m'_{N_2}	кг/с	1,27149	0,051
4	Воздух на сжигание	$G_{воз}$	кг/с	22,646	6,6
5	Продукты сгорания, сухие	m''_{CO_2}	кг/с	5,0250	0,015
		m''_{O_2}	кг/с	1,5889	0,0047
		m''_{N_2}	кг/с	18,584	0,055
6	Влага в продуктах сгорания	m''_{H_2O}	кг/с	1,4757	$0,05 \cdot 10^{-2}$

№ п.п	Величина	Обозначение	Размерность	Измерение	Погрешность δ_i
7	Углерод в продуктах сгорания	m''_{CO}	кг/с	0,006	$0,05 \cdot 10^{-2}$
	Твердая фаза на выходе	m''_M	кг/с	0,1493	$0,05 \cdot 10^{-2}$

Постановка задачи

Используя исходные данные Таблицы 4.5 произвести снижение неопределенности результатов экспериментального исследования в топке котлоагрегата угольной пыли и доменного газа, используя методику случайно-направленного поиска при применении условий.

Система уравнений субстанциального баланса:

- баланс углерода:

$$G_T \cdot C + \frac{12}{44} m'_{CO_2} + \frac{12}{28} m'_{CO} = \frac{12}{44} m''_{CO_2} + G_T \cdot A \cdot C_A \quad (4.48)$$

где C_A - среднее содержание углерода в минеральном остатке.

- баланс кислорода:

$$G_T \cdot O + 0,23G_B + \frac{32}{44} m'_{CO_2} + \frac{16}{18} m'_{CO} + m'_{O_2} = \frac{32}{44} m''_{CO_2} + m''_{O_2} + \frac{16}{18} m^*_{H_2O} \quad (4.49)$$

- баланс азота:

$$G_T \cdot N + m'_{N_2} + 0,77G_B = m'_{N_2} \quad (4.50)$$

Согласование уравнений

- уравнение баланса углерода:

$$G_T \cdot C + 0,2727m'_{CO_2} + 0,4286m'_{CO} = 0,2727m''_{CO_2} + C''_A \quad (4.51)$$

Среднее содержание углерода в минеральном остатке, по данным лабораторного анализа и расчетам, составило $C_A = 0,04$, а в расчете на поток твердого топлива G_T , кг/с:

$$C''_A = 1,65 \cdot 0,1084 \cdot 0,85 \cdot 0,04 = 0,006$$

Решаем уравнение баланса углерода методом случайно-направленного поиска при наличии граничного условия.

Нулевое уравнение баланса при подстановке исходных данных

$$1,65 \cdot 0,6390 + 0,2727 \cdot 0,2742 + 0,4286 \cdot 0,5334 = 0,2727 \cdot 5,0250 + 0,006$$

$$\text{Deb}_{\text{в}_0} = 0,0864; \delta_0 = \frac{0,0864}{1,4567} = 0,057(5,87\%)$$

Первая итерация в соответствии с методикой

$$(1,60 + 0,099 \cdot 0,8)(0,6230 + 0,03195 \cdot 0,3) + 0,2727(0,2626 + 0,0192 \cdot 0,3) + \\ + 0,4286(0,5619 + 0,0126 \cdot 0,4) = 0,2727(4,9496 + 0,03 \cdot 0,4) + 0,006$$

$$\text{Deb}_{\text{в}_1} = 1,3787 - 1,3590 = 0,0196; \delta_1 = \frac{0,0196}{1,3787} = 0,0142(1,42\%)$$

Вторая итерация по пути тренда

$$(1,6792 + 0,099 \cdot 0,2)(0,6104 + 0,0395 \cdot 0,3) + 0,2727(0,2608 + 0,0192 \cdot 0,3) + \\ + 0,4286(0,5470 + 0,03829 \cdot 0,4) = 1,3708;$$

$$0,2727(4,9797 + 1,507 \cdot 0,3) + 0,006 = 1,3762$$

$$\text{Deb}_{\text{в}_2} = 1,3708 - 1,3762 = -0,0055; \delta_2 = \frac{|0,0055|}{1,3762} = 0,00399(\sim 0,4\%)$$

Получено после согласования

$$G_{\text{T}} = 1,7 \text{ кг/с}; \quad m''_{\text{CO}_2} = 5,0249 \text{ кг/с};$$

$$m'_{\text{CO}_2} = 0,2665 \text{ кг/с}; \quad C = 0,622;$$

$$m'_{\text{CO}} = 0,5623 \text{ кг/с}.$$

- уравнение баланса кислорода:

$$G_{\text{T}} \cdot O + 0,23G_{\text{в}} + 0,7272m'_{\text{CO}_2} + 0,5714m'_{\text{CO}} + m'_{\text{O}_2} = 0,7272m''_{\text{CO}_2} + m''_{\text{O}_2} + 0,888m^*_{\text{H}_2\text{O}},$$

где $m^*_{\text{H}_2\text{O}} = 0,30618 \text{ кг/с}$ – количество водяных паров, образовавшихся в результате сгорания водорода, поступающего в зону горения из твердого топлива Н и из газового m'_{H_2} ,

$O = 0,1074$ - содержание кислорода в твердом топливе.

Нулевое уравнение

$$1,65 \cdot 0,1074 + 0,23 \cdot 22,646 + 0,7272 \cdot 0,2772 + 0,5714 \cdot 0,5734 + 0,0227 = \\ = 0,7272 \cdot 5,025 + 1,5889 + 0,888 \cdot 0,30618$$

$$\text{Небаланс } \text{Deb}_{\text{в}_0} = 0,4199 \quad \delta = \frac{0,4199}{5,9350} = 0,0707(7,07\%)$$

Первая итерация

В соответствии с методикой составляется уравнение 1-ой итерации, при этом генератор случайных чисел выдал следующие коэффициенты к соответствующим величинам:

$$\alpha_1(G) = 0,8; \quad \alpha_2(O) = 0,4; \quad \alpha_3(G_b) = 0,4; \quad \alpha_4(m'_{CO_2}) = 0,3; \quad \alpha_5(m'_{CO}) = 0,1;$$

$$\alpha_6(m'_{O_2}) = 0,3; \quad \alpha_7(m''_{CO_2}) = 0,4; \quad \alpha_8(m''_{O_2}) = 0,5; \quad \alpha_9(m^*_{H_2O}) = 0,5;$$

При решении этого уравнения был получен небаланс $Deb_{b_1} = 0,2918$, относительная погрешность $\delta = 0,0506(5,06\%)$

Вторая итерация

За исходное уравнение принято нулевое уравнение

При этом методом случайного выбора получено $\alpha_1 = 0,4; \alpha_2 = 0,7; \alpha_3 = 0,7;$

$$\alpha_4 = 0,4; \quad \alpha_5 = 0,5; \quad \alpha_6 = 0,4; \quad \alpha_7 = 0,4; \quad \alpha_8 = 0,7; \quad \alpha_9 = 0,7;$$

Небаланс уравнения второй итерации составил $Deb_{b_2} = 0,4275$, относительная погрешность $\delta = 0,0726(7,26\%)$

Возврат к нулевому уравнению

Третья итерация

Методом случайного выбора, при применении генератора случайных чисел, были получены коэффициенты:

$$\alpha_1 = 0,4; \quad \alpha_2 = 0,4; \quad \alpha_3 = 0,6; \quad \alpha_4 = 0,6; \quad \alpha_5 = 0,5; \quad \alpha_6 = 0,6; \quad \alpha_7 = 0,4; \quad \alpha_8 = 0,5;$$

Небаланс в третьей итерации составил $Deb_{b_2} = 0,2866$, относительная погрешность $\delta = 0,049(4,9\%)$

Таким образом третья итерация дает уравнение баланса, являющиеся исходным для четвертой итерации.

Четвертая итерация

Исходное уравнение – 3-ой итерации, при этом $\left(\dot{p}O\right)$ рассматривается как единое слагаемое баланса $\alpha\left(\dot{p}O\right) = 0,5$, остальные коэффициенты получены:

$$\alpha_3 = 0,3; \quad \alpha_4 = 0,6; \quad \alpha_5 = 0,5; \quad \alpha_6 = 0,5; \quad \alpha_6 = 0,6; \quad \alpha_7 = 0,4; \quad \alpha_8 = 0,5; \quad \alpha_9 = 0,5;$$

Небаланс $Deb_{B_2} = -0,0307$, относительная погрешность $\delta = 0,0056(0,56\%)$

Из расчета получено:

$$G_T = 1,6509; \quad m''_{CO_2} = 4,9148;$$

$$m'_{CO_2} = 0,2710; \quad m''_{O_2} = 1,6083$$

$$m'_{CO} = 0,5518 \quad m'_{O_2} = 0,0234.$$

- уравнение баланса азота

$$G_T \cdot N + m'_{N_2} + 0,77G_B = m''_{N_2}$$

Решение уравнения нулевой вариант

$$1,65 \cdot 0,011 + 1,2715 + 0,77 \cdot 22,646 = 18,584$$

$$0,0181 + 1,2715 + 14,4377 = 18,7273$$

Небаланс $Deb_{\epsilon_0} = -0,1433$, $\delta = 0,00765(0,765\%)$

Первая итерация

$$(1,600 + 0,0165 \cdot 0,4)(0,0088 + 0,0022 \cdot 0,6) + (1,2932 + 0,0763 \cdot 0,5) + \\ + 0,77(19,25 + 5,48 \cdot 0,5) - (18,0265 + 1,1504 \cdot 0,2) = 0,0176 + 1,2714 + \\ + 16,930 - 18,2495 = -0,0305$$

Небаланс $Deb_B = -0,0305$, относительная погрешность $\delta = 0,00167(0,167\%)$

Из расчета получится

$$G_T = 1,6066; \quad m''_{N_2} = 18,2386;$$

$$G_B = 21,987; \quad m'_{CO_2} = 0,2710;$$

Анализ результатов:

При сравнении результатов расчетов получено, что значение одинаковых величин из расчетов в разных уравнениях могут несколько отличаться друг от друга. Это нормально, если отличие не превосходит 1%.

Максимальное отклонение получено при определении \dot{p} кг/с, оно составляет 0,0934, что составляет менее 1%. Принято среднее значение из трех величин $\dot{p}(C)$, $\dot{p}(O)$, $\dot{p}(N)$ т.е. $\dot{P} = 1,6520$ кг/с. Остальные величина имеют незначительные расхождения. В этом случае предпочтение отдавалось той величине, уравнения согласования которой имеет меньшую относительную погрешность.

Таблица 4.7 - Результаты сравнения расчетов субстанциального баланса топочного процесса по методике [100] и предлагаемой методике случайного поиска

№ пп	Величина	Обозначение	Размерность	Величина согласования	Величина после согласования по методике [100]	Величина согласования по предлагаемой методике
1	Твердое топливо	G_T	кг/с	1,6500	1,6500	1,6520
2	Поток углерода	m'_C	кг/с	1,0543	1,0543	1,0560
3	Топливо доменный газ сухой	m'_{CO_2} m'_{CO} m'_{O_2} m'_{H_2} m'_{N_2}	кг/с кг/с кг/с кг/с кг/с	0,2742 0,5734 0,227 0,237 1,2715	0,2731 0,5711 0,0226 0,0236 1,2663	0,2665 0,5623 0,0234 0,0237 1,2714
4	Водяной пар в составе газа	$m'_{H_2O_T}$	кг/с	0,1052	0,1052	0,1052
5	Воздух сухой	G_B	кг/с	22,642	21,863	21,987
6	Влага в составе воздуха	$m'_{H_2O_B}$	кг/с	0,512	0,495	0,498
7	Продукты сгорания сухие	m''_{CO_2} m''_{O_2} m''_{N_2}	кг/с кг/с кг/с	5,0250 1,5889 18,584	5,0222 1,6144 17,9938	4,9648 1,6083 18,2386
8	Влага в продуктах сгорания	$m''_{H_2O_{nc}}$	кг/с	1,4395	1,4392	1,4382
9	Минеральный остаток	m''_{min}	кг/с	0,1522	0,1522	0,1522
10	Небаланс	$\delta(x, y)$	-	0,0106 1,06%	0,0017 0,17%	0,0007 0,07%

Из анализа Таблицы 4.7 следует:

1. Технический эксперимент был выполнен с точностью 1,06%;

2. Согласование балансов по методике [100] позволило несколько снизить неопределенность информации в эксперименте (0,17%);
3. Согласование балансов по методу случайно-направленного поиска, при наличии граничного условия, позволило получить наилучший результат по снижению неопределенности информации (0,07%);
4. Сравнивая объемы и трудоемкость расчетов по методикам, можем отметить, что расчеты по предлагаемому методу наиболее компактны и наименее трудоемки. Предлагаемый метод имеет явные преимущества для программирования и быстрого действия, что позволяет рекомендовать эту методику для разработки компьютерного сопровождения функционирования ТЭУ.

Таким образом:

1. Применение метода согласования балансов случайно-направленным поиском с граничным условием уточняет информацию о топочном процессе по сравнению с применением метода субстанциального баланса (метод Я. Шаргута). При этом достоверность данных о выходах продуктов горения увеличивается в 2 раза;
2. Объем подготовительной работы и расчетов по формулам для решения по методу согласования балансов случайно-направленным поиском значительно меньше объема по методу Я. Шаргута;

4.5 Исследование снижения неопределенности в процессе сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий путем использования согласования субстанциальных балансовых уравнений методом случайно-направленного поиска при наличии граничного условия

В качестве примера рассмотрен расчетный эксперимент, моделирующий реальную ситуацию процесса сжигания водоугольного топлива в топке котлоагрегата [116].

В качестве топлива принята тонкодисперсная водоугольная суспензия (ТД ВУС) на основе Кузнецкого каменного угля марки ОС с соотношением твердой и жидкой фазы по массе 0,6/0,4.

Состав топлива, принятого за эталон, рассчитан по данным [111], представлен ниже. ТД ВУС по элементному составу и рабочей массе дан в виде массива I исходных данных:

$$I \left\{ \begin{array}{l} C^P = 0,4645 \\ H^P = 0,0216 \\ N^P = 0,0088 \\ O^P = 0,0128 \\ S^P = 0,0023 \\ A^P = 0,0900 \\ W^P = 0,4000 \end{array} \right\} \text{ размерность кг/кг} \quad \sum K^P = 1,0000$$

Расчет процесса горения эталонного топлива произведен на основе стехиометрических реакций в соответствии со стандартной методикой [66].

Горение ТД ВУС в расчете на 1кг топлива.

$\alpha_b = 1,14$. Контракции (угара) нет.

$$\begin{aligned} V^0 &= 0,0889(C^P + 0,375S^P) + 0,265H^P - 0,0333O^P = \\ &= 0,0889(46,4488 + 0,375 \cdot 0,2300) + 0,265 \cdot 2,1611 - 0,0333 \cdot 1,2821 = \\ &= 4,66696 \text{ нм}^3/\text{кг.т.}; \end{aligned}$$

$$V^B = \alpha_b \cdot V^0 = 1,14 \cdot 4,66696 = 5,3203 \text{ нм}^3/\text{кг.т.};$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{1,866}{100} C^P = \frac{1,866}{100} \cdot 46,4488 = 0,8673 \text{ нм}^3/\text{кг.т.};$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{1,866}{100} S^P = \frac{1,866}{100} \cdot 0,08625 = 0,0016 \text{ нм}^3/\text{кг.т.};$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79V^B + 0,8 \frac{N^P}{100} = 0,79 \cdot 5,3203 + 0,8 \frac{0,8780}{100} = 4,2100 \text{ нм}^3/\text{кг.т.};$$

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}} &= 0,11H^P + 0,0124W^P + 0,0161V^B = 0,111 \cdot 2,1611 + 0,0124 \cdot 40 + \\ &+ 0,0161 \cdot 5,3203 = 0,82148 \text{ нм}^3/\text{кг.т.}; \end{aligned}$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha_b - 1)V^B = 0,21(1,41 - 1,0) \cdot 5,3203 = 0,1564 \text{ нм}^3/\text{кг.т.};$$

$$V_{\text{пс}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} = 6,0505 \text{ нм}^3/\text{кг.т.}$$

Мольный состав газообразных продуктов сгорания

$$\left. \begin{array}{l} [\text{CO}_2] = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{пс}}} = r_{\text{CO}_2} = 0,1433 \\ [\text{SO}_2] = r_{\text{SO}_2} = 0,0003 \\ [\text{N}_2] = r_{\text{N}_2} = 0,6948 \\ [\text{H}_2\text{O}] = r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1358 \\ [\text{O}_2] = r_{\text{O}_2} = 0,0250 \end{array} \right\} \sum_1^5 r_i = 1,0000$$

Массовый состав продуктов сгорания в расчете на 1кг топлива образует массив II исходных данных:

$$II \left\{ \begin{array}{l} m_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2} = 0,8673 \cdot 1,9643 = 1,7036 \text{ кг/кг.т.} \\ m_{\text{SO}_2} = V_{\text{SO}_2} \cdot \rho_{\text{SO}_2} = 0,0016 \cdot 2,9263 = 0,0047 \text{ кг/кг.т.} \\ m_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2} \cdot \rho_{\text{N}_2} = 4,2100 \cdot 1,2505 = 5,2646 \text{ кг/кг.т.} \\ m_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,82148 \cdot 0,8035 = 0,657 \text{ кг/кг.т.} \\ m_{\text{O}_2} = V_{\text{O}_2} \cdot \rho_{\text{O}_2} = 0,1564 \cdot 1,4286 = 0,2234 \text{ кг/кг.т.} \\ m_A = 0,0900 \text{ кг/кг.т.} \end{array} \right.$$

Зола (шлак) – минеральная часть, которая проходит зону горения без изменения массы (контракция отсутствует).

В массивы исходных данных I и II вносятся «погрешности измерений» в пределах относительных (абсолютных) погрешностей, возможных при реальном эксперименте. Эти «измеренные» величины представлены в Таблице 4.8.

Далее осуществляется согласование балансовых уравнений в соответствии с предлагаемым методом.

Система балансовых уравнений:

$$\text{- углерода: } C - \frac{12}{44}(m_{\text{CO}_2}) = \delta(x);$$

$$\text{- азота: } N + 0,766 \cdot G^B - m_{\text{N}_2} = \delta(x);$$

$$\text{- воды и водорода: } (0,111H + 0,0124W + 0,0161V^B) \rho_{\text{H}_2\text{O}} - m_{\text{H}_2\text{O}} = \delta(x);$$

- кислорода:

$$O + 0,2334G^B + \frac{16}{18}W + \frac{16}{18} \cdot 0,016G^B - \frac{32}{44}m_{CO_2} - \frac{16}{18}m_{H_2O} - m_{O_2} = \delta(x).$$

Решение приведенных выше уравнений, заключается в минимизации $\delta(x) \leq \delta_{\min}$ в соответствии с методикой.

Решение уравнений

Согласование баланса углерода:

$$C - \frac{12}{44}(m_{CO_2}) = \delta(x)_C.$$

Нулевое уравнение

$$0,44693 + \frac{12}{14} \cdot 1,7003 = -0,0209.$$

Первая итерация

$$(0,428258 + 0,7 \cdot 0,07246) - \frac{12}{44}(1,7003 + 0,4 \cdot 0,0102) = 0,0141.$$

Вторая итерация

$$(0,428258 + 0,5 \cdot 0,07246) - \frac{12}{44}(1,7003 + 0,3 \cdot 0,0102) = 0,0010.$$

Откуда: $C^P = 0,4650$; $m_{CO_2} = 1,7016$.

Согласование баланса азота:

Нулевое уравнение

$$N + 0,766 \cdot G^B - m_{N_2} = \delta(x).$$

Первая итерация

$$(0,007496 + 0,2 \cdot 0,003748) - 0,766(5,8437 + 0,7 \cdot 2,0636) - 5,2662 = -0,3347.$$

Вторая итерация

$$(0,007496 + 0,3 \cdot 0,003748) - 0,766(5,8437 + 0,5 \cdot 2,0636) - 5,2662 = -0,0217.$$

Откуда: $N^P = 0,00862$; $G^B = 6,8755$; $m_{N_2} = 5,2662$.

Согласование баланса влаги и водорода.

$$0,111H + 0,0124W + 0,0161V^B - V''_{H_2O} = \delta(x);$$

$$0,111 \cdot 2,178 + 0,0124 \cdot 37,0 + 0,0161 \cdot 5,3203 - 0,82016 = -0,0346.$$

Первая итерация

$$0,111(2,1236 + 0,3 \cdot 0,1088) + 0,0124(33 + 0,7 \cdot 6,72) + 0,0161(3,31 + 0,2 \cdot 1,4) - \\ - 0,82016 = 0,2393 + 0,4675 + 0,0578 - 0,82016 = 0,0555.$$

Вторая итерация

$$0,111(2,1236 + 0,4 \cdot 0,1088) + 0,0124(33 + 0,6 \cdot 6,72) + 0,0161(3,31 + 0,6 \cdot 1,4) - \\ - 0,82016 = 0,2406 + 0,4592 + 0,0668 - 0,82016 = -0,0535.$$

Третья итерация

$$0,111(2,1236 + 0,3 \cdot 0,1088) + 0,0124(33 + 0,9 \cdot 6,72) + 0,0161(3,31 + 0,8 \cdot 1,4) - \\ - 0,82016 = 0,2393 + 0,4842 + 0,0713 - 0,82016 = -0,0252.$$

Из последнего уравнения $H = 0,0216$; $W = 0,3905$.

Баланс кислорода:

$$O + 0,2334G^B + \frac{16}{18}W + \frac{16}{18} \cdot 0,016G^B = \frac{32}{44}m_{CO_2} + \frac{16}{18}m_{H_2O} + m_{O_2}.$$

При решении этого уравнения относительно O использованы согласованные выше величины:

$$G^B = 6,8755, \text{ кг/с};$$

$$W = 0,3905, \text{ кг/с};$$

$$m_{CO_2} = 1,7016, \text{ кг/с};$$

$$m_{H_2O} = 0,658, \text{ кг/с};$$

$$m_{O_2} = 0,222, \text{ кг/с}.$$

Тогда

$$O = \frac{32}{44}m_{CO_2} + \frac{16}{18}m_{H_2O} + m_{O_2} - 0,2334G^B - \frac{16}{18}W - \frac{16}{18} \cdot 0,016G^B = \\ = 1,2363 + 0,5837 + 0,2207 - 1,6060 - 0,3484 - 0,099 = 0,0128;$$

$$O = 0,0128.$$

Таблица 4.8. - Итоговая таблица по согласованию балансов

	№ п/п	Величина	Размерность	Эталон	Измеренные и согласованные величины				
					Измеренные	δ_i	m_i	J_i	Согласованные
Массив I G_i – ВХОДНЫЕ ПОТОКИ	1	C	кг/кг	0,46450	0,4469	0,078	0,0362	0,0724	0,4650
	2	H	кг/кг	0,02161	0,02177	0,025	0,00054	0,00108	0,02161
	3	N	кг/кг	0,00878	0,00937	0,020	0,000175 6	0,0035	0,00862
	4	O	кг/кг	0,01280	0,0132	0,010	0,000128	0,00256	0,0128
	5	H ₂ O	кг/кг	0,4000	0,3700	0,084	0,0366	0,0732	0,3905
	6	S	кг/кг	0,0023	0,0047	0,035	0,00008	0,00016	0,0047
	7	A	кг/кг	0,0900	0,0900	-	-	-	0,0900
	8	G_B	кг/с	6,8791	6,2063	-	-	-	6,8755
	9	$\sum G_i$	кг/с	7,8791	7,1657	-	-	-	7,8687
Массив II G_j – ВЫХОДНЫЕ ПО ТОКИ	10	m_{CO_2}	кг/с	1,7036	1,7003	0,003	0,0051	0,0102	1,7016
	11	m_{N_2}	кг/с	5,2646	5,2562	0,003	0,0157	0,0314	5,2662
	12	m_{H_2O}	кг/с	0,6570	0,6591	0,003	0,0197	0,00394	0,6580
	13	m_{O_2}	кг/с	0,2234	0,2230	0,003	0,00067	0,00133 2	0,2220
	14	m_{SO_2}	кг/с	0,0047	0,0047	0,003	0,000014 1	0,00002 82	0,0047
	15	m_A	кг/с	0,0900	0,0900	0,003	-	-	0,0900
	16	$\sum G_j$	кг/с	7,9433	7,9333	0,003	-	-	7,9425
	17	$ABS\delta$		0,0642	0,7676				0,0738
	18	отн. δ		0,00808	0,0967				0,00929

4.6 Выводы

1. Разработан метод случайно-направленного поиска с применением граничного условия, позволяющий получать с хорошим результатом (небаланс до 0,6%) коррекции измеренных на функционирующих энергоагрегатах входных параметров и приближением рассчитанных величин к их истинным значениям.
2. Применение разработанного метода случайно-направленного поиска с применением граничного условия позволяет уточнить результирующие данные по массовому составу выхода продуктов сгорания ТД ВУС. Относительная величина небаланса в этом случае составляет не более 1%.

ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ

В данной главе произведено сравнение эффективности технико-экономических показателей при использовании технологии ТД ВУС с традиционной технологией сжигания угольного топлива в энергетических котлоагрегатах; произведено сравнение эффективности технико-экономических показателей системы зажигания ТД ВУС с использованием плазменной технологией и традиционной системы зажигания с использованием растопочного топлива; оценено влияние системы зажигания на эффективность системы топливоиспользования при сжигании ТД ВУС.

5.1 Общий метод технико-экономического исследования в инновационных проектах

При оценке эффективности плазменной системы при сжигании ТД ВУС на ТЭС необходимо:

- произвести сравнение эффективности технико-экономических показателей при использовании ТД ВУС с традиционной технологией сжигания угольного топлива в энергетических котлоагрегатах;
- произвести сравнение эффективности технико-экономических показателей системы зажигания ТД ВУС с использованием плазменной технологии и традиционной системы зажигания с использованием растопочного топлива;
- оценить влияние системы зажигания на эффективность системы топливоиспользования при сжигании ВУС.

Основным методическим условием сравнения вариантов является их приведение к одинаковому энергетическому эффекту.

1. Во всех вариантах сравниваемых технологий в составе ТЭС, энергоблоков ТЭС принимаются равными номинальные мощности

электрогенераторов. Изменение мощности собственных нужд приводит к изменению мощности нетто ТЭС и полезного отпуска электроэнергии. Недоотпуск ее компенсируется из энергосистемы, что обуславливает затраты δZ_N .

Если варианты отличаются отпуском не только электроэнергии, но и тепловой энергии, недостаток ее компенсируется замещающей котельной, что вызовет затраты δZ_Q .

2. Вторым условием приведения сравниваемых вариантов к равному энергетическому эффекту является достижение заданной надежности энергообеспечения. Этот показатель выдерживается за счет изменения мощности аварийного и ремонтного резервов и приводит к затратам δZ_p .
3. Сопоставление вариантов, отличающихся разным количеством вредных выбросов, осуществляется с учетом предельно допустимых выбросов (ПДВ) вредных веществ. Приведение вариантов с разными расходами и видом сжигаемого топлива к одинаковому ПДВ обуславливает эксплуатационные затраты δZ_x в экологическую инфраструктуру, и затраты, вызванные компенсацией ущерба от загрязнения окружающей среды в виде затрат на воспроизводство качества экосистемы (восстановление биомассы) в ареале функционирования ТЭС, δZ_3 . Если фоновые приземные концентрации в ареале ТЭС выше ПДК, то во всех сравниваемых вариантах предусматриваются одинаковые ПДВ.

С учетом названных выше условий приведения к одному году эксплуатации, переменная часть затрат определяется формулой

$$\Delta Z = \delta B \cdot C_T + \sum \sigma_T \cdot K_T + \delta \theta_n + \sum \delta Z, \quad (5.1)$$

где δB - дополнительный готовый расход топлива ТЭС (или энергоблока), т/год; C_T - стоимость топлива, франко-бункер, определяется с учетом переработки, хранения и транспорта топлива, руб/т; σ_T - доля отчислений от

капиталовложений, 1/год; k_t - капиталовложения, определяемые по агрегатам технологии на ТЭС и включающие расходы на создания, монтаж, доставку оборудования на место строительства, техническое освоение, а также пропорционально отнесенные затраты на подготовку территории, возведение зданий и сооружений, проектно-изыскательские работы, объекты подсобного назначения, руб: $\delta\theta_n$ - дополнительные расходы по содержанию штатного эксплуатационного и ремонтного персонала (с учетом затрат в социальную инфраструктуру), руб/год.

$$\sum \delta z = \delta z_N + \delta z_Q + \delta z_P + \delta z_X + \delta z_3 \quad (5.2)$$

5.2 Экономическое и экологическое преимущества сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий в котлах угольных теплоэлектростанциях перед традиционными системами сжигания пылеугольного топлива

5.2.1 Экономические преимущества

Ранее была выполнена оценка капиталовложений в агрегаты, технические системы и в целом в энергоблок между традиционной технологией сжигания угля и технологией с использованием циклонного предтопка [93]. В капиталовложения в агрегаты и технические системы включены расходы на изготовление, монтаж, доставку оборудования на место строительства, а также затраты на инфраструктуру ТЭС.

Оценка технико-экономических показателей выполнялась для блоков широко используемых в энергетике России малой и средней мощности с котлами производительностью от 75 до 670 т/ч.

Удельные капитальные затраты на циклонный предтопок (ЦП) приняты на уровне 3500 долл/МВт тепловой мощности ЦП на проданное топливо[93]. Общий уровень капиталовложений в ЦП зависит от тепловой мощности топki котлоагрегата. Удельные капиталовложения в ЦП практически не

зависят от мощности энергоблока и составляют 2,1...5,4% от капиталовложений в КА.

Ниже на Рисунке 5.1 представлены удельные капиталовложения в котлоагрегат, топливоподачу и топливоприготовление, природоохранные системы для энергоблоков, работающих на ТД ВУС и традиционных пылеугольных энергоблоков.

Удельные капиталовложения в КА с ЦП для работы на ТД ВУС с увеличением мощности с 52 до 115 МВт практически не изменяются (≈ 425 долл/кВт), а со 115 до 220 МВт плавно снижаются с 425 до 375 долл/кВт. Капиталовложения в котлоагрегат энергоблока 12 МВт составляют 310 долл/кВт и обусловлены низкими параметрами пара (более дешевыми сталями, меньшей толщиной стенки и, соответственно, меньшей массой поверхностей нагрева).

Суммарные удельные капиталовложения в КА, топливоподачу и топливоприготовление, природоохранные системы для энергоблоков 12...220 МВт на ТД ВУС с увеличением мощности снижаются с 715 до 554 долл/кВт. Удельные капиталовложения в аналогичное оборудование для традиционной пылеугольной ТЭС находятся в диапазоне 922...737 долл/кВт, что на 29-33% больше, чем для энергоблоков с КА с ЦП для работы на КЖТ.

Меньшие капиталовложения в КА в схеме с ТД ВУС обусловлены меньшей стоимостью мельничного оборудования и смежных систем в котельном отделении, более плотными шагами труб поверхностей нагрева и меньшими массово-габаритными и стоимостными характеристиками собственно котла, более дешевыми сталями пароперегревателя (из-за меньшей температуры горения).

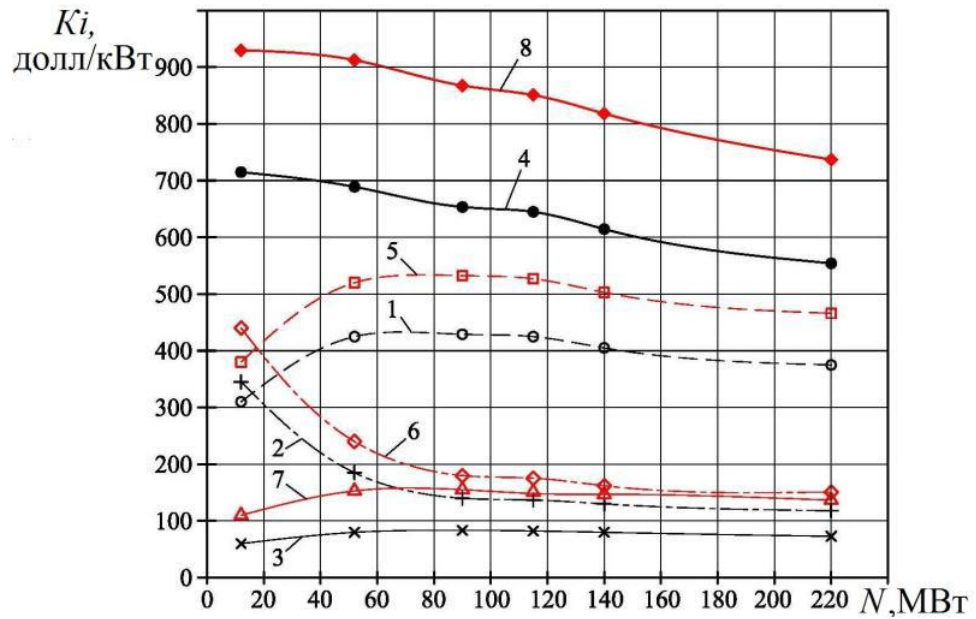


Рисунок 5.1 - Удельные капиталовложения K_i в котлоагрегат, топливоподачу и топливоприготовление, природоохранные системы: для ТЭС с ТД ВУС и ЦП: 1 – КА, 2 – топливоподача и топливоприготовление, 3 – природоохранные системы, 4 – суммарные капвложения в три агрегата; для традиционной пылеугольной ТЭС: 5 - КА, 6 – топливоподача и топливоприготовление, 7 – природоохранные системы, 8 – суммарные капвложения в три агрегата

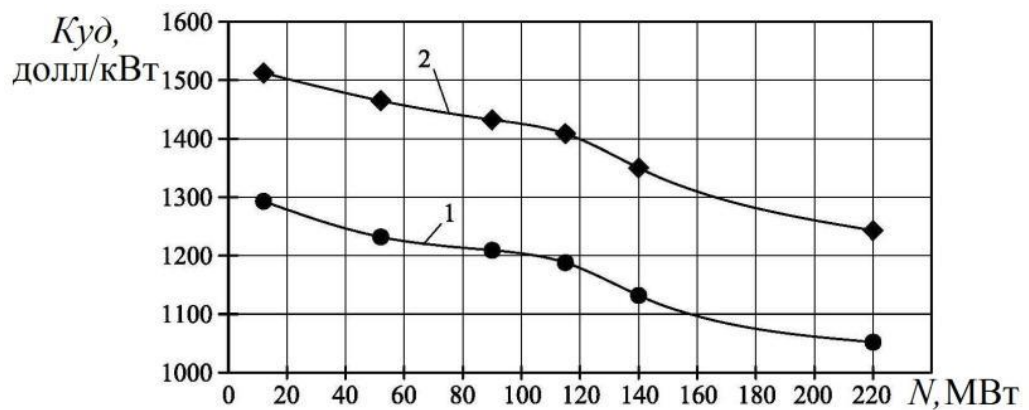


Рисунок 5.2 - Зависимость удельных капиталовложений в энергоблок $K_{уд}$ от отпускаемой мощности N :
1 – ТЭС с ТД ВУС, 2 – традиционная пылеугольная ТЭС.

Удельные капиталовложения в ЭБ с КА с ЦП для работы на ТД ВУС лежат в диапазоне от 1294 до 1052 долл/кВт, что ниже капиталовложений в традиционные пылеугольные энергоблоки (1512...1243 долл/кВт). Большую долю капиталовложений в ЭБ составляют капиталовложения в котлоагрегат и турбоагрегат, причем для ЭБ высокого давления доля котлоагрегата остается практически неизменной и составляет $\approx 35\%$, а доля турбоагрегата возрастает с 15 до 24%, при этом с учетом низкопотенциальной группы (включающей систему регенерации) доля турбогруппы составляет 23...33 %.

Удельные капиталовложения в природоохранные системы для ЭБ с КА с ЦП для работы на ТД ВУС составляют 61...85 долл/кВт или 5...7% от суммарных капиталовложений, а для традиционных пылеугольных энергоблоков 109...156 долл/кВт или 7...11% от суммарных капиталовложений.

Капиталовложения в энергоблок с котлоагрегатом с ЦП для работы на ТД ВУС (не во всю станцию, без учета изыскательных и проектных работ) для мощностей 12...220 МВт лежат в диапазоне от 1293 до 1052 долл/кВт и в среднем на 15 % ниже капиталовложений в традиционные пылеугольные энергоблоки (1512...1243 долл/кВт). Снижение величины общих капиталовложений в энергоблок на ТД ВУС по сравнению с традиционными пылеугольными энергоблоками обусловлено снижением капиталовложений в КА (на 19 %), систему топливоподачи и топливоприготовления (на 22%), природоохранные системы (на 45%). [93].

5.2.2 Экологические преимущества

Тонкодисперсное водоугольное энергетическое топливо (ТД ВУТ) – это вид топлива, технология производства которого находится в развитии, и поэтому топливные и экологические характеристики его все еще могут совершенствоваться. По этой причине сложно говорить об окончательных характеристиках ТД ВУТ.

ТД ВУС – это одна из разновидностей ВУТ, отличающаяся технологией производства, некоторыми свойствами, и иногда составом композиции [113; 114].

Давно известно, что горение ВУТ отличается от горения простого угольного топлива [114], поэтому состав продуктов сгорания и, в частности, состав газообразных выбросов в атмосферу при сжигании ВУТ отличен от аналогичных продуктов при сжигании сухого угля. В свою очередь состав выбросов при сжигании ТД ВУС может отличаться от выбросов при сжигании других топлив.

К сожалению, в технической литературе нет подробных сведений об исследовании процессов сжигания ВУТ, поскольку в малой и большой энергетике РФ практически нет энергоустановок штатно работающих на этом топливе, а ограниченные исследования, которые проводились при попытке перевода существующих котлов на водоугольное топливо носили эпизодический характер и их результаты не содержат обобщений об экологических показателях горения.

Ниже рассмотрены некоторые экологические показатели атмосферных выбросов ВУТ и ТД ВУС по результатам экспериментов и расчетов (Таблица 5.1).

В качестве сравнения приведем значения выбросов для сжигания экологически чистых ТЭС [50].

Таблица 5.1 - Экологические характеристики электростанций на различных видах топлива (по нормам 01.01.2001) [112].

Показатели	Экологически чистая электростанция	Наиболее удачные достижения (реально)	
		Уголь	Мазут
Коэффициент избытка воздуха	-	1,4	1,15

Продолжение таблицы 5.1

Показатели	Экологически чистая электростанция	Наиболее удачные достижения (реально)	
		Уголь	Мазут
Зола не более, мг/нм ³	50	50-70	2,0
Оксиды серы, мг/нм ³	200-300	250-350	300-400
Оксиды азота, мг/нм ³	150-200	400-600	400-600
Неочищенные жидкие стоки, кг/т.т	0	-	-
Использование золы в народном хозяйстве, %	80	60	-

Показателем экологичности теплоэнергетических установок в малой энергетике (промышленные, бытовые котельные и т.д.) значительно уступают этим показателям.

Так, нормативные выбросы оксида серы составляют $SO_x = 1200 \text{ мг/нм}^3$, золы - $A_{\text{лет}} = 150 \text{ мг/нм}^3$, оксида азота - $NO_x = 470 \text{ мг/нм}^3$, концентрация в уходящих газах $C_{20}H_{12} = 0,1 \text{ мкг/нм}^3$.

Ниже приведена Таблица 5.2 с данными по выбросам вредных веществ, определенных при помощи газоанализатора ДАГ 16 [114] для водоугольной суспензии.

В НГТУ был создан специальный стенд для исследования кинетики горения ТД ВУС. Стенд имеет все вспомогательные системы, включая систему дутья и эвакуации уходящих газов.

НГТУ совместно с НПП «Росток», выполнили эксперименты по сжиганию ТД ВУС в установке циклонного типа с последующей утилизацией продуктов сгорания в котле ЗИОМАР-45, выполняющего роль котла-утилизатора.

При определении концентрации выбросов в выходном сечении котла – использован газоанализатор TESTO-330-2LL.

Данные по результатам эксперимента представлены в Таблице 5.3. Горение ТД ВУС происходило при температуре 950 °С.

Таблица 5.2. - Содержание вредных веществ в уходящих газах

Показатели контроля	ВУС	Нормативное содержание
Монооксид азота NO, мг/м ³	165	-
Оксиды азота NO _x , мг/м ³	173	750
Оксид углерода CO, мг/м ³	112	375

Таблица 5.3. – Сводная таблица результатов эксперимента

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Требование к параметру		Измеренное значение	
			Номинальное значение	Предельное значение	Нормальные условия	Во время воздействия
1	Выбросы оксидов азота, NO _x	мг/м ³	300	-50	280	285
					285	
					290	
					Среднее значение 285	

Продолжение таблицы 5.3

№ п/ п	Наименование параметра	Ед. изм.	Требование к параметру		Измеренное значение	
			Номинальное значение	Предельное значение	Нормальные условия	Во время воздействия
2	Выбросы оксидов серы, SO _x	мг/м ³	200	-50	195	196,7
					198	
					197	
					Среднее значение 196,7	
3	Выбросы угольной пыли	мг/м ³	10	-5	9	9,3
					9	
					10	
					Среднее значение 9,3	
4	Выбросы бензапирена, C ₂₀ H ₁₂	мг/м ³	0,1	-0,05	0,12	0,08
					0,05	
					0,08	
					Среднее значение 0,08	

№ п/ п	Наименование параметра	Ед. изм.	Требование к параметру		Измеренное значение	
			Номинальное значение	Предельное значение		
5	Выбросы монооксида углерода, СО	мг/м ³	100	±0,05	100	98
					95	
					97	
					Среднее значение 98	

Таким образом, из результатов экспериментов определено, что при горении ТД ВУС, выбросы в атмосферу окиси азота и серы не превышают нормативных значений, а по оксидам серы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к экологически чистой ТЭС.

Совокупные показатели воздействия продуктов сгорания ТД ВУС на атмосферу представляются конкурентноспособными.

5.3 Метод технико-экономического сравнения при плазменном воспламенении тонкодисперсных водоугольных суспензий и при системах жидкостного воспламенения

В известных системах воспламенения водоугольных топлив, в качестве инициирующих топлив используют жидкие легковоспламеняющиеся топлива – дизельное или соляровое масло. В этом случае сжигание растопочного топлива производят в специальном адиабатическом предтопке, вынесенном из котла, или встроенном в топку (котел КЕ-10-13, Матвеевка, НСО, Березовское, Белово, завод «Хлеб», Новокузнецк, Кузбасс, Котельная завода ремонта горно-шахтового оборудования). Наряду с такими системами, применяют обычную мазутную растопку (ПК-40-1, Беловская ГРЭС, ТПЕ-

214 №3, Новосибирская ТЭЦ-5) до достижения рабочего режима (температура в топке 900-1000 °С), после чего происходит переключение питания котла на ТД ВУС.

Учитывая то, что сегодня перспективу применения ТД ВУС связывают, в первую очередь, с малой энергетикой, сравнение плазменной системы воспламенения проведено с вариантом воспламенения дизельным топливом.

Для этого учтены следующие факторы:

1. Стоимость системы воспламенения составляет 2...3% от капиталовложений во всю систему.
2. Учитывают количество пусков установки в год.

Таким образом, суммарные затраты составляют:

$$\sum z_{\tau} = K_{\text{сист}} + z_i, \quad (5.3)$$

где $K_{\text{сист}}$ - капиталовложения в систему зажигания, руб.

z_i - текущие затраты на очередной пуск установки ($i=1 \dots n$), руб.

$\sum z_{\tau}$ - суммарные затраты за время τ (τ , мес...год и т.п.), руб.

Область эффективного применения той или иной системы показана заштрихованной площадью (Рисунок 5.3).

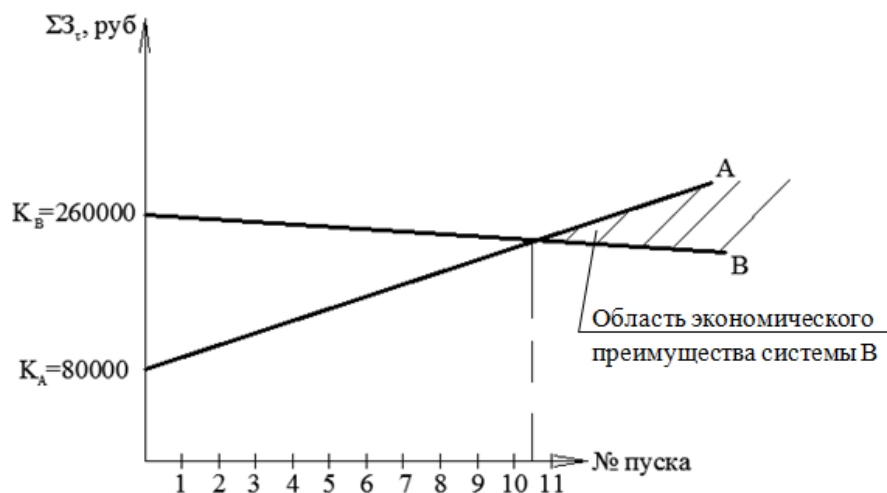


Рисунок 5.3 - Схема технико-экономического сравнения систем расчета котла, А – система с инициирующим топливом, В – система с плазменным розжигом

Точка пересечения характеристик соответствует равенству денежных расходов на содержание и использование систем. Заштрихованная область соответствует технико-экономическому превалированию системы *B* над системой *A*.

Пример расчета для котла ДКВр-20-13 тепловой мощностью 15 МВт.

Система *A* – инициирующее жидкое топливо

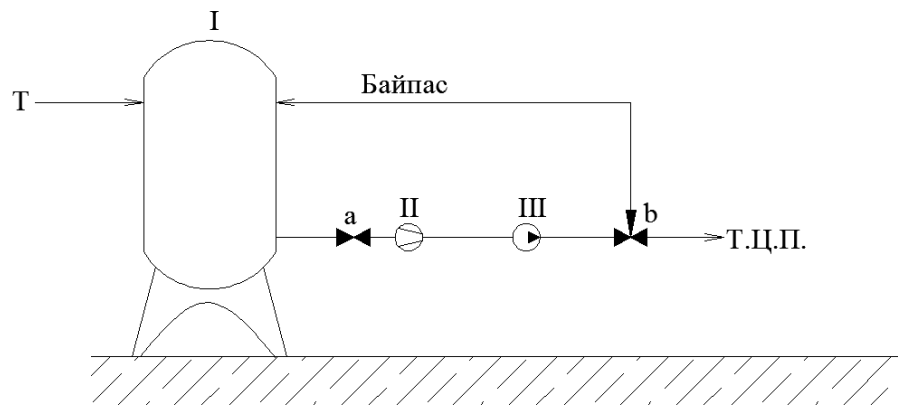


Рисунок 5.4 - Принципиальная схема системы *A*:

I – расходный бак (~3 м³); *II* – расходомер; *III* – перекачивающий насос; *a* – запорная арматура; *b* - трехходовой кран; *T* – подача топлива; Т.Ц.П. – топливо к циклонному предтопку

В соответствии с эксплуатационным опытом:

- продолжительность времени запуска котла из холодного состояния ~40 мин.
- запуск производится на мощности котлоагрегата ~ 0,2 от номинала и заканчивается при выходе на номинал мощности 15МВт.

Капиталовложения в пусковую систему (включая проектирование, материалы, изготовление, монтаж и установку под ключ) оценены в

$$K_A = 80000 \text{ руб.}$$

Текущие затраты на пуск составляют:

- средняя тепловая мощность пусковой системы

$$\overline{Q_n} = \frac{Q_{n_{\min}} + Q_{n_{\max}}}{2} = \frac{0,2 \cdot 15 + 15}{2} = 9 \text{ МВт}$$

- при теплоте сгорания топлива 10000 ккал/кг (42 МДж/кг) и продолжительность пуска 40 мин (2400 с) общий расход топлива на пуск (с учетом потерь ~0,02) составляет

$$B = \frac{\overline{Q_n} \cdot \tau_n}{(1 - 0,02) Q_{\text{н}}^p} = \frac{9 \cdot 10^3 \cdot 2,4 \cdot 10^3}{0,98 \cdot 42 \cdot 10^3} = 0,525 \cdot 10^3 \text{ кг} (\sim 0,5 \text{ т})$$

- Стоимость запуска котла из холодного состояния составит при стоимости 38 руб/кг дизельного топлива

$$Z_{n_A} = 0,525 \cdot 10^3 \cdot 38 = 19941 \text{ руб.}$$

Основными элементами системы являются: трансформатор на мощность 25 кВт, плазмотроны общей мощностью 20 кВт, компрессор для подачи воздуха к плазмотронам, мощностью 6 кВт, дополнительно коммуникационные кабели, контакторы, соединения и т.п.

Система В – плазменный запуск котла

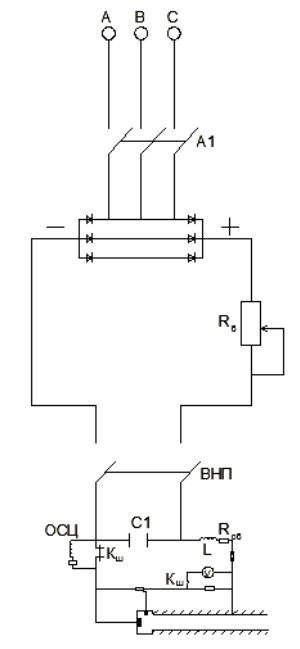


Рисунок 5.5 - Схема системы зажигания плазмотрона

С учетом сказанного капиталовложения в систему под ключ оценены

$$K_B = 260000 \text{ руб.}$$

При условиях запуска: работа плазмотронов на полную мощность 20 кВт продолжительностью 40 мин и тепловыми КПД плазмотронов и трансформатора (система в целом) равном 0,8 получим расход электрической энергии на запуск

$$Z_B = \frac{P_{\text{пл}} \cdot \tau_n}{\eta_{\text{сис.}}} = \frac{20 \cdot 2}{3 \cdot 0,8} = 16,66 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Примем цену электроэнергии $C_{\text{эл}} = 3,64 \text{ р/кВт} \cdot \text{ч}$, как для опытно-промышленных установок и получим

$$Z_{n_B} = 16,66 \cdot 3,64 = 60,66 \text{ руб.}$$

Расход ТД ВУС на растопку:

$$B_{\text{ТДВУС}} = B \cdot \frac{Q_n^p}{Q_{\text{нТДВУС}}^p} = 0,525 \cdot \frac{42 \cdot 10^3}{15,76 \cdot 10^3} = 1,399 \text{ т/раст}$$

Цена ТД ВУС = 2 руб./кг

$$C_{\text{раст ТДВУС}} = 2798 \text{ руб.}$$

Цена растопки с учетом электрической энергии:

$$C_p = 2798 + 60,66 = 2858,66 \text{ руб.}$$

Точка пересечения характеристик соответствует равенству

$$(K_A + Z_{n_A} \cdot n) = (K_B + Z_{n_B} \cdot n),$$

n - где число пусков до достижения равенства накопленных денежных вложений в систему, откуда

$$n = \frac{(K_B - K_A)}{(Z_{n_A} - Z_{n_B})}, \quad (5.4)$$

и

$$n = \frac{(260 - 80) \cdot 10^3}{(19941 - 2858,66)} = 10,54.$$

Таким образом равная эффективность рассматриваемых систем наступает при 10-и пусках котла. С дальнейшим ростом числа пусков плазменная система становится предпочтительней.

5.4 Выводы

1. Удельные капиталовложения в КА с ЦП для работы на ТД ВУС с увеличением мощности с 52 до 115 МВт практически не изменяются (≈ 425 долл/кВт), а со 115 до 220 МВт плавно снижаются с 425 до 375 долл/кВт. Капиталовложения в котлоагрегат энергоблока 12 МВт составляют 310 долл/кВт и обусловлены низкими параметрами пара (более дешевыми сталями, меньшей толщиной стенки и, соответственно, меньшей массой поверхностей нагрева). Суммарные удельные капиталовложения в КА, топливоподачу и топливоприготовление, природоохранные системы для энергоблоков 12...220 МВт на ТД ВУС с увеличением мощности снижаются с 715 до 554 долл/кВт. Удельные капиталовложения в аналогичное оборудование для традиционной пылеугольной ТЭС находятся в диапазоне 922...737 долл/кВт, что на 29-33% больше, чем для энергоблоков с КА с ЦП для работы на ТД ВУС.
2. Стоимость запуска котла из холодного состояния составит при стоимости 38 руб/кг дизельного топлива 19941 руб; при пуске плазменной системы, цена одного пуска составит: 2858,66 руб
3. Экономическая эффективность плазменной растопки по сравнению с жидкостной обеспечивается через 10 пусков.

Заключение

1. Разработана кинетическая модель пиролиза, воспламенения и горения тонкодисперсного водоугольного топлива с учетом основных химических реакций. Работоспособность (достоверность) модели подтверждена сравнением с известными экспериментальными данными.
2. В результате моделирования пиролиза, воспламенения и горения ТД ВУС установлено, что на начальном этапе процесса (0-1 с) температура смеси ($T_{см}$) достигает значений 1800-2500 К с последующим снижением до ~ 1200 К. Высокая температура на начальном участке обусловлена полным выгоранием водорода топлива.
3. Установлено, что для ТД ВУС на основе кузнецкого угля с содержанием влаги 40 % время выхода влаги составляет 1-5 с в зависимости от температуры стенки предтопка, меняющейся от 500 до 1000 К. Меньшие значения τ_w характеризуют высоконапряженные предтопки, а большие – охлаждаемые.
4. Разработан метод конструкторского расчета циклонного предтопка в инженерной постановке. При этом выявлено, что при технически реализуемых скоростях $\omega > 20$ м/с, обеспечивающих надежную крутку потока, на конструктивные характеристики в общем случае будут влиять тепловая мощность (Q) предтопка, температура ($T_{ст}$) стенки и угол (α) ввода потока.
5. Показано, что при углах $\alpha = 6-17^\circ$ тепловая мощность предтопка не влияет на характеристику крутки потока.
6. Показано, что на линейные размеры предтопка оказывает влияние его тепловая мощность, а не температуры протекающих процессов.

7. Показано, что для диаметров циклонов $D_{\text{ц}} = 1,0 - 1,5$ м, характерных, например, для амбразур энергетических котлов, при тепловой мощности 8-16 МВт, длина аппаратов составляет $L_{\text{ц}} = 4,5 - 10$ м. Длина участка испарения $L_{\text{в}}$, в этом случае, составит 0,4-0,55 от полной длины, при этом с ростом мощности аппарата влияние температуры процессов на $L_{\text{в}}$ снижается.
8. Предложен метод расчета мощности плазмотрона, который учитывает деление предтопка на зоны и количество теплоты, которое необходимо подвести в каждую из них для испарения влаги и воспламенения ТД ВУС.
9. Показано, что при мощности предтопка на уровне ~ 15 МВт мощность плазмотрона составит 21 кВт. Этот показатель в ~ 60 раз меньше, чем при розжиге растопочным или резервным топливом.
10. Показано, что для котла ДКВр-20-13, работающего на ТД ВУС на основе Междуреченского угля марки Д. Мощность плазмотрона составила $\sim 1,2$ МВт.
11. Разработан метод случайно-направленного поиска с применением граничных условий, позволяющий сократить небаланс измеренных на функционирующих энергоагрегатах входных параметров с $\sim 1,06\%$ до $0,07\%$.
12. Экономическая эффективность плазменной растопки по сравнению с жидкостной обеспечивается через 10 пусков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. CWM in Japan / V.I. NEDO.- Tokyo., March 1997. – 249 p.
2. Зайденварг, В.Е. Производство и использование водоугольного топлива/ В.Е. Зайденварг [и др.]-М.: Академия горных наук, 2001. – 173 с.
3. Ходаков, Г.С. Водоугольные суспензии/ Г.С. Ходаков //Энергетика. – 2000. - №2. – С. 104-119.
4. Ходаков, Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике/ Г.С. Ходаков// Теплоэнергетика. - 2007. - №1. –С. 35 – 45.
5. Харумитцу, Янамати, Осаму, Мацумото, Масаи, Цуруи. Информационный материал по водоугольному топливу корпорации JGC. - Йокогама, 1995.
6. Ходаков, Г.С. Дисперсионный анализ высокодисперсных материалов, подлежащих гидротранспортированию/ Г.С. Ходаков //Исследование технологии и оборудования терминальных комплексов магистрального гидротранспорта: тр. ин-та ВНИПИГидротрубопровод. – 1985. – С. 96 -99.
7. Редькина, Н.И., Ходаков, Г.С. Сорбционные и механосорбционные аспекты реологии водоугольного топлива. Технология приготовления и физико-химические свойства водоугольных суспензий / Н.И. Редькина, Г.С. Ходаков //Сб. науч. тр. НПО «Гидротрубопровод»-М., 1991. - С. 15-24.
8. Редькина, Н.И., Ходаков, Г.С. Физико-химические особенности водоугольных суспензий. Технология приготовления и физико-химические свойства водоугольных суспензий/ Н.И. Редькина, Г.С. Ходаков// Сб. науч.тр. НПО «Гидротрубопровод». - М., 1991 С. 25-37.
9. Горская, Т.П., Ильин, В.К., Пименова, Е.Н. Гранулометрический состав угля и подвижность водоугольных суспензий. / Т.П. Горская, В.К. Ильин, Е.Н. Пименова// Химия твердого топлива. – 1986. - №6. – С. 105-108.
10. Басенкова, В.Л., Филиппенко, Т.А., Зубков, Ю.И. Зависимость структурно-реологических свойств водоугольных суспензий от природы углей и их дисперсности./ В.Л. Басенкова, Т.А. Филиппенко, Ю.И. Зубков// Химия твердого топлива. – 1988. - №5. – С. 139-143.

11. Опыт создания экологически чистых угольных технологий: по материалам I и II международных летних школ «Менеджмент в области экологически чистых угольных технологий»/ под общ. ред. М.Г Беренгартена. и А.Г Евстафьева. - 1998. -. 170 с.
12. Бутылькова, Т.Н., Делягин, Г.Н. Зола и шлак при сжигании водоугольных суспензий и характеристика отложений на поверхностях нагрева/ Т.Н. Бутылькова //Химия. – 1986. - № 15. - 118 с.
13. Klose, Reinhard B. DENSECOAL – an alternative to gas and oil / B. Klose Reinhard //6-th Jnt. Symp. On Coal Slury Combust and Technol.: Orlando, FL, USA. – June 25 – 27. – 1984. – Proc. Pittsburg, Pa. S. A. – P. 791-805.
14. Takahashi, Y. Development and scale-up of CWM preparation process / Y. Takahashi // Proc. 20th Intern. Conf. on Coal Utilization and Fuel Systems. - USA, Florida. - 1994. – 305 p.
15. Бибик, Е.Е. Реология дисперсных систем / Е.Е. Бибик – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1981. – 162 с.
16. Ходаков, Г.С. Некоторые особенности приготовления высококонцентрированных водоугольных суспензий, предназначенных для гидротранспортирования. Исследование технологии и оборудования терминальных комплексов магистрального гидротранспорта / Г.С. Ходаков // Сб. науч. тр. НПО «Гидротрубопровод»-М., 1985. – С. 24-31.
17. Потанин, А.А. Теория полной реологической кривой течения высококонцентрированных водоугольных суспензий. Физико-химические основы регулирования структурно-реологических свойств и устойчивости высококонцентрированных водоугольных суспензий в процессе трубопроводного гидротранспортирования / А.А. Потанин// Сб. науч. тр. НПО «Гидротрубопровод»– М., 1989. – С. 44-61.
18. Ercolani, D., . Grinzi, F Experience with coal slurry production, transportation and utilization systems for multiple applications. //In: Proceedings of IEA
19. Моррисон, Д., Скарони, А., Батиста, Д. Использование угольных шламов для производства водоугольного топлива / Д. Моррисон, А. Скарони, Д. Батиста

- // XIII International Coal Preparation Congress, Brisbane, Australia.- 4-10 October 1998.- pp. 643-645.
20. Зейденварг, В.Е. Производство и использование водоугольного топлива / В.Е. Зейдинварг, [и др.]. - М.: Изв. Академии горных наук, 2001.– 172 с.
21. Хидиятов, А.М. Основные результаты исследований водоугольного топлива и перспективы его использования / А.М. Хидиятов, В.И. Бабий, К.В. Агапов, Л.И. Дубовцев, А.Я. Клобертанц, В.С. Полиградов и др. // Развитие технологий подготовки и сжигания топлива на электростанциях.- Сб. ст.: под ред. Л.Г. Туманского, В. Котляра. – М.: ВТ, 1996. – С.123-141.
22. Пугач, Л.И., Волобуев, А.Н., Агапов, К.Н. Освоение головных и опытно-промышленных котельных установок при сжигании углей сибирских месторождений / Л.И. Пугач, А.Н. Волобуев, К.Н. Агапов и др. // Электрические станции. – 1995. - №10.
23. Thomas, D. B. Transport characteristics of suspensions/ D.B. Thomas // VIII a note on viscosity of newtonian suspensions of uniform spherical particles. - J. of Colloid Science. – 1965. – v. 20. - № 3. – P. 267-277.
24. Frankel, N.A., Acrivos, A. On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres/ N.A. Frankel, A. Acrivos // Chem. Eng. Sci. – 1967. – v. 22. –P. 847-853.
25. Patel, P.D., Russel, W.B. A mean field theory for the rheology of phase separated or flocculated dispersions /P.D. Patel, W.B. Russel// Colloid I Surf. – 1988. – v. 31. – P. 355-383.
26. Патент 4780109 США. МКИ⁴ C10L 1/32. Coal water suspensions involving carbon blank / D.P. Malone, D.G. Thompson /USA/ ; Ashland Oil. Dnc. (США). - № 946743; Оpubл. 25.10.86.
27. Cheng, D.C. – H., et al /D.C. Cheng.// Brit. J. Appl. Phys.- 16, 1599 (1965).
28. Usui, H., et al. J./H. Usui// Chem. Eng. Jap. -18, 519 (1985).
29. Szymanski, J.K., et al. / J.K. Szymanski //Proc. 8th Jnt. Symp. On Coal Slurry Fuels, Preparation and Utilization.- Orland, Florida, 117 (1986).

30. Хренкова, Т.М. Химические превращения углей при механическом диспергировании: автореф. дисс. ... док. хим. наук: 02.00.04/ Хренкова Татьяна Михайловна. – М., 1983.
31. Хренкова, Т.М., Лебедев, В.В., Голденко, Н.Л. Влияние механического измельчения на свойства каменного угля / Т.М. Хренкова, В.В. Лебедев, Н.Л. Голденко// Химия и переработка топлив. – 1973, вып. 1, т. XXIX, С. 84-89.
32. Хренкова, Т.М., Финкельштейн, Г.Б., Касаточкин, В.И. Электрофизические свойства аморфизированных порошков природного графита / Т.М. Хренкова, Г.Б. Финкельштейн, В.И. Касаточкин// Химия твердого топлива. – 1963. - № 1. - С. 145-148.
33. Хренкова, Т.М., Черкинская, К.Т., Штеренберг, Л.Е. Изменение физико-химических свойств углей при диспергировании /Т.М. Хренкова, К.Т. Черкинская, Л.Е. Штеренберг //Химия твердого топлива.- М. – 1974. - № 2. - С. 48-52.
34. Хренкова, Т.М., Лебедев, В.В., Голденко, Н.Л. и др. Характер изменения свойств углей при размоле /Т.М. Хренкова, В.В. Лебедев, Н.Л. Голденко//Химия твердого топлива. – 1975. - № 1. - С. 11-17.
35. Хренкова, Т.М., Екатеринина, Л.Н., Мотовилова, Л.В. Химические изменения углей при измельчении/ Т.М. Хренкова, Л.Н. Екатеринина, Л.В. Мотовилова// Химия твердого топлива. – 1977. - № 4. - С. 36-37.
36. Хренкова, Т.М., Лебедев, В.В., Голденко, Н.Л. Образование парамагнитных центров при измельчении угля/ Т.М. Хренкова, В.В. Лебедев, Н.Л. Голденко//Химия твердого топлива. – 1978. - № 6. - С. 144-146.
37. Хренкова, Т.М., Лебедев, В.В., Голденко, Н.Л. Исследование изменения химического строения каменного угля при механодеструкции методами ИК и ПМР спектроскопии/ Т.М. Хренкова, В.В. Лебедев, Н.Л. Голденко// Доклады VII Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел - ч. II, Ташкент. – 1979. - С. 103-104.
38. Хренкова, Т.М., Лебедев, В.В., Никанорова, Л.П. и др. Механохимическая модификация углей в продукты с новыми свойствами, их реакционная

- способность / Т.М. Хренкова, В.В. Лебедев, Л.П. Никанорова// Труды IV Всесоюзного совещания по химии и технологии твердого тела. – М. -1982. - С. 1-11.
39. Аввакумов, Е.Г. Механические методы активации химических процессов /Е.Г. Аввакумов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отд., 1986. – 303 с.
40. Кулагин, В.А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации: автореферат дис. ... док .тех. наук: 01.04.14, 01.02.05 / Кулагин Владимир Алексеевич. - Красноярск, 2004, 47 с.
41. Ивченко, В.М., Кулагин, В.А., Немчин, А.Ф. Кавитационная технология. Красноярск, изд-во Красноярского университета, 1990, - 200 с.
42. Кулагин, В.А. Моделирование двухфазных суперкавитационных потоков: монография /В.А. Кулагин, А.П. Вильченко, Т.А. Кулагина; под редакцией В.И. Быкова. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. - 187 с.
43. Хинт, И.А. Основы производства силикатных изделий / И.А. Хинт. – М.-Л: Литература по строительству и архитектуре, 1962. - 600 с.
44. Патент на изобретение № 2312889. Способ получения композитного топлива и установка для его осуществления. / Луценко С.В. (RU), Овчинников Ю.В. (RU), Андриенко В.Г. (RU). Заявка № 2006125798. Приоритет от 19 июля 2006 г., зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 20 декабря 2007 г.
45. Патент № 2151170, RU C1L1/32. Жидкое углесодержащее топливо / Томилов В.Г., Пугач Ю.Л., Ноздренко Г.В. и др. № 99116586/04. Заявлено 29.07.1999; Оpubл. 20.06.2000; Бюл. № 17.
46. Патент № 2151959, RU. 2151959. C1.F23K5/10. Способ получения жидкого композитного топлива / Томилов В.Г., Пугач Ю.Л., Ноздренко Г.В. и др. № 99111904/06. Заявлено 08.06.1999; Оpubл. 27.06.2000; Бюл. № 18.
47. Патент на полезную модель № 64946. Установка для получения композитного топлива (варианты) / Луценко С.В. (RU), Овчинников Ю.В. (RU), Андриенко В.Г. (RU). Заявка № 2007105399, приоритет полезной

модели 14 февраля 2007 г., зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 27 июля 2007 г.

48. Овчинников, Ю.В., Бойко, Е.Е. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий: монография /Ю.В. Овчинников, Е.Е. Бойко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 308 с.
49. Анализ состояния технологий производства и применения водоугольного топлива в Японии (по материалам книги «CWM in Japan», March 1997 NEDO), 249 с. - книга I.
50. Пугач, Л.И. Экология и энергетика / Л.И. Пугач. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 504 с.
51. Ноздренко, Г.В.. Экология и энергетика / Г.В. Ноздренко, В.В. Зыков. – Новосибирск: НГТУ, 1996. – 8 с.
52. Луценко, С.В., Овчинников. Ю.В., Кувшинов, Г.Г., Моисеев, В.А., Андриенко, В.Г. Экологическая безопасность искусственного композиционного жидкого топлива с добавлением технического глицерина / С.В Луценко, Ю.В. Овчинников, Г.Г. Кувшинов, В.А. Моисеев, В.Г. Андриенко// Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов под ред. акад. РАН В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Вып.12. – С. 140-153
53. Efficient use of coal water fuel. Technology assessment report⁷⁴ by Louis Wibley, Dou Palfreyman, Peter Scaife, Australia, 2008
54. Овчинников, Ю.В., Цепенюк, А.И., Шихотинов, А.В., Татарникова, Е.В. Исследование воспламенения твердых топлив и ИКЖТ / Ю.В. Овчинников, А.И. Цепенюк, А.В. Шихотинов, Е.В. Татарникова // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2011. выпуск 1 (16). - С. 117-126.
55. Делягин, Г.Н. Сжигание водоугольных суспензий – метод использования обводненных твердых топлив: Дис.... док тех. наук/ Делягин Геннадий Николаевич. – М., 1970. – 32с.
56. Резников, М.И. Парогенераторные установки электростанций / М.И. Резников. - М.: Энергия, 1968. - 234 с.

57. Исследования и разработки Сибирского отделения Российской академии наук в области энергоэффективных технологий. –Новосибирск: Изд. СО РАН. - вып. 20. - 2009. – 405 с.
58. Мурко, В.И., Феяев, В.И., Дзюба Д.А. Водугольное топливо / В.И. Мурко, В.И. Феяев, Д.А. Дзюба // Уголь. – 2002. - №6 С.58-59.
59. Мурко, В.И. Аспекты приготовления и результаты эффективного применения водугольного топлива / В.И. Мурко, В.Н. Звягин, В.И. Феяев и др. // Сб. тр. межд. науч. конф. и школы семинара ЮНЕСКО «Химия на рубеже тысячелетий», Клязьма, 2000. – М.: Изд. МГУ. – 2000. – 4.1, - С.105-111.
60. Саломатов, В.В., Кравченко, И.В. Теоретическое исследование горения капли водугольного топлива. Часть II. Стадия воспламенения./ В.В.Саломатов, И.В. Кравченко//Горение и плазмохимия. – 2007. - №3. - С.189-198. – том 5.
61. Сжигание высокообводненного топлива в виде водугольных суспензий / отв. ред. д.т.н., проф. Б.В. Контарович, к.т.н., Г.Н. Делягин. –М.: Наука, 1967 г.
62. Цепенюк, А.И. Разработка, исследование новой технологии использования на ТЭС кавитационного жидко-угольного топлива: дис. канд. тех. наук.: 05.14.14 / Цепенюк Алексей Иванович. – Новосибирск, 2013. – 153 с.
63. Рундыгин, Ю.А. Устойчивость воспламенения высоковлажного топлива в низкотемпературных вихревых топках/ Ю.А. Рундыгин // Энергетика. Изв. вузов.- 1983. - №10. - С.74-81.
64. Калинин, Р.А., Левицкий, А.А., Мирохин, Ю.А., Полак, Л.С. Математическая модель процессов пиролиза и газификации угля/ Р.А. Калинин, А.А. Левицкий, Ю.А. Мирохин, Л.С. Полак// Кинетика и катализ. - т.28. - вып.3.-1978. - С.723-729.
65. Виленский, Т.В. Расчеты процессов горения в системах струй и топочных камерах/ Т.В. Виленский // Энергетика. Изв. вузов. – 1983. - №10. - С.81-86.

66. Теплотехнический справочник / под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. –М.: Энергия, 1976. - т.2. - 896 с.
67. Померанцев, В.В., Шестаков, С.М., Дудукалов, А.П., Усик, Б.В. Проблема разработки теории горения твердого топлива / В.В. Померанцев, С.М. Шестаков, А.П. Дудукалов//Сб. конф.: Новосибирск, 1985. - ч.1. - С.22-32.
68. Ноздренко, Г.В. Эффективность применения в энергетике КАТЭКа экологически перспективных энерготехнологических блоков электростанций с новыми технологиями использования угля /Г.В. Ноздренко. – Новосибирск: НЭТИ, 1992. – 261 с.
69. Печенегов, Ю.Я. Моделирование и расчет теплообмена одно- и двух- фазных систем в трубчатых аппаратах: автореф. дисс... док.тех.наук: 05.14.04 /Печенегов Юрий Яковлевич. - Саратов, 1988. – 37 с.
70. Цирульниченко, Н.М. Разработка процесса газификации канско-ачинского бурого угля в пылевидном состоянии: автореф. дис... канд.тех.наук:05.14.04 / Цирульниченко Николай Михайлович. - Саратов, 1986. – 16 с.
71. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / Под ред. Н.В. Кузнецова и др. - М.: Энергия, 1973. – 296 с.
72. Карпенко, Е.И. Плазменно-энергетические технологии комплексного использования твердых топлив: дисс. док. тех. наук:05.14.14 /Карпенко Евгений Иванович – Новосибирск, 1995 – 83 с.
73. Suuburd, E.M., Peters, W.A.,Howard, J.B. Produkt composition and kinetie of lignait pirolisis / E.M. Suuburd, W.A. Peters, J.B. Howard // Ind.Eng.Chem. Proceses. - Des., Dev., 1987. - Vol.17. - №1. – P.37-46.
74. Solomon, P.R., Hamblen, D.J., Carangelo, R.M., Krause, J.I. Coal thermal decomposition in entrained flow reactor: experiments and theory / P.R. Solomon, D.J. Hamblen, R.M. Carangelo, J.I Krause// Coal 19th Symp. (Intern.) Combustion (Prol.). - 1982. – P.1139-1149.
75. Козубова, М., Крутиль, Я., Неврлий, В. Экспериментальное исследование и численное моделирование горения метана в областях со сложной геометрией/

- М. Козубова, Я. Крутиль, В. Неврлий // Физика горения и взрыва. - 2014. - т.50. - №4. – С.8-14.
76. Zambon, A.C., Chelliah, H.K. Self-sustained acoustic-wave interactions with counter flow flames/ A.C. Zambon, H.K. Chelliah // J. Fluid Mech. - 2006. V.560. - P.249-278.
77. Энергетическое топливо СССР. Справочник / И.И Матвива., Н.В. Новицкий, В.С. Вдовченко и др. – М.: Энергия, 1979. – 128 с.
78. Волковинский, В.А., Толмачев, И.Я. Сжигание низкосортных углей с предварительной термоподготовкой в вихревой горелке/ В.А. Волковинский, И.Я. Толмачев // Теплоэнергетика. - 1994. - №9. – С.42-48;
79. Волковинский, В.А., Жолудов, Я.С., Росколупа, А.И., Тальнова, Г.Н., Чернявский, Н.В. Исследование влияния реакционных свойств топлива на его газификационные характеристики. / В.А. Волковинский, Я.С. Жолудов, А.И. Росколупа, Г.Н. Тальнова, Н.В. Чернявский // Горение органического топлива. - Материалы V Всесоюзной конференции. Часть II. – Новосибирск, 1985. – С.51-55;
80. Ибрагимов, М.Х., Марченко, Е.М., Тувальбаев, Б.Г., Дранченко, А.А., Трубицын, Н.Б., Наумов, Ю.Г. Экспериментальное исследование модели устройства для термической подготовки топлива на пылеугольных ТЭС./ М.Х. Ибрагимов, Е.М. Марченко, Б.Г. Тувальбаев, А.А. Дранченко, Н.Б. Трубицын, Ю.Г. Наумов // Изв. ВУЗов.- Энергетика. - №6. – С.62-65.
81. Каширский, В.Г., Васильев, Ю.А., Ковалев, Е.Е., Козлов, А.К. Исследование скоростного пиролиза канско-ачинских углей в циклонном реакторе/ В.Г. Каширский, Ю.А. Васильев, Е.Е. Ковалев, А.К. Козлов // Горение органического топлива. - Материалы V Всесоюзной конференции. - Часть II. – Новосибирск, 1985. – С.97-102;
82. Каширский, В.Г., Мулюкова, Г.П. Производство энергоносителей на основе пиролиза башкирских бурых углей / В.Г. Каширский, Г.П. Мулюкова, // Горение органического топлива. - Материалы V Всесоюзной конференции. - Часть II. – Новосибирск, 1985. – С.93-96.

83. Щинников, П.А. Выбор экологически перспективного направления развития ТЭЦ на канско-ачинских углях в современных экономических условиях: дисс. ... канд. тех. наук:05.14.14/ Щинников Павел Александрович. – Новосибирск, 1998. – 158 с.
84. Hess, W. Einfluß der Schubbeanspruchung bei der Druckzerleinerung von Kugeln und kleine Partikeln. Dissertation. – Karlsruhe, 1980.
85. Kendall, K. The impossibility of comminuting small particles by compression. – Nature, 1978> v. 272, P. 710-711.
86. Овчинников, Ю.В, Рудакова, Е.Е. Распыливание водоугольного топлива пневматическими форсунками / Ю.В Овчинников, Е.Е. Рудакова// Энергетика и теплотехника. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Вып. 18. – С.118-125.
87. Boyko, E.E., Ovchinnikov, Y.V. Research of spraying, ignite and incineration ACLF in the boiler with cyclone furnace extansion / E.E. Boyko, Y.V. Ovchinnikov // Applied Mechanics and Materials. - 2015. – Vol. 698 : Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 664-667. - Режим доступа:www.scientific.net/AMM.698.664.
88. Сенчурова, Ю.А., Мурко, В.И., Федяев, В.И., Дзюба, Д.А., Пузырев, Е.М. Результаты исследования распыливания водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками / Ю.А. Сенчурова, В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба, Е.М. Пузырев // Изв. Томского политехнического ун-та. – 2008. - №4. – С.37-40.
89. Соломатов, В.В., Кравченко, И.В. Теоретические исследование горения / В.В. Соломатов, И.В. Кравченко //Горение и плазмохимия. – 2007. - том 5. - №3. - С. 189-198
90. Проведение исследований на огневом стенде ОИСГТ-6 кинетики горения тонкодисперсных водоугольных суспензий и оптимизация режимов их сжигания применительно к промышленным котлоагрегатам мощностью до 35 МВт: отчет о НИР / Овчинников Ю.В. – Новосибирск: Государственный контракт от 25 августа 2011 г. №16.218.11.7079 с Министерством

образования и науки Российской Федерации на выполнение научно-исследовательской работы (шифр «2011-1.8-518-007-007»), 2012.

91. Овчинников, Ю.В. Проблемы сжигания водоугольных топлив и предложения по разработке технологии сжигания / Ю. В. Овчинников, Е. Е. Бойко, Ф. А. Серант // Доклады АН ВШ Российской Федерации. - 2015. - № 1(26) - С. 85-93
92. Плазменные электротехнологические установки: учебник для вузов / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин; под ред. В.С. Чередниченко. – 3-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: НГТУ, 2011. – 602 с.
93. Цепенюк, А.И. Разработка, исследование новой технологии использования на ТЭС кавитационного жидкоугольного топлива: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.14.14 /Цепенюк Алексей Иванович. - Новосибирск, 2013. – 21 с.
94. Современные методы переработки твердых бытовых отходов / В.С. Чередниченко, А.М. Казанов, А.С. Аньшаков и др. – Новосибирск: НГТУ, 1993. – 130 с.
95. Аньшаков, А.С. Электротехнологические установки (Газовые разряды): учебник для вузов / А.С. Аньшаков, В.С. Чередниченко.- Новосибирск: НГТУ, 1993. – 130 с.
96. Русских, Е.Е., Овчинников, Ю.В. Инициация сжигания высокообводненного топлива с применением плазменного газификатора / Е.Е. Русских, Ю.В. Овчинников// Теплоэнергетические системы и агрегаты: сборник. научных трудов.- Вып. 7.- Новосибирск, 2003. – С.187-193
97. Семёнов, Н.Н. Цепные реакции / Н.Н. Семенов. — М.: Госхимтехиздат, 1934. – 535 с.
98. Бойко, Е.Е. Методика расчета мощности плазмотрона для воспламенения тонкодисперсной водоугольной суспензии/Е.Е. Бойко // Сборник научных трудов в 9 ч.: под ред. доц. О.В. Боруш. – Новосибирск: НГТУ, 2016. – Часть 4. – С. 197-199.
99. Данилов, П.Н., Бойко, Е.Е., Овчинников, Ю.В., Серант, Ф.А. Исследование оптимального значения коэффициента избытка воздуха при сжигании

- искусственного композиционного топлива в энергетических котлоагрегатах / П. Н. Данилов, Е. Е. Бойко, Ю. В. Овчинников, Ф. А. Серант // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2015. - № 2. - С.143-156.
100. Szargut, J. Energetyka cieplna w hutnictwie /J. Szargut. - Katowice: Slask, 1971. – 654 с.
101. Елистратов, С.Л., Овчинников, Ю.В., Шаров, Ю.И., Бойко, Е.Е. Сравнительное исследование снижения информационной неопределенности функционирующих энергоустановок на основе аналитической методики и метода случайного поиска [Электронный ресурс]/ С. Л. Елистратов, Ю. В. Овчинников, Ю. И. Шаров, Е. Е. Бойко // Новое в российской электроэнергетике: науч.-техн. электрон. журн.. - 2017.- № 12. - С. 6-22. - Режим доступа: <http://www.energo-press.info/nre>.
102. Бойко, Е.Е., Овчинников, Ю.В., Григорьева, О.К. Коррекция исходной информации для расчета эффективности функционирующей энергоустановки при сжигании ВУТ = Korrektsiya iskhodnoi informatsii dlya rascheta effektivnosti funktsioniruyushchei energoustanovki pri szhiganii VUT [Correction of the initial information for calculation of efficiency of functioning energy unit when burning water-coal fuel /Е.Е. Бойко, Ю.В. Овчинников, О.К. Григорьева// Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2017. – № 3 (36). – С. 19–28.
103. Овчинников, Ю.В., Елистратов, С.Л., Францева, А.А., Бойко, Е.Е. Коррекция исходной информации в балансовых уравнениях методом случайного поиска при наличии граничной функции / Ю. В. Овчинников, С. Л. Елистратов, А. А. Францева, Е. Е. Бойко // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2017. - № 3 (68). - С. 62-75
104. Методика коррекции балансовых уравнений: методическое пособие для студентов ФЭН всех форм обучения по направлению 13.04.01 – Теплоэнергетика и теплотехника, а также для аспирантов по направлению

- 13.06/01 – Электро- и теплотехника / Ю.В. Овчинников, С.Л. Елистратов, Е.Е. Бойко, А.А. Францева, О.К. Григорьева, Ю.И. Шаров; под ред. Ю.В. Овчинникова. – Изд. НГТУ: Новосибирск – 2017. – 60 с.
105. Пригожин, И.Р. Введение в термодинамику необратимых процессов / И.Р. Пригожин. — М.: ИЛ, 1960.— 150с.
106. Пригожин, И.Р., Стенгерс, И. Время. Хаос. Квант/ И.Р. Пригожин, И. Стенгерс.— М.: Прогресс, 1994. — 266 с.
107. Ахромеева, Т.С., Курдюмов, С.П., Малинецкий, Г.Г., Самарский А.А. Нестационарные структуры и диффузионный хаос / Т.С. Ахромеева, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий, А.А. Самарский. — М.: Наука.— 1992.
108. Малинецкий, Г.Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. Введение в нелинейную динамику/ Г.Г. Малинецкий. - 3-е изд.— М.: УРСС.— 2001.
109. Малинецкий, Г.Г., Потапов, А.Б., Подлазов, А.В. Нелинейная динамика: подходы, результаты, надежды / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов, А.В. Подлазов. — М.: УРСС.— 2006.
110. Сафронов, А.В., Щинников, П.А. Применение метода согласования балансов для повышения эффективности информационно-измерительной системы при определении ТЭП ТЭЦ /А.В. Сафронов, П.А. Щинников// Современные техники и технологии: сб. труд. 18 Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3-х томах. - Томск: Изд-во ТПУ, 2012. - Т.3.- С.237-238.
111. Теплотехнический справочник / под редакцией В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева.- М.: Энергия. – 1975. – т. 1.-763 с.
112. Овчинников, Ю.В., Баев, В.С., Евтушенко, Е.А. Энерготехнологический модуль для производства искусственного топлива на основе водоугольных суспензий /Ю.В. Овчинников, В.С. Баев, Е.А. Евтушенко// Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность. - Новосибирск: НГТУ, 2002 – 178 с.
113. Овчинников, Ю.В., Евтушенко, Е.А., Пугач, Л.И. Искусственное композиционное топливо на базе Быковских углей Д-12 (Сахалинская обл.)

- /Ю.В. Овчинников, Е.А. Евтушенко, Л.И. Пугач// Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - №6 – 178 с.
114. Делягин, Г.Н. Угольные суспензии – новое экологически чистое топливо и технологическое сырье. Обзорная информация / Г.Н. Делягин [и др.] Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 1991. - №9. 105 с.
115. Сенчурова, Ю.А. Совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.04 / Сенчуровой Юлия Анатольевна. - Кемерово, 2008 г. -123 с.
116. Овчинников, Ю.В., Михайленко, А.И., Бойко, Е.Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016612293 «Balance F&G» 20 февраля 2016 г.
117. Овчинников, Ю. В. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий : монография / Ю. В. Овчинников, Е. Е. Бойко. - Новосибирск: НГТУ, 2017. - 308 с.
118. Ovchinnikov Y.V., Nozdrenko G.V., Boyko E.E., Mikhailenko A.I. Methods of balance matching to refine the initial information as applied to thermal power plant / Y. V. Ovchinnikov, G. F. Nozdrenko, E. E. Boyko, A. I. Mikhailenko // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – Pt. 2. – P. 218-221

Приложение А

Приложение А

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе НГТУ

д.т.н., проф.



А.Г. Вострецов

2018 г.

АКТ

о практическом использовании результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Низкопотенциальной энергетики» при факультете энергетики НГТУ, д.т.н. Елистратов С.Л. и декан факультета энергетики НГТУ, к.э.н., доц. Чернов С.С. подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы «Разработка методических основ сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий при плазменном сопровождении в котлоагрегатах ТЭС» аспиранта кафедры «Тепловых электрических станций» Бойко Е.Е. имеют практическое применение в лаборатории.

Научные разработки и результаты исследований (по методикам и алгоритмам расчетов) используется как составная часть научной базы и банка данных по процессам и теплотехнологиям переработки твердых топлив. Имитационные математические модели применяются при определении приоритетных направлений развития теплопроизводящего оборудования и создании перспективных топливоиспользующих установок.

Декан ФЭН

Зав. Научно-исследовательской лабораторией «Низкопотенциальной энергетики»

к.э.н., доц. Чернов С.С.

д.т.н., проф. Елистратов С.Л.

Приложение Б

Приложение Б

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе НГТУ



д.т.н., доц.

С.В. Брованов

2018 г.

АКТ

о внедрении НИР в учебный процесс университета

Мы, нижеподписавшиеся, декан факультета энергетики, к.э.н., доц. Чернов С.С. и председатель методической комиссии факультета энергетики к.т.н., доц. Лыкин А.В. подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы «Разработка методических основ сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий при плазменном сопровождении в котлоагрегатах ТЭС» аспиранта кафедры «Тепловых электрических станций» Бойко Е.Е. внедрены в учебный процесс НГТУ.

Научные разработки и результаты исследований (методики и алгоритмы расчетов, методика технико-экономической оценки) используется при подготовке магистров по направлению 13.04.01 - «Теплоэнергетика и теплотехника», а также при подготовке аспирантов по направлению 13.06.01 - «Электро- и теплотехника».

Декан ФЭН

Председатель метод. комиссии ФЭН

к.э.н., доц. Чернов С.С.

к.т.н., доц. Лыкин А.В.