

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»  
(СибГИУ)



**Карпенюк  
Виктор Иванович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ  
ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРАХ МАЛОЙ И  
СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор Мурко В.И.

Новокузнецк – 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА .....	10
1.1 Суспензионное угольное топливо из угольных шламов – основные характеристики и технология приготовления .....	10
1.2 Обзор результатов аналитических исследований процесса горения водоугольных суспензий .....	23
1.3 Анализ технологий сжигания угольных шламов и конструкций котлов малой и средней мощности.....	41
1.4 Задачи исследования .....	59
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ГОРЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ В ТОПКАХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ .....	60
2.1 Выводы .....	73
ГЛАВА 3 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ .....	75
3.1 Определение исходных данных для расчетов .....	75
3.2 Расчет размеров топочного пространства .....	76
3.3 Выводы .....	82
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ И СОЗДАНИЕ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ .....	83
4.1 Разработка конструкций и создание теплогенераторов малой и средней мощности с вихревыми топочными камерами с горизонтальной осью вихря .....	83
4.1.1 Экспериментальная адиабатическая камера сжигания ВУТ с горизонтальной осью вихря .....	84
4.1.2 Разработка и создание теплогенератора для сушки зерна .....	96

4.1.3	Разработка установки сжигания ВУТ для института химической переработки угля в г. Забже, Польша .....	105
4.2	Разработка конструкций и создание теплогенераторов малой и средней мощности с вихревыми топочными камерами с вертикальной осью вихря .....	110
4.2.1	Разработка экспериментальной вихревой адиабатической топки .....	110
4.2.2	Разработка и создание экспериментального теплогенератора малой мощности на базе котла «Теплотрон» (КВр-0,63ВУТ) .....	115
4.3	Перевод на сжигание ВУТ промышленных угольных котлов..	119
4.3.1	Разработка и создание технологического комплекса по приготовлению и сжиганию ВУТ на шахте «Заречная»	119
4.3.2	Разработка и создание технологического комплекса приготовления и сжигания ВУТ, г. Черепаново .....	124
4.3.3	Разработка и создание технологического комплекса по приготовлению и сжиганию ВУТ на ОАО «Междуречье».....	127
4.4	Выводы .....	134
ГЛАВА 5	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ПИЛОТНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ПТК) НА ОСНОВЕ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ НА ВУТ .....	135
5.1	Выводы .....	151
	ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	152
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	154
	Приложения .....	167

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** Применение экологически чистых угольных технологий является в настоящее время необходимым условием для успешного развития угольной промышленности и, соответственно, угольной тепло- и электроэнергетики – как основных потребителей угольной продукции. Одной из таких технологий является приготовление и использование водоугольных суспензий, в первую очередь, водоугольного топлива (ВУТ).

Бурное развитие углеобогащения в последние годы в России и, в первую очередь в Кузбассе, привело к резкому увеличению выхода угольных шламов и тонкодисперсных отходов углеобогащения (ТДОУ) на вновь построенных углеобогатительных фабриках (ОФ). Высокие значения влажности и зольности данных материалов не позволяют их использовать как товарный продукт без дополнительной обработки. В результате угольные предприятия указанные материалы отправляют в отвал, что приводит не только к потерям добытого угля, но и к значительному загрязнению окружающей среды.

Наиболее эффективной технологией, позволяющей решить указанную проблему, является технология приготовления и сжигания ВУТ, полученного на основе ТДОУ. И если задачи технологии приготовления водоугольного топлива с необходимыми структурно – реологическими и теплофизическими характеристиками в настоящее время успешно решены как в научном, так и в практическом плане, то вопросы технологии надёжного сжигания полученного водоугольного топлива и, в первую очередь, создания конструкций теплогенераторов малой и средней мощности остаются в значительной мере нерешёнными. В последние годы исследования, направленные на решение данных задач, проводили многие российские и зарубежные учёные: Алексеенко С.В., Баранова М.П., Бойко Е.Е., Кулагин В.А., Овчинников Ю.В., Стрижак П.А., Сенчулова Ю.А., Пузырёв Е.М., Радзюк А.Ю., Kijo–Kleczkowska A., Liu M., Duan Y. и др. Перспективным направлением при этом является использование технологии низкотемпературного вихревого сжигания забалластированных



топлив. Вместе с тем при использовании данной технологии для сжигания ВУТ имеются нерешённые задачи, сдерживающие её практическое применение. В первую очередь это: недостаточность теоретических данных по оценке влияния основных характеристик ВУТ (выхода летучих веществ, влажности, зольности и, соответственно, низшей теплоты сгорания топлива) на процессы воспламенения и горения, отсутствие научно-обоснованных методических рекомендаций по выбору конструктивных параметров вихревых адиабатических топок (внутренние размеры и диаметр пережимного окна) для надёжного сжигания топлива в зависимости от теплопроизводительности теплогенераторов малой и средней мощности, в том числе при переводе мазутных, газовых и угольных котлов со слоевыми топками на сжигание ВУТ.

Настоящая работа направлена на совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива, приготовленного на основе ТДОУ различной зольности и выхода летучих веществ, и создание конструкций теплогенераторов малой и средней мощности, работающих на этом топливе.

Работа выполнена в рамках выполнения научно-технических проектов:

§ проекта № 2010-218-02-174 «Разработка технологии и создание пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения» по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства»;

§ в рамках научных проектов №№ 17-48-240386, 18-48-242001 и 18-41-242004 при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», по Соглашению № 14.583.21.0004 о предоставлении субсидии от 16 июля 2014 г. Уникальный идентификатор научных исследований (проекта) RFMEFI58314X0004, а также при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края.

**Объект исследования** - водоугольное топливо.

**Предмет исследования** - технология и оборудование для сжигания водоугольного топлива.

**Целью работы** является разработка и создание теплогенераторов малой и средней мощности, работающих на водоугольном топливе, приготовленном на основе угольных шламов и тонкодисперсных отходов углеобогащения различных марок и зольности.

**Решаемые задачи:**

1. Выполнить анализ процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в вихревой адиабатической камере сгорания на основе термодинамического и химического подходов.

2. Выполнить численное моделирование процесса сжигания распыленного водоугольного топлива в адиабатической вихревой топке.

3. Определить взаимосвязь теплопроизводительности вихревой топки с её размерами и диаметром газовыпускного окна при сжигании ВУТ различного качества.

4. Разработать конструкции теплогенераторов малой и средней мощности:

4.1. с вертикальной осью вихревой топки;

4.2. с горизонтальной осью вихревой топки.

5. Определить технико-экономическую эффективность применения теплогенераторов малой и средней мощности, работающих на ВУТ различного качества, в разных отраслях промышленности.

**Научная новизна работы и основные положения, выносимые на защиту:**

– установлен характер влияния зольности и выхода летучих веществ на состав газовой фазы в атмосфере топки;

– установлено, что процесс горения различных по структуре частиц (распыленные капли и чисто угольные частицы) в адиабатической топке становится идентичным уже по истечении нескольких долей секунды, при этом

температурный режим стабильного горения ВУТ устанавливается в границах 850-1100°С в зависимости от выхода летучих веществ;

Время нахождения в топке капель ВУТ и образующихся при распылении ВУТ угольных частиц должно быть не менее 3-5 секунд.

– установлена взаимосвязь конструктивных параметров топки, теплопроизводительности и характеристик топлива;

– конструкции теплогенераторов малой и средней мощности.

**Практическая значимость** результатов работы состоит в том, что на основании анализа, выполненного с применением термодинамического и химического подходов, и численных расчетов процесса сжигания водоугольного топлива в вихревой адиабатической топке определены необходимые режимные параметры процесса сжигания. Обоснованы расчеты конструктивных параметров и разработаны конструкции теплогенераторов малой и средней мощности, работающих на ВУТ.

**Внедрение результатов работы** осуществлено при разработке теплогенераторов малой и средней мощности для сжигания ВУТ, приготовленного на основе ТДОУ. Разработаны конструкция топки и проект реконструкции котла ДКВР10-13 в производственной котельной на промплощадке угольного разреза ОАО «Междуречье» (г. Междуреченск). Разработана конструкция и создан теплогенератор, работающий на ВУТ, для сушки зерна. Разработана конструкция и создан теплогенератор на базе котлов «Теплотрон».

**Достоверность результатов работы** обеспечивается применением современных методов теоретических и экспериментальных исследований в области термодинамики, химии твердого топлива, теоретической теплотехники и математического моделирования. Результаты, полученные в процессе теоретических и экспериментальных исследований, подтверждены данными полупромышленных и промышленных испытаний разработанных конструкций теплогенераторов малой и средней мощности, работающих на ВУТ.

**Личный вклад автора** заключается во включенном участии автора на всех стадиях исследования: постановке и реализации задач исследования, разработке физико-химической модели горения капель ВУТ и угольных частиц, разработке основных положений научной новизны и практической значимости, разработке конструкций теплогенераторов малой и средней мощности и их внедрении в стендовых, полупромышленных и промышленных условиях.

**Апробация работы.** Представление и обсуждение результатов диссертационного исследования проходило на следующих мероприятиях: Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках выставки-ярмарки «Уголь России и Майнинг», (Новокузнецк, 2011); IV Международной научной экологической конференции «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства» (с участием экологов Азербайджана, Армении, Беларуси, Германии, Грузии, Казахстана, Киргизии, Латвии, Ливана, Молдовы, Приднестровья, России, Словакии, Узбекистана и Украины) (Краснодар, 2015); XVI Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс» (Кемерово, 2016); XVIII Международном конгрессе по обогащению угля XVIII International Coal Preparation Congress (Санкт-Петербург, 2016); The 8<sup>th</sup> Russian-Chinese Symposium Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety (Кемерово, 2016); MATEC Web of Conferences. Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy - Technical and Technological Equipment, НМТТСС (2016); XX Всероссийской научной конференции с международным участием «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» (Томск, 2016); Международном Российско-Казахстанском симпозиуме «Углекислота и экология Кузбасса» (Кемерово, 2017), Международной научно-технической конференции «Научно-техническое обеспечение АПК Сибири» (Краснообск, 2017).

**Публикации.** Основные результаты научных исследований по теме диссертации представлены в 39 опубликованных работах, в том числе 8 в

изданиях, рекомендованных ВАК, получено 19 патентов на изобретения и полезные модели.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных научных результатов и выводов, списка использованных источников из 106 наименований, 2 приложений, изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка и 39 таблиц.

**Методы исследований:** аналитический обзор и обобщение научно-информационных источников, патентов, нормативно-технических документов; анализ процессов горения на основании разработанной физико-химической модели на основании термодинамического и химического подходов, а также численное моделирование процессов воспламенения и горения капель и угольных частиц распыленного водоугольного топлива; математическая обработка результатов экспериментальных исследований и промышленных испытаний.

Автор выражает благодарность научному руководителю, сотрудникам ООО НПЦ «Сибэкотехника» за практическую помощь при проведении исследований и внедрении их результатов в производство.

## ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

### 1.1 Суспензионное угольное топливо из угольных шламов – основные характеристики и технология приготовления

Каменный уголь является одним из главных и наиболее дешевых энергоносителей, используемых для сжигания в теплогенерирующих агрегатах различных отраслей промышленности и в жилищно-коммунальном хозяйстве страны. В последнее десятилетие все более четко прослеживается тенденция замещения углеводородного жидкого и газообразного топлив на каменный уголь, что связано с высокой дефицитностью углеводородного топлива и постоянно растущими ценами на него. Увеличиваются удельная доля в топливном балансе и объемы использования угля в стране. Об этом же свидетельствуют постоянно растущие объемы добычи угля в целом по стране, и особенно в Кузбассе, являющемся одним из основных поставщиков энергетических марок угля.

Высокие требования потребителей к качеству угля способствуют развитию углеобогащения. За последние годы только в Кузбассе введено в строй более 10 углеобогачительных фабрик. Отличительными особенностями новых фабрик являются применение замкнутого водошламового цикла и отсутствие отделений термической сушки. Вместе с тем, при обогащении образуется 0,5÷7% от объема переработанного угля тонкодисперсных отходов с влажностью 20 ÷ 45% и зольностью от 18 до 60%. В настоящее время данный продукт не реализуется и сбрасывается в отвалы.

Количество таких отходов только в Кузбассе составляет свыше 150 млн. т и продолжает непрерывно возрастать. На отдельных фабриках ежегодно образуется от 0,8 до 1,2 млн тонн таких отходов. В результате усугубляется и без того неблагоприятная экологическая обстановка в регионе, а также безвозвратно теряются миллионы тонн добытого угля.

Утилизация углесодержащих отходов производится, как правило, наиболее примитивным образом. Воды шахтного притока, технологические воды

обогачительных фабрик с мелкими угольными частицами сбрасываются в поверхностные отстойники, которые периодически чистятся механогидравлическим способом, а повторно добытые угольные шламы сбрасываются либо в отработанные выработки шахт, либо в ближайшие овраги и водоемы. В отдельных случаях производится обезвоживание отходов флотации и их складирование на свободных площадях.

Указанная проблема присуща всем угледобывающим регионам России.

Неоднократно в 70-х - 80-х годах прошлого века эта тема включалась в государственные программы научно-исследовательских и проектных институтов. Однако современная техника и технология обогащения шламов не позволяют получать качественный товарный уголь при оптимальных затратах.

В последнее десятилетие, как в России, так и за рубежом стало появляться оборудование, позволяющее более эффективно обогащать мелкозернистый шлам (винтовые сепараторы, гидроциклоны, пневматические флотомашины и др.), а также механическое обезвоживающее оборудование, снижающее влажность обогащенного шлама (центрифуги с высоким фактором разделения, фильтр-прессы, фильтры под давлением). В качестве примера можно привести опыт вторичного обогащения угольных шламов на ЦОФ «Беловская» (г. Белово, Кемеровская область). Однако при этом улавливаются и обогащаются только крупные частицы шламов (20÷30%), а остальная часть снова направляется в отвалы.

Наиболее эффективным направлением утилизации отходов углеобогащения является их сжигание в виде водоугольных суспензий. В этом случае обеспечивается использование всего добытого угля по его прямому назначению, а образующаяся при сжигании зола является хорошим строительным материалом. В результате появляется возможность существенно сократить объемы площадей, занятых гидроотвалами и отстойниками, и рекультивировать нарушенные земли.

В большинстве европейских стран также реализуются программы по переводу энергетики на использование альтернативных видов топлив. Наиболее актуальным в данном аспекте является использование отходов углеобогащения,

как основного вида среди возобновляемых энергетических источников.

Одной из важнейших задач развития энергетики России также является частичная замена ископаемого топлива на углеотходы. В большинстве европейских стран также реализуются программы по переводу энергетики на использование альтернативных видов топлив. Наиболее актуальным в данном аспекте видится использование отходов углеобогащения, как основного вида среди возобновляемых энергетических источников.

За рубежом (Франция, США, Китай и др.) утилизация отходов углеобогащения производится путем приготовления и сжигания грубодисперсных водоугольных суспензий в котлах с кипящим слоем и пылеугольных котлах. При этом водоугольные суспензии используются как дополнительное топливо.

Государственной программой Правительства Китая в течение 10-ой пятилетки (2001-2005 г.г.) был реализован поэтапный перевод предприятий с нефтегазового топлива на водоугольное. Это позволило сократить импорт нефти более чем на 70 млн. т, а мазута – на 20 млн. т в год, что уменьшило зависимость топливно-энергетического комплекса страны от внешнего рынка. Для технического руководства по внедрению водоугольного топлива в КНР создан Государственный центр водоугольных суспензий угольной промышленности. В последние годы в Китае таких суспензий производится и потребляется более 20 млн. т в год. Топливоприготовление ведется на нескольких десятках заводов мощностью до 600 тыс. т в год. Потребителями стали ТЭЦ, ранее работавшие на мазуте. Используются водоугольные суспензии также предприятиями химической, металлургической, целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности. В ближайшие годы планируется довести производство ВУТ до 55 млн. т в год [1].

В мировой практике вопрос об использовании водоугольного топлива не потерял своей актуальности. Из официальной печати известно: работы по его совершенствованию и внедрению не прекращаются в Японии, Италии, США, Канаде и других странах. В США реализуется программа использования угля в промышленной и бытовой энергетике на ближайшие 6-10 лет с общим объемом



финансирования 6 млрд. долларов. Около 20 % этой суммы предполагается направить на решение проблем, связанных с созданием, транспортированием и использованием водоугольного топлива. По данным американских источников его широкое внедрение сдерживается относительно высокой стоимостью углеобогащения и противодействием прокладке магистральных углепроводов со стороны железнодорожных компаний и Конгресса США. При росте цены на нефть до 35 долларов за баррель и снятии ограничений на строительство углепроводов прогнозируется начало интенсивного применения водоугольного топлива в различных областях промышленности.

В настоящее время в области утилизации углеродсодержащих отходов наметились следующие тенденции развития технологии:

- приготовление суспензионного угольного топлива на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения и его утилизации путем сжигания в котлах большой мощности как дополнительного топлива;

- приготовление композиционных суспензий, где вместо угольного сырья (или вместе с ним) используются другие составляющие, например нефтепродукты или гидрофуз. Такие суспензии имеют более высокую теплоту сгорания по сравнению с угольными суспензиями, более низкую температуру воспламенения и, как следствие, более устойчивый режим горения. Однако себестоимость таких топлив из-за высокой стоимости составляющих существенно выше угольных суспензий, соответственно выше и сроки окупаемости таких установок;

- применение при сжигании топлив в котлах с кипящим или циркуляционным слоями, а также - вихревыми топками.

Подробный анализ технологий сжигания отходов углеобогащения и соответствующих котельных агрегатов представлен в разделе 1.3.

Особенностью современных обогатительных фабрик является полный замкнутый водношламовый цикл без наружных гидроотвалов и отстойников, а также отсутствие отделений термической сушки продуктов обогащения.

Образующиеся в процессе обогащения шламовые воды собираются в радиальном сгустителе. Сгущенный продукт радиального сгустителя поступает для обезвоживания на ленточный фильтр-пресс. Назначение фильтр-пресса – обезвоживание тонких шламов.

Вместе с установлением фильтр-прессов на фабриках появился побочный продукт обогащения – фильтр-кек. Высокие значения влажности и зольности и малая крупность частиц фильтр-кека заставляют производителей относить его к ТДОУ и как отход направлять в отвалы вместе с породой.

Между тем, количество тонкодисперсных отходов, образующихся на угледобывающих и углеобогащательных предприятиях, таково, что содержащейся в них энергии достаточно для 20 и более кратного удовлетворения собственных нужд предприятия в тепле.

Принципиальная схема установки фильтр-прессов на обогатительных фабриках (установках) представлена на рисунке 1.1 [2-4].

В таблице 1.1 представлена характеристика фильтр-кеков обогатительных фабрик России.

Наиболее приемлемой с технологическим, экономическим и экологическим подходами для использования ТДОУ является технология приготовления и сжигания водоугольного топлива. В последние годы в России данная технология была приспособлена для утилизации тонкодисперсных угольных шламов [5- 12]. Основными особенностями характеристик исходного сырья для приготовления водоугольного топлива из угольного шлама являются (таблица 1.1): максимальная крупность частиц шлама составляет 1(3) мм, повышенная зольность (до 43-47% для шлама), и, соответственно, более низкая теплота сгорания рабочего топлива (11,5МДж/кг). Указанные параметры, а также то, что в шламах присутствуют флокулянты и коагулянты различной природы (до 400г/т), требуют разработки соответствующих технологических и технических решений по приготовлению и сжиганию топлива при его получении на основе ТДОУ.

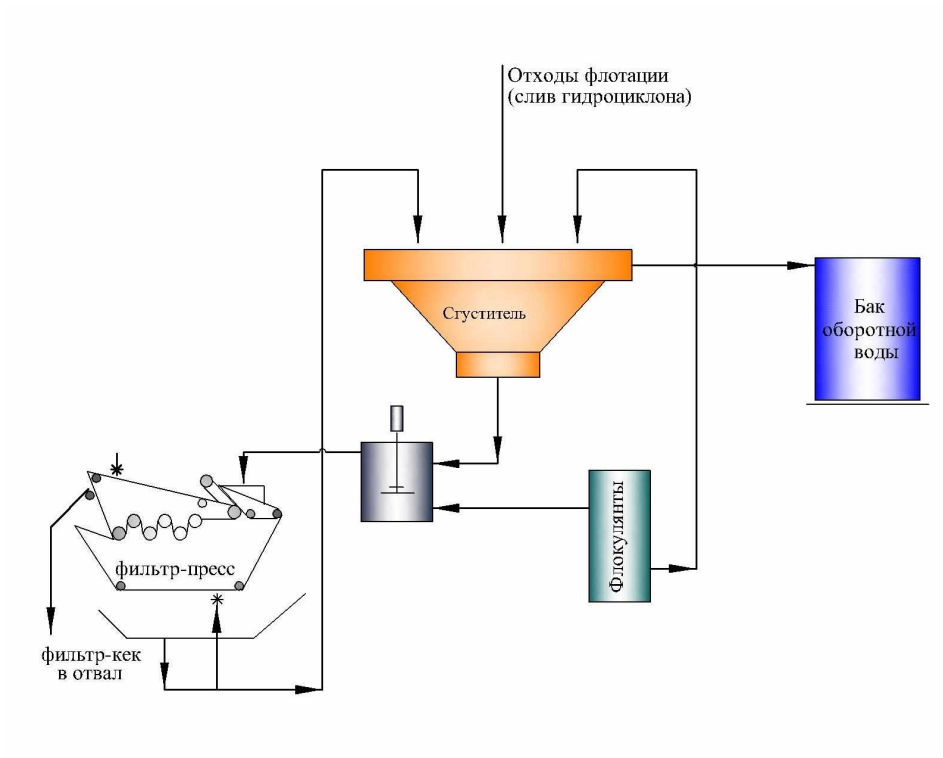


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема установки фильтр-пресса на ОФ.

Таблица 1.1 – Характеристика отходов обогатительных фабрик России.

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование ОФ</b>	<b>Продукты обезвоживания</b>	<b>Влага, %</b>	<b>Зольность, %</b>	<b>Низшая теплота сгорания, ккал/кг (средн.пок.)</b>	<b>Выход, т/год</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
1	ЦОФ «Абашевская»	Тонкие шламы марки Г, Ж и ГЖ	22 , 30	18 , 25	4000	<b>96 000</b>
2	ОФ Антоновская»	Тонкие шламы марки ГЖ	40 , 44	25 , 35	3300	<b>198 000</b>
3	ЦОФ «Щедрухинская»	Тонкие шламы марки Г и ГЖ	до 45	13 , 25	3100	<b>114 000</b>
4	ОФ «Бачатская Коксовая»	Тонкие шламы марки К	35	39 , 52	2700	<b>180 600</b>
5	ОФ «Бачатская Энергетическая»	Тонкие шламы марки СС	30 , 38	7,3	4100	<b>43 400</b>
6	Разрез Красногорский	Тонкие шламы марки А, Т	35 , 38	20 , 25	3800	<b>96 000</b>
7	ЦОФ «Кузбасская»	Тонкие шламы марки КС	40 , 45	22 , 23	3400	<b>120 000</b>
8	ОФ «Северная»	Отходы флотации и тонкие шламы марки К,КО	до 45	22 , 35	3300	<b>108 000</b>

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
9	ОФ «Спутник»	Тонкие шламы марки Г	до 40	23 , 30	3300	<b>108 000</b>
10	Разрез «Шестаки»	Тонкие шламы марки СС,КС, КО	до 30	20 , 23	4100	<b>60 000</b>
11	ОФ «шахты им. Кирова»	Тонкие шламы марки Г	35 , 40	30 , 40	2800	<b>960 000</b>
12	ОФ «шахты Комсомолец»	Тонкие шламы марка Г	37 , 38	34,5	2900	<b>330 000</b>
13	ОФ «Талдинская-энергетическая»	Тонкие шламы марки Г, ДГ	25 , 38	35	3300	<b>720 000</b>
14	ОФ «Тугнуйская»	Тонкие шламы марка Д	до 40	до 50	2600	<b>1 250 000</b>
15	ОФ «Печорская»	Тонкие шламы марки К, ГЖ, Ж	20	27	4300	<b>180 000</b>
16	ОФ «Нерюнгринская»	Тонкие шламы марки К,СС	34 , 36	26 , 36	3200	<b>294 000</b>
17	ОУ «Барзасское товарищество	Тонкие шламы марки К, КС	до 35	19,8	3900	<b>52 500</b>
18	ЦОФ «Беловская»	Тонкие шламы марки Ж, ГЖ, КС	до 50	55 , 70	1600	<b>294 000</b>
19	ЦОФ «Березовская»	Тонкие шламы марки КС	до 50	48 , 55	2200	<b>252 000</b>
20	ЗАО ОФ «Междуреченская» 2 техкомплекс	Тонкие шламы марки КС,ОС, Т	до 45	55 , 65	1700	<b>172 200</b>
21	ОФ «Калтанская»	Тонкие шламы марки Т	25	25	4400	<b>440 000</b>
	<b>ИТОГО:</b>					<b>5 982 300</b>

В настоящее время разработано два основных варианта технологических схем приготовления ВУТ на основе ТДОУ:

- вариант №1 (рисунок 1.2): использование двухшнекового смесителя в качестве основного технологического оборудования;
- вариант №2 (рисунок 1.3): использование в качестве основного технологического оборудования двухшнекового смесителя и мельницы (вибрационной либо барабанной) для доизмельчения и дополнительного перемешивания.

Поскольку основным исходным материалом для приготовления угольного топлива является фильтр-кек углеобогажительных фабрик, крупность частиц угольного топлива, в том числе гранулометрический состав определяются аналогичными показателями для частиц фильтр-кека. Как правило, крупность частиц фильтр-кека большинства углеобогажительных фабрик не превышает 500 мкм. Для упрощения технологической схемы приготовления угольного топлива и снижения энергоемкости процесса в технологии получения ВУТ, как правило, не предусматривается процесса доизмельчения частиц твердой фазы.

Таким образом, в первом варианте фактически исключается управление гранулометрическим составом частиц ВУТ.

Описание технологической схемы приготовления ВУТ на основе ТДОУ (вариант №1, рисунок 1.2).

Тонкодисперсные отходы автотранспортом доставляется на закрытый склад технологического комплекса. Емкость склада обеспечивает 3-х суточный запас исходного материала. Склад располагается в непосредственной близости от технологического оборудования участка приготовления ВУТ.

Со склада тонкодисперсные отходы погрузчиком подаются в приемную воронку ленточного конвейера, который направляет их в двухшнековый смеситель. Одновременно с отходами в смеситель подается дозировано из расходной емкости насосом-дозатором водный раствор реагента.

Водный раствор реагента готовится в установке приготовления состоящей из металлической емкости с мешалкой и центробежного насоса.

Реагент дозированно загружается в емкость и после перемешивания с водой насосом подается в расходную емкость.

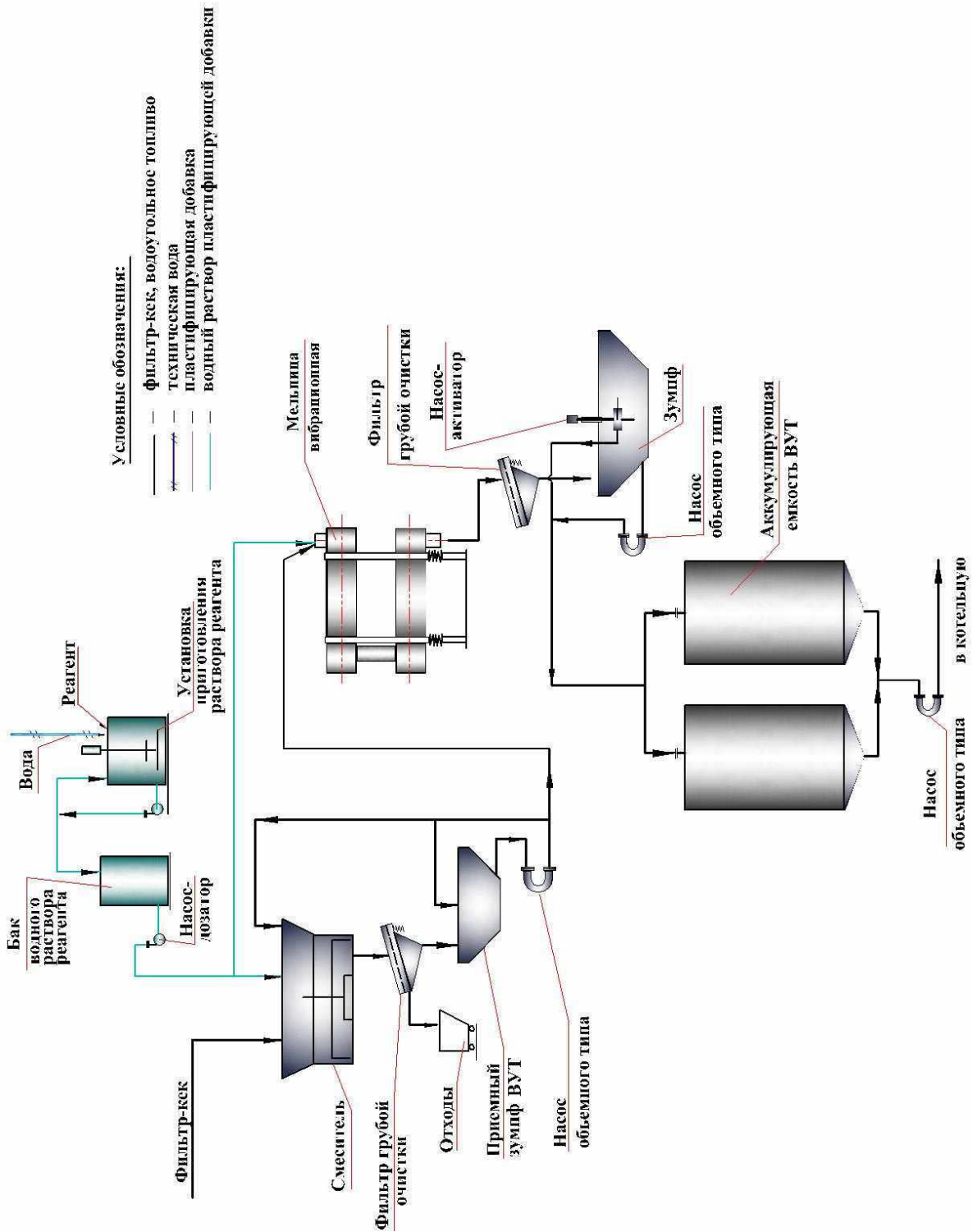


Рис.1.2 - Технологическая схема приготовления ВУТ (вариант №1).

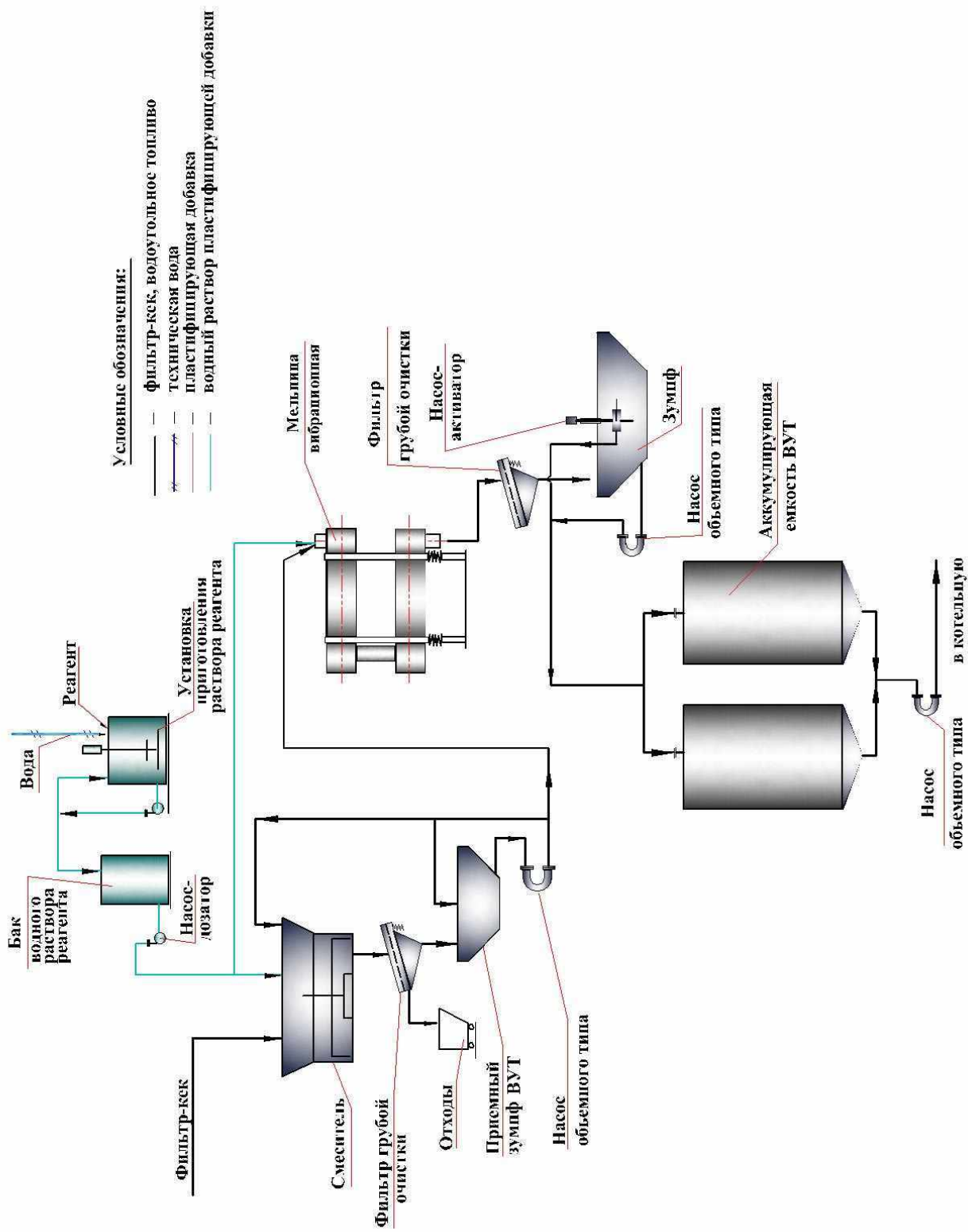


Рисунок 1.3 - Технологическая схема приготовления ВУТ (вариант №2).



После перемешивания в смесителе тонкодисперсных отходов с водным раствором реагента угольная суспензия самотеком поступает на фильтр грубой очистки для удаления посторонних примесей и крупных частиц. После фильтрации подрешетный продукт самотеком поступает в зумпф и затем насосом-активатором направляется в аккумулирующую емкость, при этом осуществляется процесс гомогенизации, что позволяет снизить вязкость топлива.

Готовое ВУТ аккумулируется в вертикальных металлических резервуарах с нижним выпуском. Количество и объем резервуаров обеспечивает суточную потребность котельной установки.

В настоящее время технологические приемы приготовления и сжигания ВУТ реализованы не только в лабораторных условиях, но и в полупромышленных масштабах на нескольких котельных как в России, так и за ее пределами.

По второму варианту ТДОУ загружаются в смеситель, куда одновременно с ним дозировано подаётся водный раствор реагента-пластификатора. После смешивания в смесителе полученная водоугольная суспензия разгружается в приемную ёмкость, откуда насосом дозировано подаётся в вибромельницу на доизмельчение и дополнительное перемешивание.

***Основными характеристиками суспензионного угольного топлива являются:***

- крупность частиц, в том числе гранулометрический состав;
- зольность;
- массовая доля твердой фазы;
- реологические характеристики, в т.ч. эффективная вязкость, начальное напряжение сдвига;
- статическая и динамическая стабильность при хранении и транспортировании;
- низшая теплота сгорания.

Эти параметры определяют реологические свойства и стабильность ВУТ как жидкого топлива при транспортировке, хранении и распылении в камере сжигания. Они же определяют условия сжигания или газификации ВУТ, энергетические и экологические показатели использования ВУТ в энергетике. Для получения ВУТ с оптимальными характеристиками необходимо технико-экономическое исследование с учетом энергетических и экологических факторов.

Таблица 1.2 - Усредненная характеристика фильтр-кека и ВУТ, приготовленного по различным схемам.

№ п/п	Наименование параметра	Ед-ца изм.	Значение			
			Схема №1		Схема №2	
			ТДОУ	ВУТ	ТДОУ	ВУТ
1	Марка угля	мм	Г	Г	Т	Т
2	Крупность частиц	мм	0 - 0,5	0 - 0,5	0-0,6	0-0,250
3	Влажность	%	33	42	29,4	40
4	Зольность	%	25 - 28	25 - 28	21,3	21,3
5	Низшая теплота сгорания	ккал/кг (МДж/кг)	3600- 3800 (15,1- 16,0)	3100 – 3300 (13–14)	4375 (18,3)	3631 (15,2)
6	Эффективная вязкость при скорости сдвига $81 \text{ с}^{-1}$	мПа·с	-	не более 800	-	менее 500
7	Расход реагента- пластификатора	% от сухой массы ТДОУ	-	0,5	-	0,3

## 1.2 Обзор результатов аналитических исследований процесса горения водоугольных суспензий

Водоугольные суспензии (суспензионное угольное топливо) содержат от 28 до 50 % воды и представляют собой равномерную смесь очень мелких частиц угля и воды. Для понижения вязкости водоугольных суспензий и придания им стабильности в них вводится небольшое количество реагента-пластификатора. В результате образуется искусственная дисперсная система, представляющая собой новый вид энергетического топлива получаемого из угля – композиционное водоугольное топливо (ВУТ) [13,14].

Большой вклад в исследование процесса горения водоугольных суспензий и в развитие теории горения ВУТ внесли фундаментальные работы Г.Н. Делягина и его учеников [15- 21].

Горение потока капель распыленной водоугольной суспензии представляет собой сложный физико-химический процесс, протекающий, особенно на начальной стадии, в условиях резкой неизотермичности среды [16].

Основные отличия процесса воспламенения и горения капли водоугольной суспензии от горения пылевидного твердого и распыленного жидкого топлива были выявлены в ходе опытных исследований по сжиганию водоугольных суспензий, проведенных Г.Н. Делягиным, и заключаются в следующем:

- низкотемпературная активация реакционной поверхности топлива на стадии воспламенения [22];
- возрастание удельной реакционной поверхности в основной зоне процесса горения [23];
- интенсификация процесса горения за счет реакции углерода топлива с водяным паром, протекающей параллельно основной реакции горения [16].

Для понимания механизма горения ВУТ необходимо учитывать, что сжигание водоугольных суспензий в топочном объеме производится путем их

распыления в потоке воздуха. При этом образуются капли суспензии размером от  $0,05 \cdot 10^{-3}$  м до  $0,2 \div 0,3 \cdot 10^{-3}$  м. Число частиц угля в капле составляет несколько тысяч размером от 0 до  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м. Количество частиц угля размером от  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м до  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м в массе суспензии не превышает  $1 \div 2$  % [17]. В каждой капле суспензии сохраняется первоначальный ее состав. Причина сохранения при распылении всех исходных характеристик водоугольных суспензий состоит в том, что в этих смесях, представляющих собой структурированные системы очень мелких частиц угля и воды, внешние и внутренние силы сцепления намного превосходят инерционные силы, дополнительно возникающие при распылении вследствие разности плотностей воды и угля. Они сохраняют свою структуру в распыленном состоянии, когда это топливо впрыскивается через форсунку в топочный объем камеры сгорания. При распылении суспензий даже при применении ротационных форсунок сепарации твердых частиц и воды не происходит [18].

Как показали лабораторные исследования, проведенные Г.Н. Делягиным [21], горение капли водоугольной суспензии протекает одновременно с испарением влаги из ее внутренней части, причем испарение влаги не замедляет процесса горения углерода. Вырывающиеся из внутренней части капли струи пара активизируют горение на поверхности капли. В результате одновременного течения этих двух процессов капля суспензии превращается в пористое тело, что обеспечивает интенсивный контакт с кислородом и быстрое полное догорание углерода.

Анализ результатов исследования процесса горения водоугольных суспензий из углей марки Т показывает, что реакция горения развивается одновременно с испарением влаги топлива [21]. Процесс испарения влаги не только не снижает скорости реакции горения, но, наоборот, увеличивая поверхность реакции, ускоряет процесс горения. Там же показано, что наиболее существенными факторами, определяющими необходимые начальные условия процесса, являются степень измельчения суспензии (величина капель), качество перемешивания топлива с воздухом и тепловой уровень в начальной зоне горения.

В работе [24] приведены результаты исследования по сжиганию водоугольной суспензии из угля марки Г, которые показывают, что главной особенностью выгорания капли водоугольной суспензии является то, что в процессе горения она не распадается на исходные твердые частицы, а сохраняет свою структуру до полного выгорания углерода топлива. В этих условиях вода, заключенная в капле суспензии, на стадии воспламенения и в начальный период горения активизирует углеродную поверхность частиц, а затем активно реагирует с углеродом топлива, увеличивая скорость выгорания углерода.

Исследования условий, при которых совместно протекают процессы испарения воды и выгорания капли водоугольной суспензии, представленные в работе [18], показали, что в общем случае при испарении влаги из капли топлива можно выделить два этапа. На первом этапе испарение влаги протекает при переменной температуре поверхности, причем температура поверхности ниже температуры воспламенения топлива. На втором этапе капля воспламеняется, и температуру можно считать постоянной. В ходе исследований было установлено, что время полного испарения наиболее мелких капель суспензии (соизмеримых с размером твердых частиц, заключенных в них) определяется первой стадией испарения, во время которой непрерывно возрастает температура поверхности. Для капель топлива диаметром  $0,2 \div 0,4 \cdot 10^{-3}$  м испарение проходит через две стадии, причем вторая стадия, протекающая при одновременном выгорании топлива с поверхности капли, является по времени определяющей.

Испарение влаги из капли в основном протекает параллельно с горением углерода топлива, поэтому все твердые частицы, заключенные в капле, проходят через ее раскаленную поверхность, где углеродные частицы выгорают, а минеральная часть спекается, образуя прочный пористый агломерат. Так как во время выгорания капли с поверхности зона испарения воды распространяется на внутренние слои капли, там развивается повышенное давление, в результате чего размер капли увеличивается. К концу испарения влаги в капле суспензии из угля марки Г выгорает около 50% угля. При этом капля увеличивается в 3 раза, и ее средняя пористость (в пересчете на

беззольное топливо) составляет около 98% [24].

По мере выгорания топлива из-за вращения капли при движении в потоке воздуха твердые частицы отбрасываются к внешней поверхности капли, в результате чего внутри капли образуется полое пространство. При этом толщина стенки агломерата зависит от зольности исходного топлива и может достигнуть размера исходных зольных частиц ( $d_t \gg 90$  мк).

Высокая пористость агломерата при значительных его размерах обеспечивает высокую полноту выгорания углерода. При сжигании водоугольной суспензии из угля марки Г величина механического и химического недожога на эксплуатационных режимах не превышала 0,5÷1,0%.

Проведенное авторами работы [24] исследование зольных частиц, образующихся при сжигании сухой пыли и водоугольной суспензии из одного и того же угля, показало, что при сжигании суспензии, в связи с образованием агломератов резко снижается число зольных частиц и увеличиваются их размеры (с  $0,01 \div 0,05 \cdot 10^{-3}$  м до  $0,5 \div 1,5 \cdot 10^{-3}$  м), а также меняется структура поверхности.

В работе [15] отмечено, что отличительной особенностью процесса является параллельное протекание испарения влаги, находящейся в капле распыленной водоугольной суспензии, и выгорания твердого топлива в результате химической реакции его с кислородом воздуха и водяным паром. При этом важна роль воды, адсорбированной на поверхности частиц водоугольной суспензии. При нагреве такая влага способствует более ранней десорбции различных газов, в том числе двуокиси углерода, азота и некоторых других, и активации, в связи с этим, поверхности частиц перед их воспламенением.

Таким образом, вода является не только промежуточным окислителем углерода (в виде водяного пара), но и катализатором, активизирующим углеродную поверхность, уменьшающим энергию активации реакции углерода с кислородом воздуха и снижающим температуру воспламенения этого топлива по сравнению с температурой воспламенения сухого угля.

Это свойство воды, заключенной в капле распыленной водоугольной

суспензии, приводит к практическому исчезновению в факеле зоны подготовки топлива. Параллельное протекание процесса испарения влаги топлива и процесса выгорания углерода приводит в известной степени к унификации всех каменных углей, поскольку выход летучих уже не определяет реакционную способность этого топлива и мало влияет на температуру воспламенения угля.

Экспериментальные исследования, опубликованные в работе [18] показали, что температура воспламенения капли водоугольной суспензии для углей с содержанием летучих  $V^f = 3,43\%$  лежит в пределах  $490\div 440^\circ\text{C}$ , в то время как температура воспламенения воздушно-сухих углей с тем же содержанием летучих лежит в пределах  $950\div 500^\circ\text{C}$ . Экспериментальные исследования закономерностей выгорания распыленной водоугольной суспензии показали, что такое топливо при влажности до  $60\div 65\%$  воспламеняется непосредственно у распыляющего устройства, образует высоконапряженный, плотный, светящийся факел, характеризующийся высокими скоростями выгорания топлива [25].

Ученые из СибГИУ провели моделирование процесса сжигания капель водоугольной суспензии диаметром  $0,2\div 0,3\cdot 10^{-3}$  м, в котором за основу принят механизм горения, предложенный Г.Н. Делягиным [17] и заключающийся в следующем.

Распыленные капли водоугольной суспензии в потоке воздуха, попадая в высокотемпературную окислительную среду, сначала подсыхают с поверхности (стадия поверхностного испарения влаги), затем зона испарения влаги проходит внутрь капли, образуя на поверхности высокопористый прочный конгломерат частиц угля с высоким термическим сопротивлением. Это приводит к тому, что уже в начальный период испарения влаги в массе капли суспензии в зоне испарения происходят процессы на поверхности угольных частиц, снижающие энергию активации их реакции с кислородом. Задолго до завершения испарения влаги температура образовавшегося на поверхности капли агломерата угольных частиц достигает температуры воспламенения, что приводит к воспламенению угольных частиц в агломерате.

Влага суспензии из центральных районов капли, диффундируя к поверхности, переносит частицы угля к ее периферии так, что к концу процесса испарения вместо капель образуется ксеносфера (полая сфера) процесс горения которой завершается образованием аналогичной ксеносферы, но состоящей только из частиц золы угля суспензии. Влага топлива, проходя сквозь зону горения, активно участвует в реакции с углеродом:  $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ , а образующиеся продукты реакции в присутствии водяного пара полностью догорают вокруг поверхности образовавшегося агломерата капли.

Капля водоугольной суспензии, включающая большое число мелких частиц твердого топлива, попав в высокотемпературную окислительную среду, мгновенно подсыхает с поверхности, в результате чего внутри капли образуются следующие характерные зоны (рисунок 1.4).

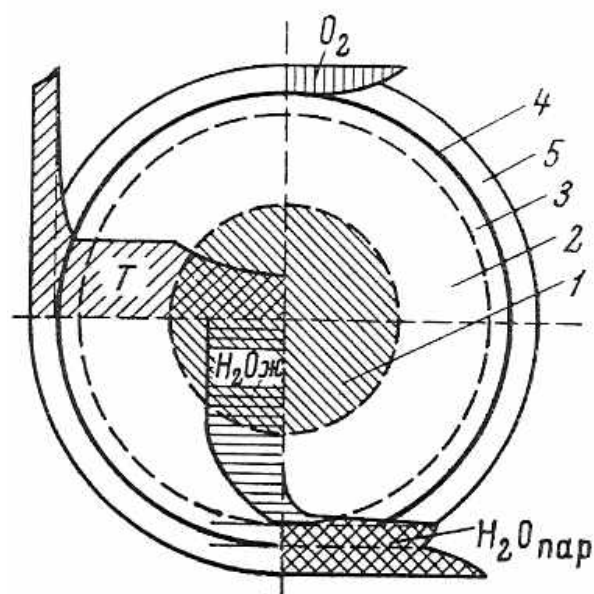


Рисунок 1.4 – Схема выгорания капли водоугольной суспензии по зонам.

1 – зона исходного топлива (суспензии), температура которой равна температуре кипения воды или более низкая.

2 – зона испарения влаги топлива, ширина которой определяется изотермическими поверхностями начала и конца кипения воды. Процессы, протекающие в этой зоне, сопровождаются выделением ранее сорбированных угольной поверхностью газообразных продуктов окисления угля ( $CO_2$  и др.) и



обнажением угольной поверхности [22].

3 – зона перегрева водяных паров, термического разложения угля и начала интенсивной реакции углерода с водяным паром.

4 – зона поверхностного горения угля и разложения водяного пара.

5 – зона объемного догорания продуктов промежуточных реакций.

$O_2$  – поле концентрации кислорода,

$T$  – поле температур,

$H_2O_{ж.}$  – поле распределения влаги,

$H_2O$  – поле концентраций перегретого пара по радиусу агломерата капли.

Данный механизм выгорания распыленной водоугольной суспензии подтвержден лабораторными исследованиями, проведенными в Институте горючих ископаемых по сжиганию водоугольных суспензий [20,26]. Стендовые эксперименты позволили детально исследовать закономерности выгорания суспензии и влияние на полноту выгорания топлива: температуры воздуха, коэффициента избытка воздуха, влажности, крупности и зольности водоугольной суспензии, условий ввода топлива и воздуха, а также ряда других параметров.

В работе [27] представлены результаты экспериментальных исследований динамики горения капель водоугольной суспензии с диаметром капель от 0,4 до  $2 \cdot 10^{-3}$  м. При испарении воды и выходе летучих в каплях суспензии диаметром 0,4- $2 \cdot 10^{-3}$  м сильно развивается внутриобъемная поверхность, в результате чего идет внутривещное окисление топлива с взрывным выделением и горением летучих, после чего происходит догорание коксового остатка. При исследовании было установлено, что время горения коксового остатка велико по сравнению с остальными фазами процесса. Сравнение скорости горения водоугольной суспензии с предварительно подсушенными каплями водоугольной суспензии, показало, что при одной и той же температуре коксового остатка массовая скорость горения капли выше, чем предварительно высушенной суспензии, что связано как с частичным взаимодействием углерода (наряду с кислородом) с парами воды (парокислородная газификация), так и с развитием окислительной поверхности

вследствие микровзрывного характера горения из-за интенсивного испарения воды.

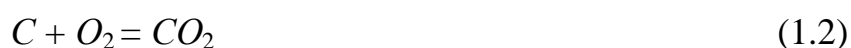
Эксперименты по изучению процесса горения крупных капель водоугольного топлива, описанные в работе [28], показали, что режим горения каплей диаметром  $30\div 36\cdot 10^{-3}$  м будет меняться в зависимости от температуры среды. С одной стороны, ускорение подсушки поверхности приводит к образованию корочки, препятствующей разрушению капли, а с другой – чрезмерная интенсификация процесса испарения повышает вероятность разрыва капли за счет увеличения давления внутри нее. При влажности 50% смесь обладает пониженной вязкостью и при относительно невысоких температурах кипящего слоя капля дробится на мелкие осколки, так как сушка поверхности замедлена. С увеличением температуры кипящего слоя до 900 °С корочка на поверхности капли образуется быстрее, при этом наблюдается рост размеров остающихся кусков. При дальнейшем повышении температуры процесс сушки чрезмерно интенсифицируется, и водяные пары разрывают каплю.

Таким образом, процесс горения распыленного водоугольного топлива делится на неизотермическую (неравновесную) и изотермическую (квазиравновесную) стадии [17]. На первой стадии происходит испарение воды из капли и образование капиллярно-пористого агломерата. На этой же стадии начинаются реакции на поверхности частицы при активном участии водяного пара: газификация одновременно с выгоранием выделившихся летучих. Эта стадия заканчивается, когда температура поверхности частицы (или агломерата) становится близкой к температуре несущего газового потока и далее меняется вместе с ней. Параллельное протекание процесса испарения влаги топлива и процесса выгорания углерода приводит в известной степени к унификации всех каменных углей, поскольку выход летучих уже не определяет реакционную способность этого топлива и мало влияет на температуру воспламенения угля.

При выполнении проекта «Разработка научно-технических основ для создания технологии подготовки и сжигания суспензионного угольного

топлива, приготовленного на основе отходов углеобогащения, и пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса» совместно с учеными СибГИУ была выполнена оценка процесса горения капель ВУТ, с определением времени сгорания частиц угля в зависимости от размера частиц и температуры среды [5].

Механизм реагирования углерода с кислородом представлен следующим образом [29- 32]. Из газового объема кислород адсорбируется на поверхности углерода. На ней атомы кислорода вступают в химическое соединение с углеродом, образуя сложные углеродно-кислородные комплексы  $C_xO_y$ . Последние распадаются с образованием  $CO_2$  и  $CO$ , скорость распада сильно увеличивается с ростом температуры. Получающаяся углекислота может реагировать с твердой фазой, образуя  $CO$ , а окись углерода, получаемая как в первичном, так и во вторичном процессах реагирования, вступает в химическое соединение с кислородом в газовой фазе. В соответствии с этим основные реакции представляются так:



Реагирование протекает на поверхности частицы топлива сферической формы; частица движется с одинаковой скоростью вместе с газовой средой; горение выделяющихся летучих и догорание продуктов неполного сгорания происходит в объеме газовой среды. Конвективный перенос тепла из системы и лучистый теплообмен отсутствуют; теплообмен реагирующих частиц с газовой средой происходит путем конвекции.

В начальный момент времени газовая среда имеет температуру, значительно превышающую температуру частицы. Частица топлива воспринимает тепло газовой среды конвекцией и нагревается. При этом из нее возгоняются летучие. Выделяющиеся летучие могут реагировать в газовой

фазе, а твердая коксовая масса - в гетерогенном режиме. В большинстве случаев для реальных топливных частиц прогрев и горение летучих – довольно быстрые процессы и составляют по времени не более 10% по сравнению со временем горения коксового остатка, что позволяет пренебречь ими в расчетах времени горения твердых частиц топлива [33].

В соответствии с рассмотренным механизмом горения на основе уравнений теплового и материального баланса получили следующую математическую модель.

*Моделирование прогрева частицы твердого топлива*

Кинетику прогрева частицы можно описать балансовым уравнением:

$$m_{\kappa} c_{\kappa} \frac{dT_{\kappa}}{dt} = a_{\kappa} S (T_g - T_{\kappa}), \quad (1.5)$$

где  $m_{\kappa}$  - масса частицы, кг;

$S = \rho d^2$  - площадь, частицы, м<sup>2</sup>;

$c_{\kappa}$  - коэффициент теплоемкости частицы, кДж/(кгЖ);

$a_{\kappa}$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>Ж);

$T_{\kappa}, T_g$  - температура частицы и газа, К;

$t$  - время, с.

Для сферических однородных частиц, введя критерий Нуссельта  $Nu = a_{\kappa} d / l_g$ , получим:

$$\frac{dT_{\kappa}}{dt} = \frac{6Nu}{c_{\kappa} r_{\kappa} d} (T_g - T_{\kappa}), \quad (1.6)$$

где  $r_{\kappa}$  - плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;

$l_g$  - коэффициент теплопроводности газа, кДж/(кгЖ).

Интегрирование уравнения (1.6) и преобразование с учетом критериев Био и Фурье позволяют определять текущую температуру частицы:

$$T_{\kappa} = T_g - (T_g - T_{\kappa 0}) \exp(-3BiFo), \quad (1.7)$$

где  $Bi = a_k d / 2l_k$  – критерий Био;

$Fo = 4l_g t / c_k r_k d^2$  – критерий Фурье.

Тогда полное время прогрева можно описать соотношением:

$$\tau \approx 0,384 \frac{c_k r_k d^2}{Nu_g} \lg\left(1 - \frac{Q}{Q_{max}}\right), \quad (1.8)$$

где  $Q_{max} = m_k \times c_k \times (T_g - T_{k0})$  – максимальное количество тепла, которое может быть поглощено частицей (за бесконечное время);

$Q$  – количество тепла, которое поглощает частица к моменту времени  $t$ .

#### *Моделирование горения частицы твердого топлива*

В основу расчета горения коксового остатка частицы твердого топлива положено уравнение баланса массы, записанное в виде скорости уменьшения диаметра сферической частицы:

$$\frac{dd}{dt} = \frac{2m}{r_k} G, \quad (1.9)$$

где  $m = 0,012$  – молекулярная масса углерода, кг/моль;

$G$  – скорость выгорания углерода, моль/м<sup>2</sup>·с.

Время горения частицы от начального размера  $d_0$  до текущего размера  $d$  найдем, проинтегрировав уравнение (1.9):

$$\tau = - \frac{1}{2m_{d_0}} \int_{d_0}^d \frac{r_k}{G} dd. \quad (1.10)$$

Скорость выгорания углерода определим по следующему соотношению:

$$\frac{dG}{dt} = C \times k' \times e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (1.11)$$

где  $C$  – концентрация;

$k'$  – суммарная константа скорости реакции учитывающая кинетику реакции ( $k$ ) и интенсивность массообмена газовой среды с поверхностью

$$\text{частицы (b)} \quad \frac{1}{k'} = \frac{1}{k} + \frac{1}{b};$$

$E$  - энергия активации, КДж/моль.

Для мелких частиц коэффициент массообмена определяется из критерия Шмидта [33].

$$Sc = \frac{b \cdot d}{D} \gg 2,1 \quad (1.12)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии.

Полное время горения выразим из (1.10) с учетом (1.11):

$$\tau = \int_0^{d_0} \frac{r_{\kappa}}{c C_0 k'} dt, \quad (1.13)$$

$c$  - стехиометрический фактор, учитывающий соотношение оксидов углерода у поверхности частицы и догорание  $CO$  в пограничном объеме газа;

$C_0$  - концентрация кислорода в газовой среде.

После интегрирования и преобразования с учетом уравнения (1.12) получили:

$$\tau = \frac{r_{\kappa} d_0^2}{8 c C_0 D} \frac{e^{\frac{E}{RT}}}{k_0 d_0} + \frac{4D}{k_0 d_0} \frac{e^{\frac{E}{RT}}}{k_0 d_0} \quad (1.14)$$

Для зольных углей, когда в угле содержится  $A$  % золы, выражение (1.14) принимает вид:

$$\tau = \frac{100 - A}{100} \times \frac{r_{\kappa} d_0^2}{8 c C_0 D} \frac{e^{\frac{E}{RT}}}{k_0 d_0} + \frac{4D}{k_0 d_0} \frac{e^{\frac{E}{RT}}}{k_0 d_0} \quad (1.15)$$

Расчет времени сгорания частиц угля проводили для частиц диаметром от  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м до  $1 \cdot 10^{-3}$  м и при температуре среды от  $1200$  °С до  $1400$  °С. Результаты



Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,6	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07
1,7	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40
1,8	5,73	5,73	5,73	5,73	5,73	5,73	5,73	5,73	5,73
1,9	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07
2,0	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40

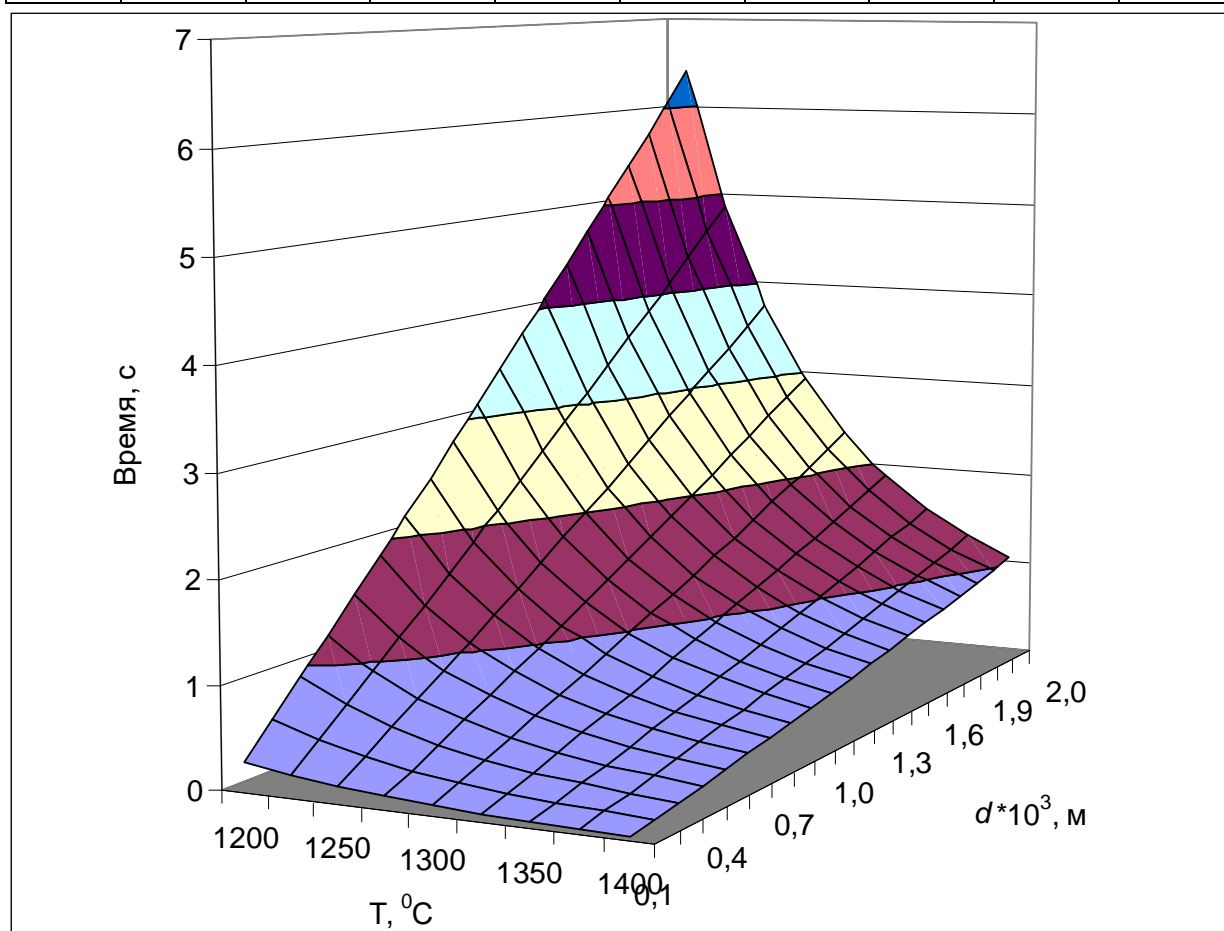


Рисунок 1.5 – Зависимость времени сгорания частиц угля от температуры среды и размера частиц

Однако указанные закономерности не подтверждаются результатами экспериментальных и опытно-промышленных работ НПП «Сибэкотехника» по сжиганию суспензионных угольных топлив, приготовленных на основе высокозольных угольных шламов.

В связи с этим в последние годы В. И. Мурко и его учениками разработана новая модель распыления и сжигания суспензионных угольных топлив [34- 38]. Согласно данной модели распыление водоугольного топлива



сжатым воздухом или водяным паром осуществляется следующим образом. После смешивания ВУТ и распыляющего агента в форсунке последующее дробление струи ВУТ происходит при ее выходе за счет ее кинетической энергии и сопротивления окружающей среды.

При распылении ВУТ образуются как чисто угольные частицы («капли-частицы» крупнее  $0,80 \div 1 \cdot 10^{-3}$  м), с которых за счет сил гидродинамического трения срывается жидкая пленка с наиболее тонкими частицами, так и водоугольные капли, состоящие из тонких частиц угля и жидкой фазы. Механизм распыления при этом осуществляется следующим образом. Движущиеся капли подвергаются воздействию сил трения окружающей среды ( $\gamma r V_r^2$ ), которые стремятся расплющить и раздробить капли. Напротив, силы поверхностного натяжения ( $2s / r_k$ ) стремятся придать каплям сферическую форму. Когда давление сил трения больше давления силы поверхностного натяжения, происходит дробление капель. Капли максимального размера получаются из равенства этих сил, т.е.

$$\gamma r V_r^2 = \frac{2s}{r_k}, \quad (1.16)$$

откуда

$$r_k = \frac{2s}{\gamma r V_r^2}, \quad (1.17)$$

где  $\gamma$ ,  $r$  – коэффициент сопротивления и плотность газовой среды;

$V_r$  – относительная скорость капли по отношению к газовой среде;

$s$  – коэффициент поверхностного натяжения;

$r_k$  – радиус капли.

Из формулы (1.17) видно, что диаметр капель ВУТ существенно зависит от поверхностного натяжения, плотности среды и относительной скорости движения капли.

На рисунке 1.6 показана зависимость диаметра распыленных капель ВУТ от скорости их движения при различных значениях поверхностного натяжения. Расчеты проводились для различных значений  $s = 0,040 \div 0,060$  кг/с<sup>2</sup>,  $\gamma = 0,25$ ,

$$r = 1,4 \text{ кг/м}^3.$$

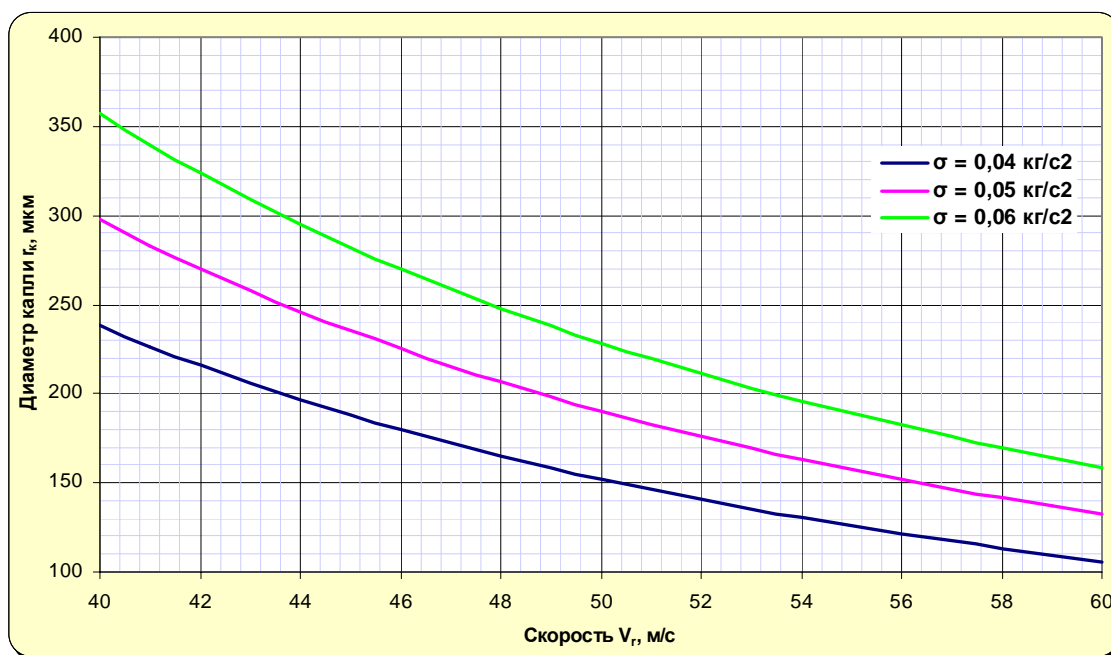


Рисунок 1.6 – Зависимость диаметра распыленных капель от скорости их движения

Как видно из рисунка 1.6, чем выше относительная скорость движения, тем меньше максимальный диаметр образующихся капель. При скорости вылета распыленных капель из сопла форсунки, равной 40÷60 м/с, максимальный диаметр капель составляет от 0,1 до  $0,3 \cdot 10^{-3}$  м.

Данная модель была подтверждена экспериментально при исследовании процессов распыления, зажигания и горения суспензионного угольного топлива, приготовленного из углей различных марок, отличающихся выходом летучих веществ (от 5÷7% для антрацитов до 40÷42% для углей марки Д) и зольности (8÷36%). При этом установлено, что для зажигания и стабильного горения суспензионного угольного топлива, приготовленного на основе высокометаморфизованных углей с высоким значением зольности, требуется существенно более высокая температура в топке, чем для углей с высоким выходом летучих и низкой зольностью. Это вызвано тем, что при распылении суспензионного топлива в топке присутствуют как капли, так и чисто угольные частицы, горение которых описывается закономерностями как при пылеугольном сжигании.

В работах ученых ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск (Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е.) представлены результаты исследований приготовления тонкодисперсных водоугольных суспензий с применением кавитационных аппаратов и их сжигания в циклонных предтопках. При этом для первоначального розжига использовалась плазменная технология, при которой было установлено, что при мощности циклонного предтопка 15МВт мощность используемого плазмотрона составляет 21кВт [39 - 42].

В национальном исследовательском Томском политехническом университете группой ученых под руководством Стрижака П. А. была разработана технология получения и сжигания органоводоугольного топлива (ОВУТ). В работах указанных ученых [43- 49] представлена новая композиция водоугольного топлива с дополнительным применением органических веществ (вещества нефтяного происхождения, древесные отходы и др.). Был получен значительный экспериментальный материал, показывающий эффективность использования органических добавок, как с экономической, так и с экологической точек зрения.

В Сибирском федеральном университете изучение свойств водоугольных суспензий проводили В.А. Кулагин, М.П. Баранова, А.Ю. Радзюк [50-55]. Исследовались свойства водоугольных суспензий из углей различных стадий метаморфизма, в том числе бурых углей Березовского и Бородинского месторождений. Исследовались процессы приготовления водоугольных суспензий с применением кавитационной обработки, а также процессы горения при сжигании приготовленных суспензий в экспериментальной топке и в обжиговой печи цементного завода. В экспериментальной топке горение осуществлялось после предварительного прогрева топки сначала совместно с мазутным факелом, затем топка работала исключительно на ВУТ. В цементной печи горение распыленного водоугольного топлива осуществлялось одновременно с горением пылеугольного факела из каменного угля.

Все математические модели зажигания частиц ВУТ, как правило, основаны на существенных упрощениях. Можно отметить, что математические модели, разработанные в последние годы [56- 59], являются наиболее полными по описанию физики процесса, происходящего в частице распыленного водоугольного топлива. Однако ни в одной из моделей не учитываются особенности распыления, приводящие к образованию двух качественно различных классов частиц: капель ВУТ и чисто угольных частиц.

В математических моделях, рассматриваемых в [56- 59] предполагалось, что процесс воспламенения летучих веществ протекает непосредственно на поверхности топлива.

Из работ Франк-Каменецкого [60] и Сполдинга [61] известно, что при воспламенении твердых топлив диффузия играет важную роль в процессе инициирования горения газов.

Так, в работе [62] приведены результаты численного моделирования процесса воспламенения и горения полидисперсного потока угольных частиц. Проанализировано влияние водяного пара в потоке окислителя на характеристики воспламенения угольной пыли. Установлено, что наличие пара в высокотемпературной среде приводит к уменьшению всего индукционного периода. Это связано с влиянием реакций газификации ( $C + H_2O = CO + H_2$ ) и образованием горючих газообразных продуктов термохимической реакции.

Результаты численного моделирования процесса воспламенения угольной частицы, движущейся в потоке высокотемпературного окислителя, представлены в работе [63]. Здесь показано, что горение начинается, как правило, в газовой фазе (инициируется горение летучих компонентов органической массы угля).

Установлено также, что воспламенение летучих веществ происходит, как правило, в аэродинамическом следе частицы. Это связано с “уносом” летучих веществ в область аэродинамического следа при движении капли (частицы) ВУТ.

По мнению авторов [64] оптимальным вариантом для устойчивого зажигания и горения распыленного ВУТ может быть устройство, состоящее из двух последовательно расположенных камер: в первой происходит прогрев и воспламенение частиц топлива, а во второй осуществляется окончательное догорание их. Предложенный вариант представляет интерес, однако в представленной работе исследуется и практически реализован способ сжигания водоугольного топлива в одну стадию с применением вихревой адиабатической топки.

### **1.3 Анализ технологий сжигания угольных шламов и конструкций котлов малой и средней мощности**

В настоящее время известно несколько технологий сжигания суспензионного угольного топлива в котлах различной мощности:

- сжигание в котлах малой и средней мощности с движущейся решеткой над слоем;
- сжигание в котлах малой и средней мощности в кипящем слое;
- факельное сжигание в котлах различной мощности;
- вихревое сжигание в котлах различной мощности.

Рассмотрим практическую реализацию различных технологий.

#### *Сжигание над слоем*

Первыми исследованиями и промышленными опытами по сжиганию ВУТ осуществлялись в нашей стране в существующих, как правило, угольных котлах.

В настоящее время в нашей стране в котлах малой и средней мощности, работающих на твердом топливе, используется, как правило, слоевой способ сжигания на колосниковой решетке (неподвижной или движущейся). Эффективность такого способа сжигания каменного угля особенно коксующихся марок очень низкая. При подаче распыленного водоугольного топлива в котел имеет место одновременное сжигание мелких частиц топлива

во взвешенном состоянии в топочном объеме котла над колосниковой решеткой и более крупных частиц, либо их конгломератов на колосниковой решетке. Таким образом, осуществляется факельно-слоевое сжигание ВУТ.

Описанная выше технология сжигания водоугольного топлива была реализована в котельной Редаковского района г. Новокузнецка при шахте им. Димитрова [13]. На сжигание ВУТ был переведен котел ДКВР 10-13. Подача ВУТ осуществлялась через две форсунки, расположенные на расстоянии 1,2м выше слоя угля на колосниковой решетке. Рабочие параметры котла при работе на ВУТ приведены в таблице 1.4.

Работа котла при одновременном сжигании угля и ВУТ осуществлялась практически без реконструкции котла. При этом замещение части угля водоугольным топливом достигало 80%.

Результаты опытно-промышленных работ по приготовлению водоугольного топлива и сжигания его в котле КЕ 10-14С показали, что снижение расхода угля более чем в 2 раза с одновременной подачей ВУТ в котел в количестве до 2 т/ч обеспечивает увеличение тепловой мощности котла

Таблица 1.4- Параметры работы котла ДКВР 10-13 при сжигании ВУТ над слоем угля.

Показатели	Режим работы	
	При сжигании ВУТ и угля	При сжигании угля
1	2	3
Теплопроизводительность, Гкал/ч	6 – 6,5	6 – 6,5
Давление питательной воды перед котлом, МПа	0,49 – 0,51	0,49 – 0,51
Температура питательной воды, °С	100 - 105	100 – 105
Давление пара, МПа	0,21 – 0,24	0,21 – 0,24

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3
Температура, °С		
пара	128 - 132	128 – 132
факела в слое	1100 - 1150	1240 – 1250
факела в середине топки	800 - 900	1100 – 1150
уходящих газов	125 - 130	120 – 125
Коэффициент избытка воздуха за котлом	1,8 – 2,0	1,8 – 2,0
Степень недожога топлива в котле, %	8 - 10	25 – 30
Потери тепла с уходящими газами, %	12,0 – 12,5	12,0 – 12,5
КПД котла, %	72 - 75	52 – 58
Концентрация в уходящих газах, мг/м <sup>3</sup>		
оксидов азота	250 -320	420 – 450
твердых частиц	40 - 50	78 – 85

в 1,84 раза с соответствующим повышением давления пара. При этом наблюдалась устойчивая работа котла при снижении подачи ВУТ до 50 % от максимальной (2 т/ч). Результаты замеров вредных выбросов показали, что при совместном сжигании угля и ВУТ происходило снижение удельных (на 1 Гкал/ч) выбросов СО в 2,14 раза и NO<sub>x</sub> в 1,34 раза.

### ***Сжигание ВУТ в кипящем слое***

На полигоне московского предприятия ФГУП «Гидротрубопровод» многократно проводились эксперименты по приготовлению ВУТ из различных углей и огневые стендовые испытания сжигания ВУТ. Эксперименты подтвердили возможность получения устойчивого и управляемого процесса горения с частичной газификацией топлива в кипящем слое первой ступени топки. С целью обеспечения управляемости процессом горения ВУТ при пониженной температуре в кипящем слое, максимально возможного снижения образования оксидов азота, но повышения удельной теплопроизводительности топки кипящего слоя был предложен унифицированный комбинированный

вариант, состоящий из топки низкотемпературного кипящего слоя и камерной топки. Авторы этого способа сжигания [65] для существующих котлов малой мощности предлагают выносить топку кипящего слоя (предтопок) отдельно от камерной топки котла. Процесс сжигания ВУТ при работе таких котлов реализуется следующим образом. В предтопке с кипящим слоем протекает низкотемпературный процесс предварительной подготовки и газификации топлива в условиях недостатка воздуха ( $\alpha < 1$ ). В камерной топке, в которой за счёт подачи дополнительного количества нагретого воздуха создаются условия для полного реагирования горючих веществ, происходит догорание продуктов газификации и мелкодисперсных остатков несгоревшего топлива при более высокой, чем в предтопке, температуре. Камерная топка является конструктивной частью котла, поэтому при наличии вышеописанного предтопка котел работает в штатном, в расчетном режиме. Как показали испытания, подобная схема вполне работоспособна, однако требует особого внимания персонала.

Есть серьезный фактор, требующий особого внимания при организации сжигания ВУТ в псевдооживленном (кипящем) слое. В описанных авторами работах по сжиганию ВУТ в кипящем слое использовались водоугольные суспензии из неспекающихся углей (длиннопламенных, тощих и антрацитов). Подача в топку кипящего слоя суспензии из спекающегося угля может вызвать размягчение органической массы угля (ОМУ), что повлечет за собой образование конгломератов и, как следствие, спёков как угля, так и золы в области псевдооживления. Режим работы предтопка будет искажен и нарушен. Для предотвращения этого явления необходимы исследования с целью разработки мер, препятствующих образованию спёков в области псевдооживления. Без проведения таких исследований сжигание ВУС в кипящем слое нельзя признать универсальным, надежным способом для сжигания водоугольного топлива из ТДОУ.



### ***Факельное сжигание ВУТ***

Как показано авторами [13], для исследования и отработки процессов приготовления, хранения, гидротранспортирования и прямого сжигания ВУТ в опытно-промышленных условиях была разработана и смонтирована опытно-промышленная установка на обезвоживающей фабрике (ОФ) шахты «Инская».

Опытно-промышленное сжигание ВУТ было организовано в муниципальной котельной ОАО «Шахта «Инская», г. Белово. Котельная оборудована четырьмя котельными установками со слоевыми котлами КВТС-20, один из которых реконструирован на совместное сжигание угля и ВУТ. Данный котел оснащен колосниковой решёткой прямого хода с загрузкой слоя угля прямо из бункера.

Реконструкция типового котла заключалась в разводке боковых экранов (от 4 до 8 труб) с образованием отверстий диаметром от 256 до 512 мм в свету для установки горелочных устройств. Также была произведена замена поворотного экрана в топочной камере.

Поверхности экранов в топке были утеплены шамотной торкрет-массой для обеспечения зажигающего действия. Обмазка защищает от переохлаждения экранными трубами горящее распыленное топливо и повышает стабильность воспламенения и горения факела. Данная мера общепринята при использовании низкорекреационных и низкокачественных топлив.

Подача ВУТ осуществлялась через четыре горелочных устройства, расположенных диагонально на противоположных сторонах котла КВТС-20. К горелочным устройствам подается горячий воздух по системе воздухопроводов от воздухоподогревателя котла КВТС-20. В горелочных устройствах установлены завихрители.

Перевод угольного котла на сжигание водоугольного топлива осуществлялся следующим образом. Котел КВТС-20 растапливался и выводился на номинальный режим работы по обычному регламенту с использованием угля. В горелочные устройства подавался горячий дутьевой воздух. После прогрева и достижения устойчивой работы котла производилась подача ВУТ через 4 горелочных устройства. Теплопроизводительность котла

поддерживалась на постоянном уровне путем соответствующего снижения подачи угля на слое и уменьшения скорости движения решетки до минимальной. Таким образом, осуществлялся перевод котла КВТС-20 на сжигание водоугольного топлива при соотношении: ВУТ – 70 %, уголь – 30 %.

В дальнейшем подача угля прекращалась и останавливалась решетка, и котел работал только на водоугольном топливе. Уголь на решетке выгорал и оставался в виде шлака, тем самым уменьшая подсосы холодного воздуха через решетку и защищая ее от перегрева.

Регулирование теплопроизводительности котла производилось путем изменения количества подаваемого ВУТ.

Подача дутьевого воздуха была перераспределена таким образом, что большая его часть подавалась в горелочные устройства.

Учитывая, что испытания проводились в период ограничения теплоснабжения потребителей («летний режим»), теплопроизводительность котла была снижена до 10 Гкал/ч.

При полном переводе котла на ВУТ отмечено снижение  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$  в уходящих газах (рисунки 1.7–1.8).

Параметры работы котла КВТС-20 в период проведения испытаний представлены в таблице 1.5.

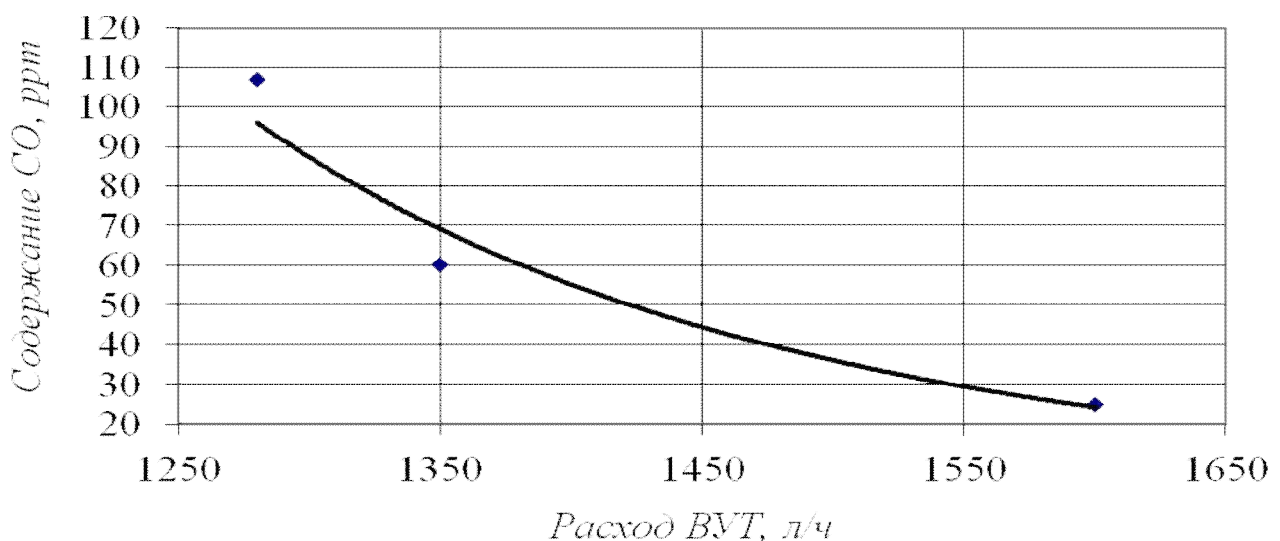


Рисунок 1.7 — Зависимость содержания  $\text{CO}$  в уходящих газах от расхода ВУТ

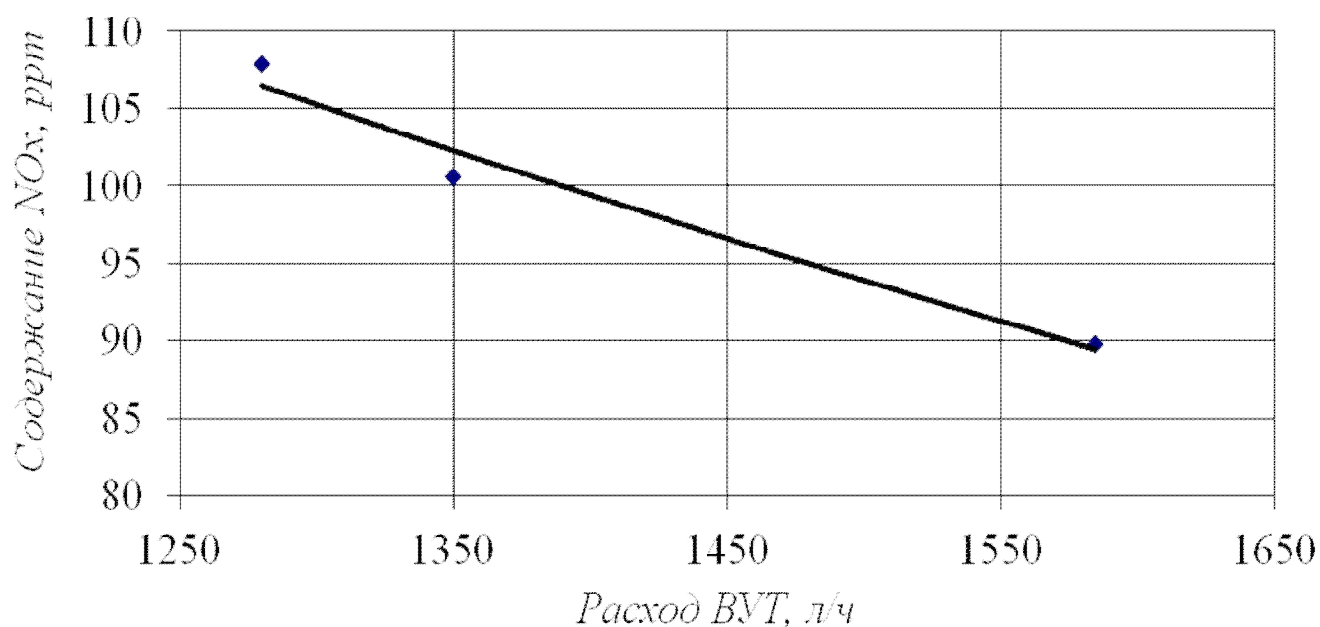


Рисунок 1.8—Зависимость содержания NO<sub>x</sub> в уходящих газах от расхода ВУТ

Таблица 1.5 —Параметры работы котла КВТС-20

Наименование параметров	Числовое значение при работе котла	
	на угле	при сжигании ВУТ
Расход топлива, т/ч	2,1	2,4
Расчетная теплопроизводительность, Гкал/ч	8,0	8,6
Давление ВУТ, МПа	–	0,4–0,5
Давление сжатого воздуха, МПа	–	0,35–0,45
Удельное значение выбросов, мг/ккал:		
СО	1,2	1,19
NO <sub>x</sub>	0,85	0,70
Количество работающих форсунок, шт.	–	4

### ***Вихревое сжигание ВУТ***

Вихревой способ сжигания топлива, разработанный при участии специалистов НИЦ «ПО «Бийскэнергомаш» (г. Барнаул) находит все более широкое применение для сжигания низкокачественных топлив [66,67]. В производственной котельной спецгормолзавода в г. Мыски (Кемеровская область) вихревое сжигание ВУТ было реализовано в котле ДКВР 6,5-13. Для создания низкотемпературного вихревого сжигания ВУТ в этом котле топка и горелочное устройство были реконструированы по чертежам, выполненным Е.М. Пузырёвым. В топку вмонтировали перегородку с газовыпускным окном. На передней стенке были установлены два горелочных устройства. Одно для сжигания мазута, который необходим для первичного разогрева топки. Другое – для подачи в топку водоугольного топлива.

Топливо для работы котла привозили с установки на головных сооружениях углепровода Белово – Новосибирск. Расстояние перевозки составило около 200км.

В качестве аккумулирующей емкости для приема и хранения ВУТ использовали железнодорожную цистерну ёмкостью  $51\text{м}^3$ . Для предотвращения замерзания ВУТ в зимний период внутри цистерны в нижней части были смонтированы три паропровода диаметром 150мм каждый. Подача ВУТ к горелочному устройству осуществлялась перистальтическим насосом НП-25 регулируемым приводом. Для сглаживания пульсаций давления ВУТ в трубопроводе было смонтировано демпфирующее устройство.

Усредненная характеристика ВУТ представлена в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Характеристика ВУТ, применявшегося на котле ДКВР 6,5- 13 при вихревом способе сжигания.

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Массовая доля твердой фазы	%	55,6
Зольность угля в ВУТ	%	18
Срединный диаметр частиц угля в ВУТ	мкм	19,3
Крупность частиц угля в ВУТ	мкм	0 – 350
Эффективная вязкость при скорости сдвига $11,71\text{с}^{-1}$	мПа·с	1000
Низшая теплота сгорания	ккал/кг	3079

Вывод котла на режим сжигания ВУТ осуществлялся следующим образом. Котел растапливался и выводился на номинальный режим работы по обычному регламенту, на мазуте, с использованием мазутной горелки. После прогрева и достижения устойчивой работы котла на мазуте в работу вводились форсунки ВУТ в режиме 25% номинального расхода топлива. Производительность котла поддерживалась на номинальном уровне путем снижения расхода мазута в топку. Выдержав 10 – 15 минут расход ВУТ повышали, а расход мазута, соответственно, понижали, сохраняя производительность котла. За три – четыре таких приема производительность подачи ВУТ доводили до 100%, а подачу мазута, соответственно, прекращали. Сравнительные характеристики работы котла на мазуте и на ВУТ приведены в таблице 1.7.

С.В. Алексеенко с сотрудниками разработана для сжигания ВУТ вихревая топка с центральным телом, расположенным вблизи оси вихря [68].

Таблица 1.7 - Сравнительные характеристики работы котла ДКВР 6-13 на мазуте и ВУТ.

Вид топлива	мазут	ВУТ
Давление пара, МПа	0,3 – 0,5	0,3 – 0,5
Подача, м <sup>3</sup> /ч	0,25 – 0,3	0,7 – 0,8
Давление, МПа	0,5	0,35 – 0,6
Температура в топке, °С	1250 – 1300	970 – 1040

Главной отличительной особенностью этой топки является кольцевая форма камеры сгорания.

На рисунках 1.9 и 1.10 показаны продольное и поперечное сечения предлагаемого топочного устройства. Устройство содержит футерованную камеру сгорания и экранированную кипяtilьными трубами камеру охлаждения. Камера сгорания имеет форму, близкую к цилиндру с горизонтальной осью вращения и плоскими торцевыми стенками, вблизи осей симметрии которых установлены газовыпускные окна. Камера сгорания и камера охлаждения имеют общую фронтальную стенку, на которой смонтированы форсунки, осуществляющие подачу ВУТ и других видов топлива.

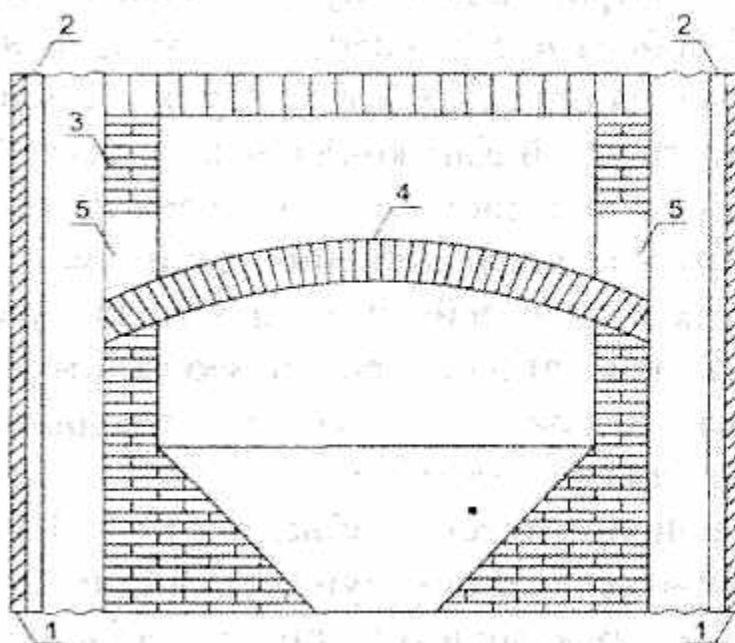


Рисунок 1.9 – Продольный разрез камеры сгорания

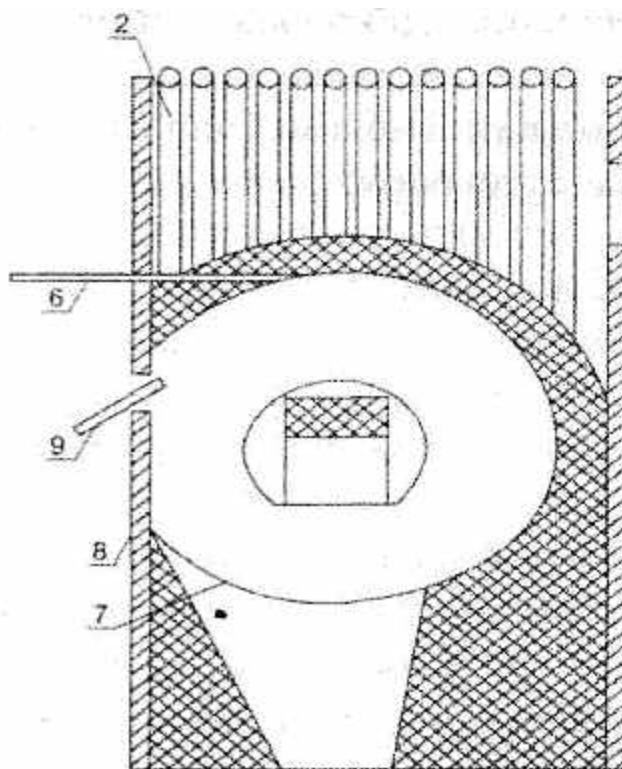


Рисунок 1.10 – Поперечный разрез камеры сгорания

Внутри камеры сгорания установлены дутьевые сопла с касательной подачей воздуха и центральная огнеупорная вставка. Главное назначение вставки поддержание однородного температурного поля в камере сгорания.

В силу наличия центрального тела, вихревого режима течения газа и ухода газа из камеры сгорания через окна вблизи оси камеры частицы угля находятся в равномерно прогретой зоне горения достаточно большое время и успевают выгореть полностью.

Подача ВУТ в камеру сгорания осуществлялась через форсунки, разработанные авторами [69].

Каждая из описанных выше технологий сжигания ВУТ имеет свои характерные особенности. Для возможности сравнения эффективности этих технологий, их сравнительные характеристики представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Характеристика технологий сжигания ВУТ

Характеристика процесса	Разновидности технологии сжигания				
	сжигание над слоем	сжигание в кипящем слое	факельное сжигание	сжигание в котлах ЦКС	вихревое сжигание
1	2	3	4	5	6
1. Допускаемые диапазоны влажности и зольности суспензионного топлива	Широкие диапазоны по влажности и зольности	Широкие диапазоны по влажности и зольности	Узкие диапазоны по влажности и зольности. Требуется малая влажность и низкая зольность исходного топлива	Широкие диапазоны по влажности и зольности	Широкие диапазоны по влажности и зольности
2. Крупность частиц угля в суспензионном топливе	0-1,0 мм	0-3,0 мм	0-0,35 мм	0-3,0 мм	0-1,0 мм
3. Растопка котла	По типовой схеме	Длительная (от 40 до 120 мин.).	Длительная (от 40 до 120 мин.).	Длительная (от 40 до 120 мин.).	Кратковременная (не более 40)



1	2	3	4	5	6
		<p>Требуется значительный расход жидкого или газообразного растопочного топлива для прогрева значительной массы (от 1 до 5 тонн) инертного слоя.</p> <p>Требуется растопочная камера и опытный, квалифицированный персонал</p>	<p>Требуется значительный расход жидкого или газообразного растопочного топлива для прогрева большой камеры сжигания</p>	<p>Требуется значительный расход жидкого или газообразного растопочного топлива для прогрева значительной массы (более 5 тонн) инертного слоя.</p> <p>Требуется растопочная камера и опытный, квалифицированный персонал</p>	<p>мин). Возможно использование рядового угля</p>

1	2	3	4	5	6
4. Характеристика дутья	Типовая, напор от 1000 до 3000 Па	Необходим высокий напор (более 10000 Па). Большие затраты электроэнергии на дутье (собственные нужды)	Типовая, со средним напором	Необходим высокий напор (более 10000 Па). Большие затраты электроэнергии на дутье (собственные нужды)	Типовая, со средним напором 3000 Па
5. Нагрузка экранов по теплосъему	Неравномерная	Высокое теплонапряжение в районе кипящего слоя	Неравномерная	Высокое теплонапряжение в районе кипящего слоя	Равномерное
6. Износ труб экранов	Износ незначительный	Высокий износ труб в районе кипящего слоя	Износ незначительный	Высокий износ труб в районе кипящего слоя	Износа нет
7. Подготовка топки к пуску	Не требуется	Необходимо заполнение топки инертным	Не требуется	Необходимо заполнение топки инертным	Не требуется

		материалом с частицами заданного размера		материалом с частицами заданного размера	
8. Диапазон регулирования	Типовой от 50 до 120 %	Узкий (от 70 до 120%) вследствие возможности шлакования слоя при снижении дутья	Узкий (от 70 до 120%)	Узкий (от 70 до 120%) вследствие возможности шлакования слоя при снижении дутья	Широкий (от 40 до 120%) при совместной подаче угля и ВУТ
9. Стабильность горения	Высокая при совместном сжигании угля и ВУТ	Высокая	Невысокая при повышенных значениях влажности и зольности топлива	Высокая	Высокая. При повышенных значениях влажности и зольности ВУТ осуществляется совместное сжигание угля и ВУТ

1	2	3	4	5	6
10. Контроль топочного процесса	Типовой. Осуществляется управление питателем загрузки угля, подачей ВУТ, подачей дугтя и удалением шлака; температурой в топке	Сложный. Требуется поддерживать: - постоянную температуру в топке; - постоянство крупности частиц в слое; - постоянную подачу топлива; - стабильное кипение слоя; - постоянную высоту кипящего слоя		Сложный. Требуется поддерживать: - постоянную температуру в топке; - постоянство крупности частиц в слое; - постоянную подачу топлива; - стабильное кипение слоя; - постоянную высоту кипящего слоя	Типовой. Осуществляется управление питателем загрузки угля, подачей ВУТ, подачей дугтя и удалением шлака; температурой в топке
11. Химический и механический	Высокий	Низкий	Высокий недожог ВУТ	Низкий	Низкий

1	2	3	4	5	6
недожог топлива			при повышенных значениях влажности и зольности топлива		
12. Экологические показатели	Невысокие, возможно наличие задымления	Высокие	Невысокие при повышенных значениях влажности и зольности топлива	Высокие	Высокие

Анализируя данные таблицы 1.8 необходимо отметить следующие преимущества вихревой технологии сжигания суспензионного угольного топлива.

Вихревая аэродинамика в топочном объеме обеспечивает:

- возможность использования существенно забалластированных влагой и золой ВУТ;
- возможность использования крупнофракционных топлив;
- увеличение конвективной составляющей теплообмена горячих газов и экранных труб;
- удержание горячих капель и частиц-капель суспензионного ВУТ и равномерное заполнение последними топочного объема;
- сглаживание неравномерностей тепловыделения и подавление влияния излучающего ядра факела;
- равномерность температурного поля в топочном объеме;
- пониженное и равномерное тепловосприятие экранов, увеличивающее надежность их работы;
- отсутствие шлакования тонких экранных труб;
- подавление эмиссии вредных оксидов и возгонки золы.

Технология вихревого сжигания проста в использовании, как при первоначальном разогреве топки, так и в процессе работы, легка в управлении и надежна в эксплуатации.

Таким образом, в дальнейшем в качестве основного варианта рассматривается технология вихревого сжигания суспензионного угольного топлива.

#### 1.4. Задачи исследования

Для достижения сформулированной цели диссертационного исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- выполнить анализ процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в вихревой адиабатической камере сгорания на основе термодинамического и химического подходов.
- выполнить численное моделирование процесса сжигания распыленного водоугольного топлива в адиабатической вихревой топке.
- определить взаимосвязь теплопроизводительности вихревой топки с её размерами и диаметром газовыпускного окна при сжигании ВУТ различного качества.
- разработать конструкции теплогенераторов малой и средней мощности:
  - с вертикальной осью вихревой топки;
  - с горизонтальной осью вихревой топки.
- определить технико-экономическую эффективность применения теплогенераторов малой и средней мощности, работающих на ВУТ различного качества, в разных отраслях промышленности.

## ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ГОРЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ В ВИХРЕВЫХ АДИАБАТИЧЕСКИХ ТОПКАХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Ранее в работах [70-72] было установлено, что существенное значение для организации стабильного горения ВУТ имеет зольность и содержание летучих веществ в частицах твердой фазы ВУТ. В научно-технической литературе этому вопросу посвящено незначительное количество работ, особенно теоретического плана. Поэтому целью данной работы явилось определение влияния основных характеристик водоугольного топлива, приготовленного на основе угольных шламов, на стабильность процессов воспламенения и горения угольных частиц и капель ВУТ с привлечением методов термодинамического и химического анализа.

Рассмотрим физико-химическую модель горения ВУТ с привлечением термодинамического анализа, который позволяет оценить в комплексе влияние всех химических реакций, протекающих в зоне горения ВУТ. На рисунке 2.1 представлена схема расположения различных зон при горении капли ВУТ и угольной частицы. Схема разработана автором для представления модели процессов, протекающих на различном расстоянии от поверхности, а также для прояснения различия между чисто угольными частицами и каплями ВУТ, которые образуются при распылении водоугольной суспензии в форсунке.

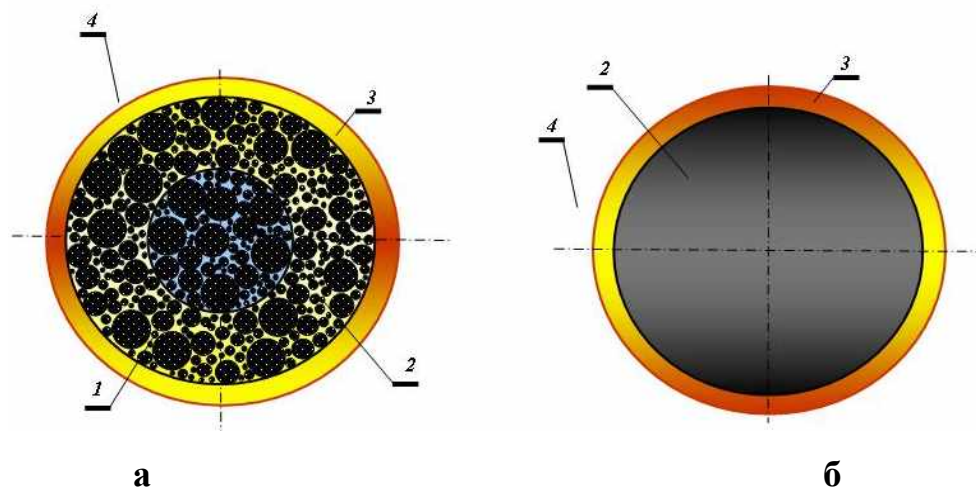


Рисунок 2.1 - Расположение зон в модели горения диспергированных капель ВУТ (а) и угольных частиц (б).



Попавшая в высокотемпературное пространство частица суспензии через малое время приходит в состояние, которое на рисунке 2.1а обозначено следующим образом. Сердцевина, зона 1, представляет собой исходное топливо. Это суспензия, то есть смесь, совокупность воды и мелких частичек угля. Вода в этой части капли жидкая, если даже нагрета до температуры кипения. Граница между зоной 1 и зоной 2 представляет собой поверхность, на которой происходит испарение воды.

Зона 2 – это расположенная поверх суспензии область высохшего топлива, то есть это частички сухого угля, между которыми находится водяной пар при температуре, превышающей температуру кипения (насыщения), то есть сухой пар. Вскоре после появления капли распыленного топлива в горячей зоне появляется разделение капли на указанные зоны. В первые мгновения толщина зоны 2 крайне мала, но с течением времени радиус зоны 1 уменьшается, а толщина зоны 2 увеличивается.

Рассматривая крупные частицы (рисунок 2.1б), которые были выделены из суспензии при распылении в форсунке, но не являются каплями, с которых потоком воздуха сорваны не только мелкие угольные частицы, но и водяная пленка, мы получим вариант, когда вся частица представляет собой зону 2. Данные частицы имеют размер 0,09-0,35мм. В этом случае имеется нулевая концентрация водяного пара во всем объеме частицы (зона 2), а картина взаимодействия (химического и физического) поверхности частицы с зоной 3 и зоной 4 аналогична схеме на рисунке 2.1а.

Таким образом, в случаях горения, как подсохших капель ВУС (рисунок 2.1а), так и угольных частиц (рисунок 2.1б) мы имеем совершенно идентичные условия, а именно: горение угольных частиц (пористых в случае высохших капель и сплошных в случае угольных частиц), окруженных зоной 3, за дальнейшей границей которой расположена зона 4.

Зона 3 – это зона, расположенная в непосредственной близости от поверхности капли в пространстве топки. Зона 4 – это область, удаленная от поверхности капли, то есть это пространство топки.

Рассмотрим состав газовой смеси в топочном пространстве.

Очевидно, что при повышении зольности углей количество воздуха, необходимого для сгорания одного килограмма угля, уменьшается, поскольку с увеличением зольности уменьшается содержание органической массы (таблица 2.1).

В таблице 2.1 приведены рассчитанные количества воздуха и образующихся газов при сжигании  $1\text{ м}^3$  суспензии, приготовленной из углей с различной зольностью при содержании твердой фазы в суспензии 52% и коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=1$ . При этом количество водяного пара постоянно и составляет  $647\text{ нм}^3$

Таблица 2.1 - Количество необходимого воздуха и образующихся газов при сжигании  $1\text{ м}^3$  ВУТ из сырья различного качества.

Зольность, %	Необходимое количество воздуха, $\text{нм}^3$	Общее количество газов, $\text{нм}^3$
0	7800	8447
10	7020	7667
20	6240	6887
30	5460	6107
40	4680	5327
50	3900	4547
60	3120	3767
70	2574	3221

Расчетные значения параметров, приведенные в таблице 2.1, соответствуют гипотетическим условиям, когда поступающие в топочное пространство материалы уже прогрелись, топливо диспергировано, вода превратилась в пар, все компоненты перемешаны между собой, но не смешаны с продуктами горения. Наряду с необходимым количеством воздуха рассчитаны концентрации

кислорода и водяного пара, которые соответствуют тем же условиям, что и данные таблицы 2.1 (рисунок 2.2).

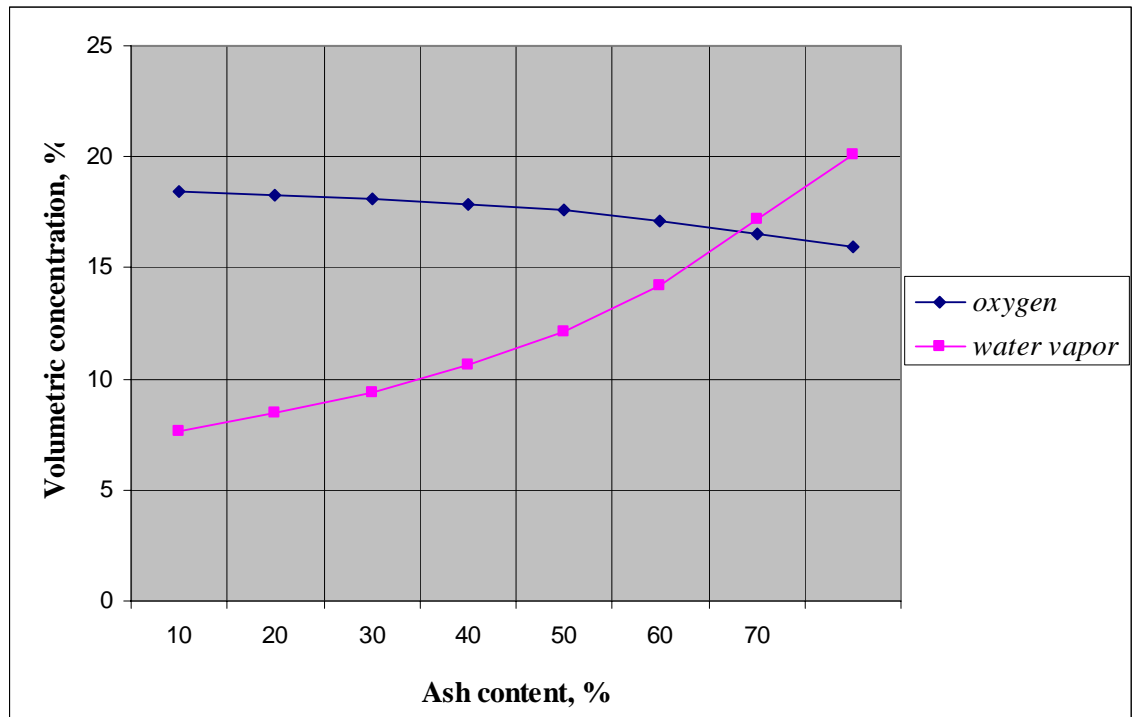


Рисунок 2.2 - Зависимость содержания кислорода и водяного пара в газовой фазе топки от зольности топлива.

Как видно из рисунка 2.2, концентрация водяного пара в атмосфере топочного пространства будет превышать значение половины концентрации кислорода если суспензия приготовлена из угля с зольностью 20% и выше. При сжигании водоугольных суспензий с более высокими значениями зольности концентрация водяного пара оказывается ещё больше (при  $A^d=50\%$  и выше), а концентрации кислорода и водяного пара разнятся незначительно.

После смешивания газового потока в топочном пространстве в газовой смеси существенно уменьшается концентрация кислорода (в пространстве топки он расходуется на окисление углерода, летучих компонентов угля и промежуточных продуктов горения) и несущественно изменяется концентрация водяного пара. При этом концентрация водяного пара в пространстве топки достаточно высока (не менее 10% при сжигании суспензий из углей с зольностью

30% и выше), а для обеспечения устойчивого горения на практике потребуется повышать концентрацию кислорода, то есть повышать коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ .

Если непосредственно после появления капли в высокотемпературном топочном пространстве концентрацию любого газа вблизи поверхности капли можно считать равной его концентрации в зоне 4 (на удалении от капли), то уже через малое время образуется зона 3, обладающая особыми свойствами. Рассмотрим состав газовой фазы в зоне 3. В зоне 3 протекают различные реакции: догорают  $H_2$  и  $CO$ , сгорают летучие, выделяющиеся из частичек угля, в этой зоне находятся самые разные вещества, как диффундирующие к поверхности капли из зоны 4, так и движущиеся от горячей поверхности в зону 4 продукты горения. Зона 3 находится в непосредственной близости от поверхности капли и передача тепла к поверхности в пределах этой зоны осуществляется излучением и кондукцией. Из зоны 4 тепло к поверхностям капли и угольной частицы передается излучением, причем лучистый поток энергии оказывается достаточно мощным, поскольку все пространство топки заполнено горящими каплями, угольными частицами и горячими частицами золы (неизбежного компонента продуктов сгорания угля). Не нарушая общности и логики рассуждений, можно принять, что температура на поверхности горячей капли (или горячей частицы угля) быстро становится равной температуре в пространстве топки.

Как только температура поверхности частицы (или подсохшей капли) достигнет значения  $250-350^\circ C$ , из угля начинают выделяться летучие компоненты. Их количество существенно зависит от степени метаморфизма угля. Выделение летучих веществ из угля влияет на состав газовой фазы в зоне 3 и на интенсивность процесса горения и, вследствие этого, на температурные пределы устойчивости топочного процесса при сжигании суспензионного топлива из углей различных марок.

На этой стадии существенное значение приобретают процессы массообмена, обусловленные законами диффузии.

Рассмотрим вероятность протекания различных реакций. Коэффициенты диффузии газообразных веществ, согласно [67] зависят от температуры следующим образом:

$$D(T) = D_0 \cdot \frac{\alpha T^{\beta}}{273^{\beta}}, \quad (2.1)$$

где  $D_0$  – коэффициент диффузии при стандартной температуре,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $T$  – температура, К.

То есть от температуры коэффициенты диффузии различных газов зависят одинаково. Из этого следует, что

$$\frac{D_i(T)}{D_j(T)} = \frac{\alpha D_{0i}}{\alpha D_{0j}}, \quad (2.2)$$

где  $D_i, D_{0i}, D_j, D_{0j}$  – коэффициенты диффузии отдельных газов,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

Согласно [67] газы, которые выступают окислителями для углерода, имеют следующие значения коэффициентов диффузии  $D_0$  (таблица 2.2).

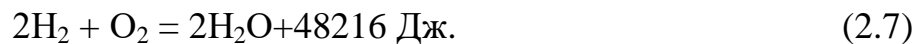
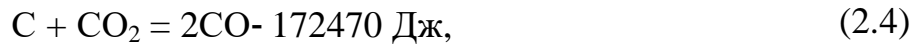
Таблица 2.2 - Коэффициенты диффузии компонентов газовой смеси.

газ	$\text{CO}_2$	$\text{CO}$	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$
$D_0, \text{м}^2/\text{с}$	0,097	0,175	0,18	0,277

Как видно из таблицы 2.2, величина коэффициента диффузии у водяного пара ( $\text{H}_2\text{O}$ ) в 1,54 раза выше, чем у кислорода ( $\text{O}_2$ ) и ( $\text{CO}$ ) и в 2,85 раза выше, чем у углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). Как следует из соотношения (2.2) эти соотношения сохраняются при других значениях температуры. Таким образом, интенсивность диффузии водяного пара существенно превышает интенсивность диффузии кислорода и особенно углекислого газа. Это в совокупности с достаточно высокой концентрацией водяного пара в топочном пространстве обеспечивает на высохшей поверхности капли или горячей угольной частицы взаимодействие углерода практически только с водяным паром. Кислород «срабатывается на

ближних подступах» к поверхности капли в реакциях окисления летучих, CO и H<sub>2</sub> в зоне 3. Реакция взаимодействия углерода с CO<sub>2</sub> крайне маловероятна из-за малого значения коэффициента диффузии CO<sub>2</sub> и вследствие этого крайне низкой вероятности присутствия CO<sub>2</sub> вблизи поверхностей капли и угольных частиц.

Таким образом, на границе зоны 2 и зоны 3, а также в зоне 3 протекают следующие реакции:



Из числа приведенных реакций первые три являются гетерогенными и протекают на горячей поверхности частицы, а реакции (2.6) и (2.7) являются гомогенными и протекают в зоне 3 на некотором расстоянии (возможно, ничтожно малом, но всё-таки расстоянии) от поверхности. Оценим скорости протекания реакций (2.3 - 2.7).

При оценке возможности протекания той или иной реакции на поверхности горячей капли следует учитывать не только гетерогенные реакции собственно окисления углерода, но и гомогенные реакции горения продуктов газификации, которые протекают в зоне 3 вблизи поверхности капли. При этом следует отметить, что константа равновесия реакции пропорциональна отношению концентрации продуктов реакции к концентрации исходных веществ в состоянии равновесия. Поэтому о полноте протекания химической реакции необходимо судить с учетом величины константы равновесия.

Как известно, мерой химического сродства, определяющего протекание реакции, принято считать величину изобарно-изотермического потенциала [68]:

$$Z = H - TS, \quad (2.8)$$

который связан с константой равновесия реакции соотношением:

$$Z = - R \Delta T \ln K_p \quad (2.9)$$

где:  $Z$  – изобарно-изотермический потенциал;

$H$  – энтальпия совокупности компонентов реакции;

$S$  – энтропия совокупности компонентов реакции;

$K_p$  – константа равновесия реакции.

Рассчитанные величины констант равновесия реакций (2.3- 2.7) приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Константы равновесия реакций, протекающих при горении топлива.

Температура, °К	700	900	1100	1300
для реакций				
2.3	$1,2 \cdot 10^{24}$	$4,0 \cdot 10^{20}$	$1,3 \cdot 10^{18}$	$3,3 \cdot 10^{16}$
2.4	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$	8,0
2.5	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-2}$	1,05	20,7
2.6	$1,99 \cdot 10^{11}$	$3,13 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^3$	19,07
2.7	$8,51 \cdot 10^{30}$	$5,48 \cdot 10^{22}$	$1,19 \cdot 10^{18}$	$7,73 \cdot 10^{13}$

При анализе данных таблиц 2.2 и 2.3, видно, что:

- коэффициент диффузии  $\text{CO}_2$  имеет самое низкое значение из числа рассматриваемых газообразных веществ;

- реакция (2.4) при любой температуре приводит к состоянию равновесия при существенно более низких концентрациях продуктов, чем любая другая реакция из числа рассматриваемых;

- равновесные концентрации продуктов окисления  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , представляющие собой  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (эти реакции протекают в зоне 3), достаточно велики, что косвенно свидетельствует о высоких значениях скоростей этих реакций, а также о том, что кислород практически весь «сработается» в зоне 3, не

достигнув поверхности капли. К поверхности капли будет передаваться только тепловая энергия, выделившаяся при реакциях горения  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и летучих компонентов угля;

- константа равновесия реакции углерода с кислородом (реакция 2.6) многократно превышает значения констант реакции 2.7 и реакции 2.8, но гомогенные реакции (2.9 и 2.10) в зоне 3 характеризуются такими значениями констант равновесия, что вероятность диффузии кислорода к поверхности частицы (или капли) попросту сводится к нулю;

- реакция (2.4) характеризуется самыми низкими значениями константы равновесия из трех сравниваемых гетерогенных реакций. Углекислый газ имеет не только самый низкий коэффициент диффузии из трех рассматриваемых окислителей, но и самую низкую скорость взаимодействия с углеродом во всем диапазоне рассматриваемых значений температуры.

На основании выполненного анализа можно утверждать, что на поверхности угольных частиц (и высохших капель) наиболее вероятной является реакция (2.8), то есть окисление углерода водяным паром. Продукты этой реакции проникают по зоне 3 к границе зоны 3 и далее в зону 4 (данная граница не может быть выделена четко) и сгорают при встрече с диффундирующим навстречу кислородом. Образующиеся  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  характеризуются коэффициентами диффузии, различающимися почти в три раза. Поэтому водяной пар диффундирует к поверхности капли и угольных частиц существенно быстрее, чем углекислый газ. Рассматривая не до конца высохшую каплю ВУТ, мы должны признать, что истекающий из глубоких слоев высыхающей капли водяной пар способствует поддержанию более высокой концентрации его на границе зоны 2 и зоны 3. Анализируя протекающие в зоне 3 процессы, легко предположить, что состав газовой фазы в зоне 4 также характеризуется высокими значениями концентрации водяного пара. Это также является аргументом в пользу того, что на поверхности частиц (и высохших капель) преимущественно протекают реакции окисления углерода водяным паром. Но эта реакция эндотермична!!! Подвод энергии к зоне реакции осуществляется из зоны 3, расположенной в



крайней близости от поверхности. При горении частиц (или высохших капель) угля различных марок (различной степени метаморфизма) из них выделяются летучие, количество которых зависит от стадии метаморфизма. Очевидно, что при горении частиц более молодого угля количество летучих имеет более высокое значение, при диффузии этих веществ от зоны 2 сквозь зону 3 к зоне 4 они будут сгорать и при этом будет не только срабатывать кислород, но и выделяться тепло! Таким образом, при горении более молодых углей в зоне горения проявляется «внутренний резерв» тепла. Кроме добавочного источника тепла выделяющиеся летучие обеспечивают повышение пористости поверхности частицы. Это также способствует более активному окислению (выгоранию) частиц. При горении частиц более зрелых углей более весомая доля энергии, подводимая к поверхности, получается при сгорании CO и H<sub>2</sub>, которые образуются на поверхности частиц при окислении водяным паром. Таким образом, влияние марки угля (точнее, параметра «выход летучих») на устойчивость топочного процесса и на температуру воспламенения следует считать очевидным!

Сделанные выводы подтверждаются результатами численного моделирования процессов горения водоугольных суспензий в адиабатической вихревой топке [75,76]. Численные расчеты выполнены с использованием мощного программного продукта трехмерного моделирования ANSYS FLUENT, позволяющего моделировать процесс горения с учетом турбулентности, теплообмена и химических реакций. Возможности программы позволили получить расчеты полей скоростей в топочной камере, траекторий частиц, спрогнозировать температуру в различных сечениях топки.

На рисунках 2.3 и 2.4 приведены сравнения изменения температуры и содержания летучих веществ в угольной частице и капле ВУТ в зависимости от длины пути частицы и капли соответственно.

Анализ представленных на рисунке 2.3 данных показывает, что в отличие от плавного увеличения температуры угольной частицы (particle 1) при ее движении температура капли ВУТ (particle 2) после повышения до температуры испарения

жидкой фазы остается постоянной на протяжении всего процесса испарения. Затем начинаются процессы горения твердой фазы капли ВУТ с выделением теплоты, и наблюдается резкое повышение температуры.

Из рисунка 2.4 видно, что содержание летучих веществ для угольной частицы (particle 1) в начале процесса остается неизменным и уменьшается только при нагреве частицы до температуры выделения летучих веществ. Для капель ВУТ (particle 2) наблюдается увеличение содержания летучих веществ за счет испарения воды. В процессе испарения температура твердой фазы капли ВУТ повышается, и содержание летучих веществ достигает аналогичного значения для твердой угольной частицы. Стабильность процесса сохраняется в течение значительно меньшего времени за счет повышения температуры твердой фазы капли ВУТ в процессе испарения воды.

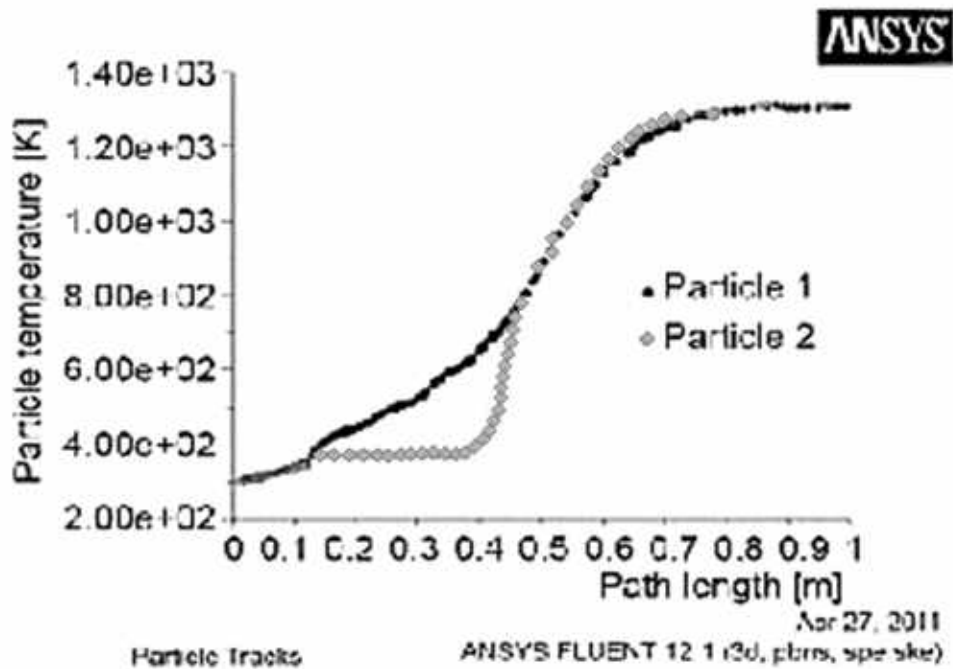


Рисунок 2.3 - Сравнение изменения температуры угольной частицы (particle 1) и капли ВУТ (particle 2) в зависимости от длины пути частицы и капли.

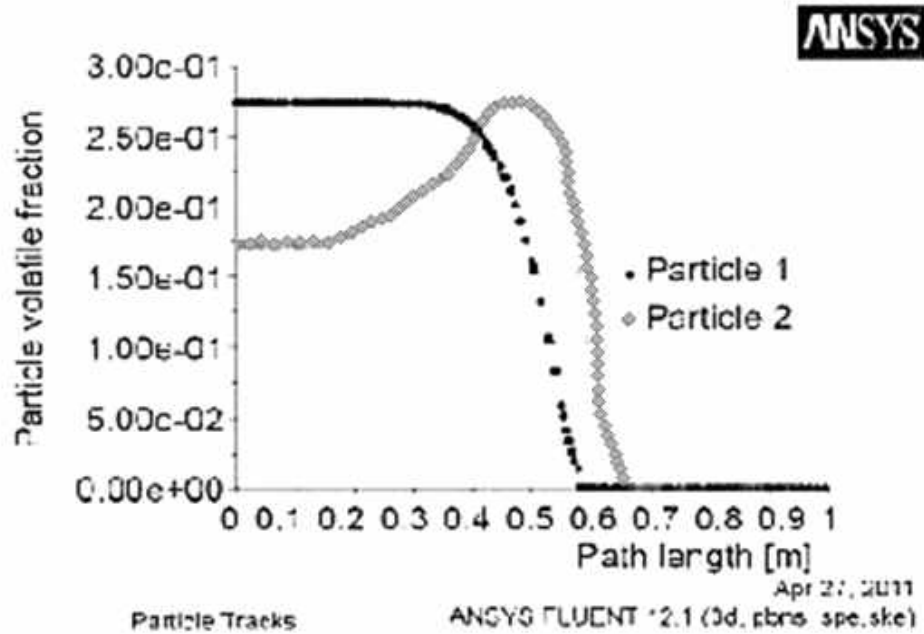


Рисунок 2.4 - Сравнение изменения содержания летучих веществ в угольной частице (particle 1) и капле ВУТ (particle 2) в зависимости от длины пути частицы и капли.

На рисунке 2.5 показаны траектории частиц топлива. Анализ траекторий частиц показывает, что полученные траектории имеют форму спиралей. При этом выявлено, что время нахождения горящих частиц и капель ВУТ в вихревой топке пропорционально их диаметру, что позволяет обеспечить их эффективное выгорание.

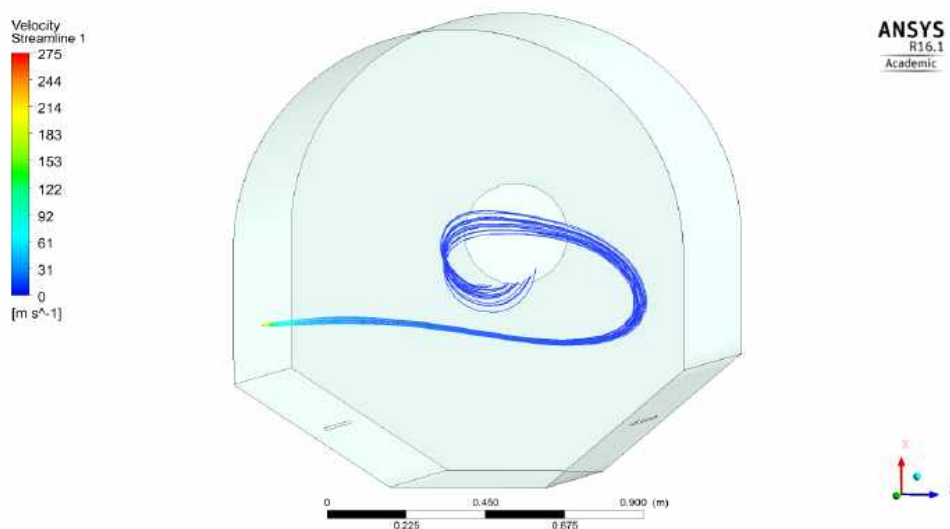


Рисунок 2.5 - Траектории частиц топлива.

Таким образом, организация сжигания ВУТ в вихревой топке позволяет обеспечить повышенное время удержания горящих частиц топлива в топочном пространстве, при этом в топочном объеме образуются локальные вихревые потоки. Оптимальный уровень температур составляет 800- 1250°С (рисунок 2. 6).

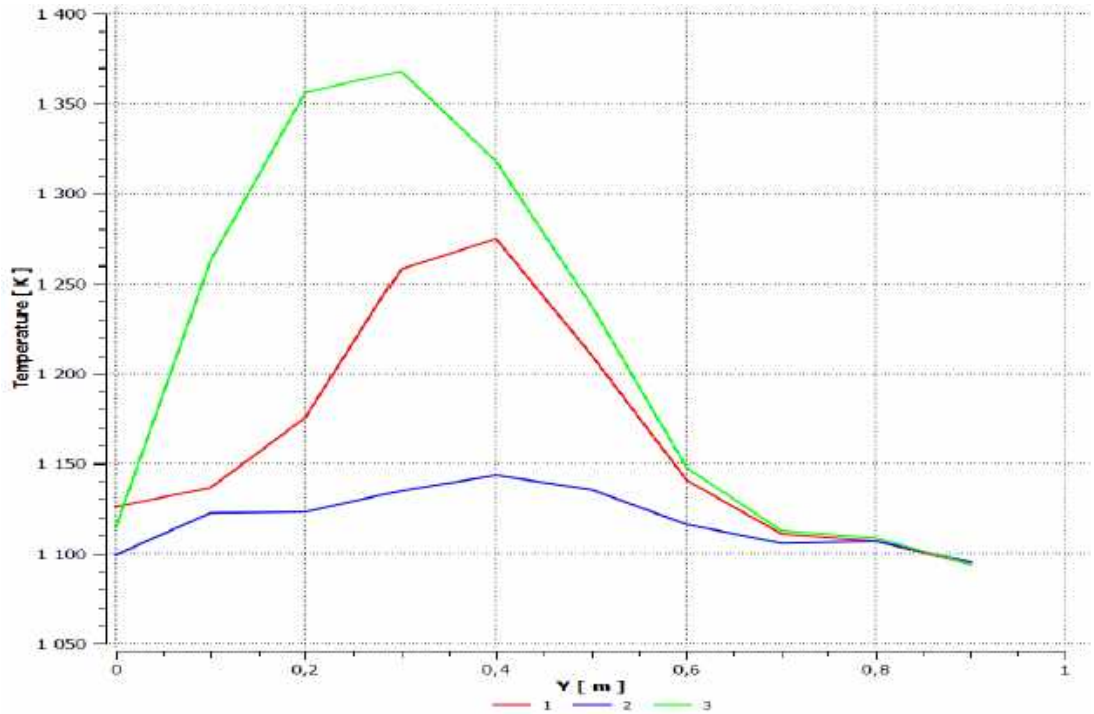


Рисунок 2.6 - Распределение температуры по глубине топки на различной высоте.

На рисунках 2.7- 2.10 представлены результаты расчетов концентрации кислорода  $O_2$  и диоксида углерода  $CO_2$  в направлении к задней стенке топки.

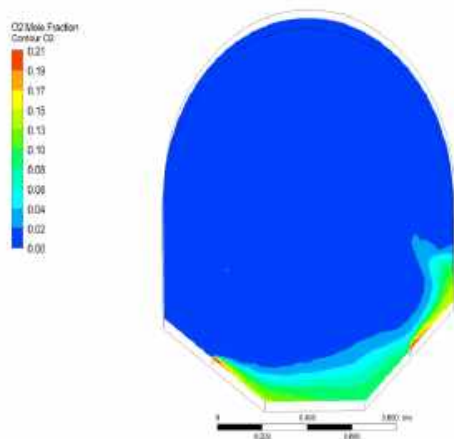


Рисунок 2.7- Концентрация  $O_2$  в сечении горелки

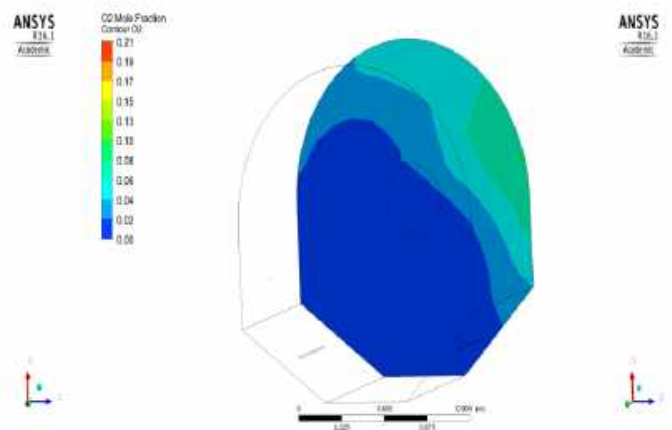


Рисунок 2.8 - Концентрация  $O_2$  у задней стенки топки

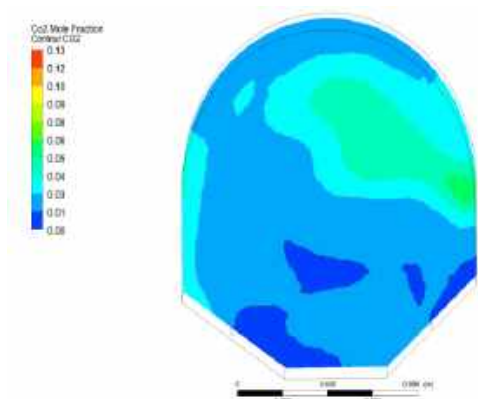


Рисунок 2. 9 - Концентрация  $\text{CO}_2$  в сечении горелки

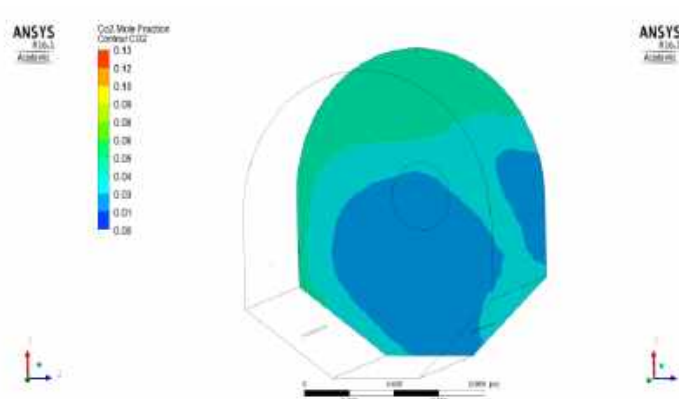


Рисунок 2.10 - Концентрация  $\text{CO}_2$  у задней стенки топки

Анализ результатов (рисунков 2.7- 2.10) показывает, что к выходу топки наблюдается снижение концентрации  $\text{O}_2$  и увеличение концентрации  $\text{CO}_2$ . Содержание летучих веществ также уменьшается.

## 2.1 Выводы

В результате выполненного анализа установлено, что при повышении зольности твердой фазы топлива в пространстве топки повышается концентрация водяного пара и понижается концентрация кислорода. Вследствие этого для обеспечения стабильности топочного процесса необходимо повышать коэффициент избытка воздуха.

На основании сравнения коэффициентов диффузии газов и рассчитанных значений констант равновесия реакции в зоне горения, сделан вывод о ведущей роли реакции окисления углерода водяным паром в вихревой адиабатической топке.

Анализ энергетических характеристик различных реакций показал, что параметр «выход летучих», отражающий степень мераморфизма угля, серьезно влияет как на температуру воспламенения, так и на температуру устойчивого протекания топочного процесса в камере сжигания.

Выполненные численные расчеты показали, что процесс горения указанных неоднородных систем: капле и чисто угольных частиц в адиабатической топке в течение короткого времени становится идентичным. При этом установлены концентрации кислорода ( $O_2$ ), диоксида углерода ( $CO_2$ ) и летучих веществ в различных сечениях топки. Полученные данные свидетельствуют о работоспособности и высокой эффективности использования адиабатической вихревой топки для сжигания ВУТ в котлах малой и средней мощности.

## ГЛАВА 3 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ

### 3.1 Определение исходных данных для расчетов

В главе 2 показано, что при сжигании суспензий с различной зольностью твердой фазы состав атмосферы в топочном пространстве будет существенно различным. Так, при выдерживании коэффициента избытка воздуха близким к  $\alpha=1$  количество воздуха, необходимого для сжигания органической массы угля меняется от  $2570 \text{ нм}^3$  при зольности  $A^d=70\%$  до  $7020 \text{ нм}^3$  при  $A^d=10\%$  .

При этих же значениях концентрация кислорода изменяется от 16 до 18%, а концентрация водяного пара от 20 до 7,5%. Концентрация кислорода составляет 0,75 , 0,86 от концентрации его в атмосферном воздухе.

Повышенное содержание водяного пара (от 10 до 85 раз превышающее содержание воды в атмосферном воздухе) при температуре в топке около  $1000^\circ\text{C}$  неизбежно вызовет окисление углерода водяным паром наряду с окислением кислородом.

Это заключение вытекает из анализа состава газовой фазы в топочном пространстве независимо от рассуждений при рассмотрении модели горения.

При совместном рассмотрении состава газовой фазы топки и процессов в зоне 3 модели горения неизбежно возникает вывод о ведущей роли реакции окисления углерода водяным паром.

Эта реакция эндотермична и при недостатке тепловыделения в топке (при недостатке экзотермических реакций) средняя температура в топке начнет уменьшаться и горение прекратится.

Для создания более благоприятных условий при протекании экзотермических реакций и уменьшения влияния водяного пара нами предложено и реализовано увеличение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ .

Простой расчет показывает, что при  $a=2$  концентрация водяного пара в указанных на рисунке 2.2 условиях будет изменяться от 10% до 4 %, а концентрация кислорода от 18% до 19%.

Для практического применения мы рекомендовали (и применяли это в своих теплогенераторах) выбирать такое значение коэффициента избытка воздуха, чтобы концентрация водяного пара в пространстве топки находилась в пределах от 6 до 8%. Методически это реализуется путем оценки состава газовой фазы на основании измерения зольности твердой фазы и соотношения уголь : вода в ВУТ. После оценки состава газовой фазы вычисляется соотношение между расходами ВУТ и воздуха. Расход ВУТ вычисляется из соотношения требуемой мощности и теплотворной способности водоугольного топлива.

$$W = 100 \cdot Q_n \cdot \frac{G}{k}, \quad (3.1)$$

где  $W$  – мощность топки, МВт;

$Q_n$  – низшая теплота сгорания, МДж/кг;

$G$  – расход топлива, кг/с;

$k$  – КПД котла, %.

При известном расходе ВУТ и известных характеристиках ВУТ с привлечением данных рисунка 2.2 и таблицы 2.1 определяется состав газовой фазы, который корректируется для приведения концентрации водяного пара к значению от 6 до 8 %.

Вычисленный таким образом коэффициент избытка воздуха  $a$  принимается в качестве рабочего для разрабатываемого теплогенератора.

Определенные таким образом расходы топлива и воздуха являются исходными данными для расчета размеров топочного устройства.

### 3.2 Расчет размеров топочного пространства

Для расчета геометрических размеров топочного пространства сначала определяется количество газов, которые протекают через топку. Определяется



физический объём газов, то есть истинный их объём, соответствующий температуре сжигания, а не приведенный к нормальным условиям.

Поскольку для полного выгорания частиц ВУТ требуется не менее 3-5 секунд, объем топки следует принимать 3-5 кратному секундному объемному расходу газовой фазы.

Объем топочного пространства определяется как произведение площади сечения топки плоскостью, перпендикулярной оси вихря (сечение близкое к окружности) на расстояние между плоскими стенами (вдоль оси вихря).

Величина диаметра окружности, приближенной к внутренней поверхности топки ( $D_T$ ) и ширины топки (расстояния между плоскими стенами вдоль оси вихря) выбираются из следующих соображений.

Наши наблюдения за факелом распыленного топлива показывают, что угол раскрытия факела не превышает  $28^\circ$ . По данным различных авторов (исследователей) величина этого угла составляет от  $25$  до  $30^\circ$ . Для конструирования топок нами принят угол  $f = 30^\circ$ .

Поток импульса в струе остается постоянным в любом сечении струи.

Согласно [77] вид струи, истекающей в пространство, заполненное аналогичной средой, представлен на рисунке 3.1.

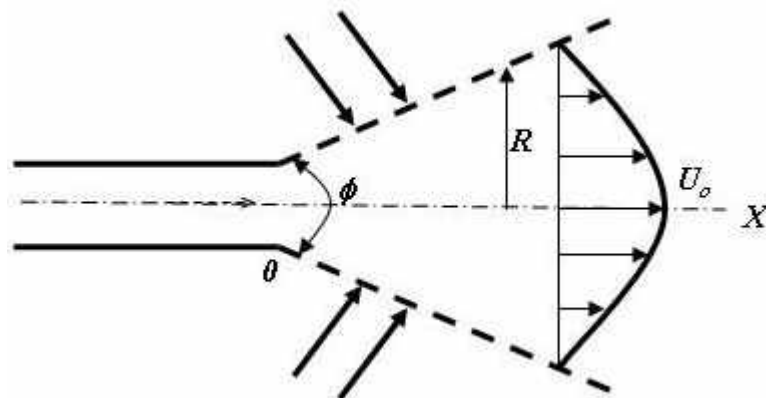


Рисунок 3.1 - Вид струи распыленного топлива

$$R(x) = x \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{f}{2}\right), \quad (3.2)$$

Авторами [77] обоснован расчет скорости струи жидкости, вытекающей в пространство, заполненное такой же жидкостью.

Полный импульс струи распыленного ВУТ определяется из выражения:

$$P = \rho \cdot V_0^2 \cdot \rho \cdot R^2,$$

где:  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$V_0$  – скорость истечения, м/с;

$R$  – радиус сопла, м.

Подставляя фактические максимальные значения для плотности  $\rho = 6,63 \text{ кг/м}^3$ , для скорости истечения  $V_0 = 200 \text{ м/с}$  получим, что при истечении через сопло диаметром 6мм ( $R = 3 \times 10^{-3} \text{ м}$ ) струя будет иметь импульс:

$$P = 6,63 \cdot 200^2 \cdot 3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2 = 7,49 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2,$$

Скорость на оси струи на расстоянии  $x$  определяется из выражения:

$$V_0 = \sqrt{\frac{P}{\rho} \cdot \frac{1}{x}} \text{ м/с} \quad (3.3)$$

В этом выражении значение плотности – это плотность на удалении  $x$  от точки истечения, то есть от сопла форсунки. Эту величину принимаем равной плотности газопылевого потока в пространстве топки. Расчет дает для этой величины значение  $1,35 \text{ кг/м}^3$ . Подставляя это значение в (3.3) получаем формулу для расчета скорости на оси факела распыла:

$$V_0 = \sqrt{\frac{7,49}{1,35} \cdot \frac{1}{x}} = \frac{2,35}{x} \text{ м/с}$$

Для того, чтобы струи вторичного воздуха, образующие вихревое течение в топке, увлекали распыленную струю ВУТ, необходимо выполнение следующего условия:

$$V_{\text{ВУТ}} \gg V_{\text{возд}}, \quad (3.4)$$

Подача вторичного воздуха осуществляется со скоростью, которая зависит от расхода воздуха, поскольку размеры сопел не регулируются.

Для расчета принимаем минимальную скорость, которая согласно экспериментальным наблюдениям может быть ниже 20м/с и достигать 10м/с.

Для выполнения требования (3.4) скорость воздуха примем 10м/с, а скорость струи ВУТ вблизи дальней стенки, где струя ВУТ пересекается со струей воздуха соответственно 1,5м/с, то есть в 6,7 раз меньше.

Поскольку скорость струи ВУТ понизится до значения 1,5м/с, в соответствии с этим определим расстояние  $x$ , которое соответствует длине факела распыла:

$$x = \frac{2,35}{V_0} = \frac{2,35}{1,5} = 1,567м$$

То есть, длина хорды, вдоль которой осуществляется распыление ВУТ, должна быть не менее 1,567м. Иначе некоторые частицы распыленного топлива окажутся не вовлеченными в вихревое течение, долетят до противоположной стенки и она (стенка) будет забрызгиваться топливом.

Рассмотрим еще один фактор, оказывающий влияние на геометрические размеры топочного пространства.

Ширина топки (расстояние между плоскими стенами вдоль оси вихря) выбирается из условия, чтобы факел распыла не забрызгивал плоские стены, которые для него являются боковыми.

Угол раскрытия факела распыла ВУТ принимаем  $30^\circ$ . Полуугол  $f/2 = 15^\circ$ . Соответственно ширина факела распыла определяется в зависимости от длины:

$$b = x \cdot \operatorname{tg} \frac{f}{2},$$

Поскольку  $\operatorname{tg} 15^\circ = 0,268$ , то

$$b = x \cdot 0,268,$$

Расстояние между плоскими стенами топки  $b$  должно быть не менее 0,268 длины хорды, вдоль которой осуществляется распыление топлива.

Размер газовыпускного окна камеры сгорания выбирается следующим образом.

Размер газовыпускного окна камеры сгорания (пережимного окна) является очень важным параметром. В отличие от циклонных предтопок, где поток движется по спирали и вытекает в основную топку, в вихревой камере сжигания поток представляет собой вращающийся тор, в периферийную область которого организуется ввод топлива и воздуха, а из приосевой области отводятся продукты сгорания. Частицы топлива удерживаются центробежной силой в пристеночной области топки (периферийной области тора) до тех пор пока хорошо выгорят. По мере выгорания частицы становятся легче и оттесняются вязкими силами к оси тора (ось топки).

Самые легкие частицы увлекаются газовым потоком за счет вязких сил к оси и удаляются через газыпускное окно. Размер этого окна (пережимного) оказывает влияние на траектории частиц. Чрезмерно увеличенный диаметр пережимного окна позволит частицам топлива преждевременно покидать пространство топки.

Чрезмерно заниженный размер, суженное пережимное (газовыпускное) окно приведет не только к избыточному удержанию частиц в пространстве топки, но и к необходимости применения неоправданно мощного дымососа, поскольку для пропуска заданного количества газов через более узкое отверстие необходимо обеспечивать большой перепад давления на окне.

На основании проведенных экспериментов было установлено, что оптимальным является такой размер пережимного окна, который обеспечивает эвакуацию необходимого количества газов при перепаде давления на окне близком к 1000 Па.

В зависимости от качества топлива и заданной мощности топки определяется ее объем и секундный объемный расход газов.

С использованием методов механики жидкости и газа рассчитывается процесс истечения через отверстие.

В процессе расчета определяется размер отверстия, необходимого для пропуска заданного количества газов при перепаде давления на отверстии  $DP=1000\text{Па}$ .

При разработке конструкции вихревых камер для сжигания ВУТ устанавливается, что ось струи распыленного топлива должна быть касательной к условной окружности топки. Диаметр условной окружности (рисунок 3.5.) определяется из соотношения:

$$D_{\text{онё}} = \frac{D_{\delta} - d_{\text{н}}}{2}, \quad (3.5)$$

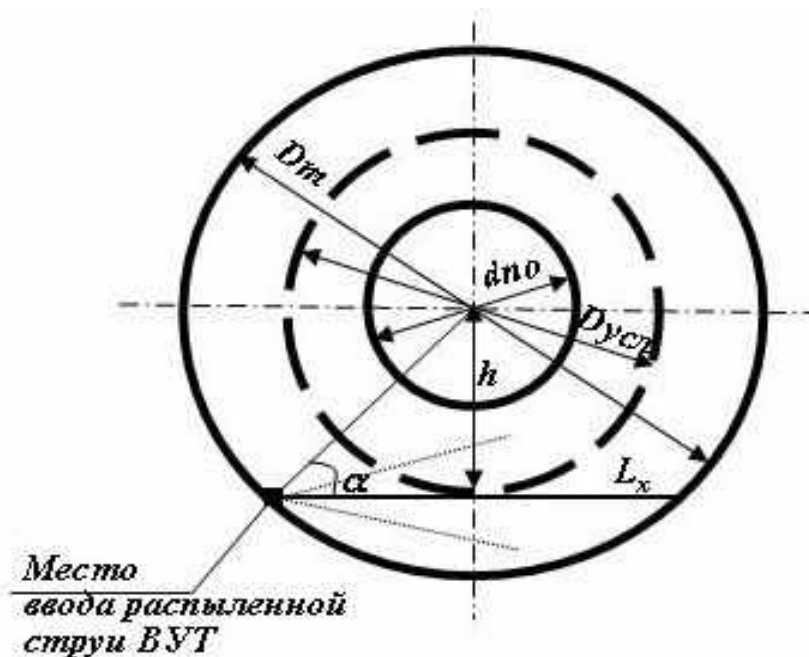


Рисунок 3.2 – Поперечное сечение внутренней поверхности вихревой топki

Длина хорды  $L_x$  в вихревой камере определяется из соотношения:

$$L_{\text{нод}} \approx L_x, \quad (3.6)$$

где  $L_x$  – длина хорды поперечного сечения вихревой топki на расстоянии  $h$  от оси топki;

$L_{\text{стр}}$  – длина факела распыла, расчет которого обоснован выше.

Ширина топki, как уже показано выше, выбирается из условия:

$$b^3 \approx 2L_x \cdot \text{tg} \frac{\alpha_{\delta}}{2}, \quad (3.7)$$

где  $\alpha_\phi$  – угол раскрытия распыленной струи ВУТ. При работе наших форсунок  $\alpha_\phi$  не превышает  $30^\circ$ . Объем топки определяется из выражения:

$$V_\delta = G_{\text{газ}} \cdot t_{\text{гор}}, \quad (3.8)$$

где,  $G_{\text{газ}}$  – объемный расход газов, образующихся при сжигании ВУТ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $t_{\text{гор}}$  – время горения распыленного ВУТ в топке, составляющее не менее 3–5 секунд.

Для удобства сравнения различных топочных устройств вычисляется удельная теплопроизводительность по формуле:

$$q_\delta = \frac{Q_\delta}{V_\delta}, \quad (3.9)$$

где,  $Q_m$  – теплопроизводительность топки, МВт.

Для разработанных адиабатических вихревых камер сгорания ВУТ данный показатель колеблется от 0,28 до 0,35 МВт/ $\text{м}^3$ . При этом большее значение принимается для ВУТ малой зольности, а меньшее для водоугольного топлива с зольностью более 25–27 %. Соотношение  $d_{\text{но}}/D_m$  было определено экспериментально и для топок малой и средней производительности составляет  $d_{\text{но}}/D_m = 0,25\text{--}0,3$ , что практически в два раза меньше аналогичного показателя для вихревых топочных устройств, в которых сжигается мазут или природный газ.

### 3.3. Выводы

Взаимосвязь теплопроизводительности вихревой топки с её размерами и диаметром газовыпускного окна при сжигании ВУТ определяется качеством топлива (зольностью твердой фазы и долей твердой фазы в составе суспензии).

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ И СОЗДАНИЕ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

### 4.1 Разработка конструкций и создание теплогенераторов малой и средней мощности с вихревыми топочными камерами с горизонтальной осью вихря

Вихревые адиабатические камеры сжигания различаются по расположению оси вихревого движения газов в топочном пространстве (горизонтально и вертикально). В зависимости от теплопроизводительности котла вихревая камера располагается либо рядом с котлом (котел является котлом-утилизатором), либо встраивается в топочное пространство котла.

Адиабатические вихревые топочные камеры с горизонтальной осью вращения топочных газов были разработаны для котлов с теплопроизводительностью от 0,1 до 0,7МВт (таблица 4.1)

Таблица 4.1 – Характеристика теплогенераторов с горизонтальной осью.

Наименование показателя	Название объекта				
	Стендовая установка СибГИУ	Технологический комплекс шахта «Заречная»	Теплогенератор для сушки зерна, пос. Краснообск	Технологический комплекс, г.Черепаново	Установка сжигания ВУТ, г.Забже, Польша
1	2	3	4	5	6
Теплопроизводительность, МВт	до 0,25	0,66	0,25	0,56	0,25
Расход топлива, кг/ч	до 120	190	75	160	65

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6
Низшая теплота сгорания ВУТ, МДж/кг	10,00 ÷14,00	12,00	11,75	12,70	13,40
Геометрические размеры топки, м					
диаметр	1,15	1,40	1,30	2,00	1,35
ширина	0,70	1,05	0,90	1,30	0,93
соотношение $d_{no}/D$	0,20	0,25	0,18	0,19	0,22
Теплонапряжение объема топки, МВт/м <sup>3</sup>	0,35	0,39	0,21	0,28	0,21

#### 4.1.1 Экспериментальная адиабатическая камера сжигания ВУТ с горизонтальной осью вихря

Первым образцом разработанной вихревой камеры сгорания с горизонтальной осью вращения стала адиабатическая топка, установленная на стендовой установке в блоке тяжелых лабораторий СибГИУ [78]. Характеристика топки представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристика адиабатической топки экспериментального стенда СибГИУ

Наименование показателя	Единица измерения	Числовое значение
1	2	3
Внутренний диаметр топки	мм	1100
Ширина топки	мм	700



1	2	3
Диаметр пережимного окна	мм	350
Теплопроизводительность	МВт (Гкал/ч)	до 0,35 (0,3)

Анализ различных конструкций в совокупности с задачами (исследовательский характер работы) обусловили ее небольшие размеры (мощность тепловая не превышает 0,3 Гкал/ч), при этом было признано, что самый оптимальный вариант конструкции представляет собой вихревую камеру сжигания с горизонтальной осью вихря (рисунок 4.1).

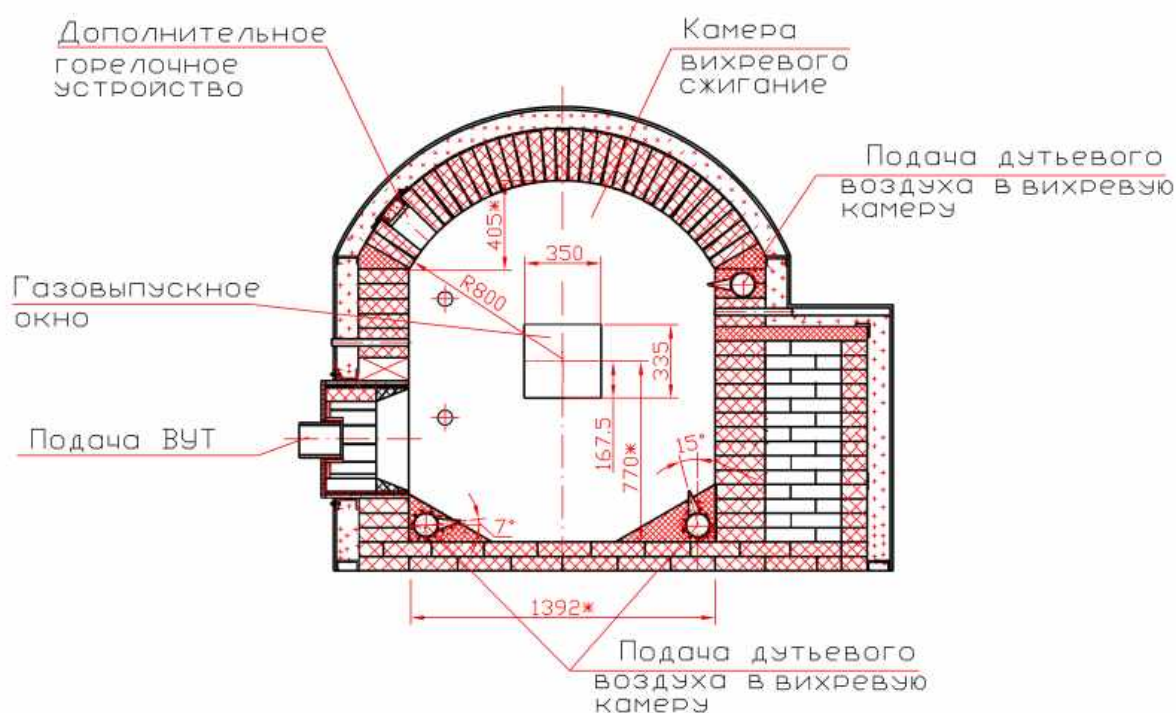


Рисунок 4.1 – Экспериментальный образец универсальной вихревой топочной камеры.



Для создания в пространстве камеры вихревого потока газов подвод воздуха, необходимого для горения, организован через три специальных сопла, два из которых заделаны в толще нижних откосов, формирующих внутреннее пространство камеры, а третье – в боковой стенке камеры.

Внутренне пространство камеры сгорания максимально приближено к форме и размерам вихря. При этом соотношение между длиной камеры (расстоянием между плоскими стенами) и её диаметром, а также размер газовыпускного (перезжимного) окна выбирались на основании подхода, изложенного в разделе 3.2. В разработанной вихревой топочной камере дымогазовый поток представляет собой вращающийся тор, в «теле» которого поступают топливо и воздух. В этом «теле» протекают реакции горения, а из внутренней полости, облегающей ось вихря, через газовыпускное окно удаляются продукты горения. При этом размер газовыпускного окна существенно меньше, чем высота и ширина камеры. Это существенное отличие ее от широко известных циклонных топков. В циклонных топках особенностью является «винтовое» движение дымогазового потока.

Еще одна особенность разработанной и смонтированной камеры – длинный дымогазоходный боров. Он предназначен для изучения процессов в дымогазовом потоке за пределами вихревой камеры. Эти исследования важны для разработки проектов реконструкции существующих котлов с целью перевода их на суспензионное топливо, поскольку для котлов не всех типов возможно провести реконструкцию с размещением камеры для суспензионного топлива в пределах топочного пространства котла. В ряде случаев реконструкцию возможно осуществить только при условии сооружения «выносной» камеры, при использовании которой необходим боров для транспортировки продуктов сгорания в котел.

Поскольку камера имеет исследовательское назначение, в ней устроены несколько «гляделок», люк-лаз для возможности проникнуть в топку для осмотра, а также закладные детали для размещения различных датчиков: для измерений

температуры, давления, скорости витания частиц, отбора проб газоанализатором и других.

Для подачи суспензионного топлива в камеру применяется горелочное устройство с форсунками типа ФПМ, которое разрабатывалось не в рамках данной работы, и стандартной растопочной горелкой «Wester line». Тип и конструкция горелочного устройства не являются особенностями камеры, поскольку это устройство предназначено для размещения форсунок и растопочной горелки.

Кроме того универсальная вихревая топочная камера снабжена дополнительным горелочным устройством для подачи других видов топлива, в том числе различных отходов.

Для обеспечения работы камеры используются также вентилятор наддува, дымосос и компрессор, которые не являются частями камеры, а обеспечивают работу камеры в заданном режиме.

Вентилятор предназначен для подачи высоконапорного потока воздуха в камеру через сопла. Высоконапорный поток воздуха необходим для создания вихревого течения газовой смеси в пространстве камеры.

Дымосос предназначен для эвакуации дымогазовой смеси из камеры и обеспечения градиента давления по дымогазовому тракту.

Компрессор предназначен для получения сжатого воздуха, который используется в качестве распыляющего агента для суспензионного топлива. Распыление суспензии является необходимым условием для горения суспензионного топлива в факеле или вихревом потоке газовой смеси.

Разработанная камера предназначена для периодической работы. Периодичность работы камеры определяется программой работ, которая предусматривает изучение процессов горения суспензионного угольного топлива и влияния различных технологических и других объективных факторов на горение.

### ***Описание работы вихревой топочной камеры***

Работа камеры осуществляется следующим образом (рисунок 4.2).

При холодном состоянии камеры в горелочное устройство устанавливается растопочная горелка, работающая на дизельном топливе. После включения дымососа и выведения его на минимальную производительность, включается растопочная горелка.

После достижения в камере достаточной температуры (эта величина определяется при лабораторном исследовании качества ВУТ) включается компрессор, в форсуночное гнездо горелочного устройства устанавливается форсунка, включается система подачи суспензионного топлива и оно начинает подаваться в топку. Пока температура в камере не достигнет соответствующих значений (эти величины назначаются в зависимости от свойств ВУТ) суспензионное топливо подается в минимальных количествах. По мере повышения температуры в камере количество подаваемого топлива увеличивается.

При этом постепенно (соответственно количеству топлива) повышается объем подаваемого дутьевого воздуха. При температуре в камере 850-1000°С (в зависимости от реакционной способности угля, из которого приготовлено топливо) растопочная горелка выключается и удаляется из горелочного устройства. Дальнейшая работа камеры осуществляется без подсветки растопочным топливом. Изменяются и измеряются технологические параметры, определяется влияние этих изменений на характер горения и на состояние продуктов горения (состав газов, запыленность, состав пыли, температура).

По завершении исследовательского эксперимента подача суспензионного угольного топлива в камеру прекращается, вспомогательные единицы оборудования (кроме дымососа) отключаются, камера остается остывать. После остывания камера осматривается, при необходимости проводятся измерения и отбираются пробы из отложений или из элементов кладки для анализов.

Универсальная вихревая топочная камера снабжена датчиками температуры и окнами-гладелками для наблюдения за горением и для получения возможности

осуществлять фотосъемку (и видеосъемку) протекающих внутри камеры процессов. Воздуховоды, подающие воздух для сжигания и для создания вихревого течения в пространстве топки, снабжены расходомером, а также регулируемыми устройствами (шиберами). Таким образом, при подаче воздуха для сжигания существует возможность измерять и регулировать его количество. Как и при проведении исследований по диспергированию, при распылении суспензионного топлива в топку измеряется количество распыляющего агента (сжатого воздуха). Это необходимо не только для обеспечения заданных параметров распыления (расход сжатого воздуха должен соответствовать расходу топлива), но и для учета общего количества воздуха, поступающего в топку.

Для сжигания топливо подавалось в топку с расходом 50–55 кг/ч. Через 1,0–1,5 час после розжига кладка топки прогревается на достаточную глубину и температурное поле в пространстве топки становится однородным. В этих условиях процесс горения топлива осуществляется устойчиво, все параметры легко управляемы. Как температура в пространстве топки, так и теплопроизводительность установки чувствительны к изменению расхода топлива, изменению баланса между топливом и воздухом. При этом любое воздействие (изменение значения управляющего параметра) вызывает соответствующее изменение в состоянии топки и в величине теплопроизводительности. Причем эти изменения (таблица 4.3) носят характер строгой зависимости. Определенное изменение управляющих параметров приводит к совершенно определенному состоянию процесса, которое является устойчивым. Данные таблицы 4.3 соответствуют сжиганию ВУТ из угля марки «Г» шахты «Заречная».

Как видно из таблицы 4.3 горение водоугольного топлива реализуется в достаточно широком диапазоне параметров. Особо следует отметить, что удается реализовать устойчивое горение водоугольного топлива, приготовленного из угольных шламов с высоким выходом летучих (40% и более) даже при очень низких значениях температуры в топке (700–800°C). Очевидно, эта возможность обеспечивается условием адиабатичности топки.

Таблица 4.3 - Зависимость температуры в топке (°С) от условий горения

Расход ВУТ, кг/ч		40 - 42	45 - 48	50 - 52	55 - 57
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	180	1070	960	880	700
	220	1290	1080	1070	910
	260	1230	1260	1290	1080
	300	1090	1160	1210	1250
	340	1000	1040	1090	1130

При подаче в топку топлива в количестве 55-57 кг/ч и при малых количествах подаваемого воздуха наблюдается горение с очень низкими значениями температуры, но при этом процесс также протекает устойчиво. Устойчивое горение водоугольных суспензий, полученных из угольных шламов, наблюдается при тех же значениях температуры, что и горение ВУТ из угля, но при повышенном расходе ВУТ.

Обозначения топлив в таблице 4.4 означают, соответственно, водоугольное топливо из угля шахты «Заречная» («топливо 1») и суспензионное топливо, приготовленное из фильтр-кека обогатительной фабрики шахты «Заречная» («топливо 2»).

В таблице 4.4 приведены характеристики топочного процесса при моделировании розжига после остановки топки.

Как видно из таблицы 4.4, верхние температурные пределы устойчивого зажигания для обоих топлив практически совпадают (800°С), но из-за ухудшения качества при высоких значениях расхода (170 л/ч) топливо №2 (без присутствия нефтемасляных компонентов) загорается с задержкой и в начальные периоды показывает недожог.

Таблица 4.4 – Характеристики топочного процесса при розжиге горячей топки

Температура, °С	500	600	700	800
Максимальный расход топлива №1, л/ч	70	115	150	Загорается при любых условиях
Максимальный расход топлива №2, л/ч	Не загорается без подсветки	Не загорается без подсветки	80	150 – легко 170 – с задержкой

При распылении в топку, остывшую до более низких значений температуры, зажигание топлив №1 и №2 приобретает очень серьезные различия.

Топливо №1 устойчиво зажигается при распылении в топку, остывшую даже до 500°С, ограничением является только производительность (расход ВУТ) при распылении. При распылении в пространстве с температурой около 500°С следует существенно снижать расход ВУТ. После зажигания температура в топке быстро нарастает и производительность подачи топлива можно увеличивать до номинальной.

В случае распыления топлива №2 зажечь его при остывании топки до 600°С и ниже без подсветки дизельной горелкой не удастся даже при снижении расхода ВУТ до 50 л/ч.

Таким образом, как следует из проведенных исследований, топливо, приготовленное из отходов сжечь труднее, чем ВУТ из угля, но при выполнении необходимых условий ВУТ из ТДОУ горит также устойчиво.

В таблицах 4.5–4.6 представлены соответственно технические характеристики углей и угольных шламов, из которых готовились опытные партии ВУТ, а также технические характеристики исследованных опытных партий ВУТ.



Исходная температура в топке для сжигания ВУТ составляет +5°C. Первоначальный разогрев камеры сжигания осуществляется дизельным топливом до температуры 734°C. Затем производится совместное сжигание ВУТ с дизельным топливом в течение 30 минут. Температура при этом удерживается около 1000°C.

Таблица 4.5 – Техническая характеристика использованных углей и угольных шламов

Наименование показателя	Единица измерения	Характеристика, числовое значение		
		Уголь	Угольный шлам	Угольный шлам
Тип исходного сырья				
Марка угля		Д, Г	СС	А
Влажность угля	%	10-15	20-28	8-16
Зольность угля	%	14-20	22-36	25-40
Выход летучих веществ	%	40-42	22	7-9

Таблица 4.6 – Технические характеристики исследованных опытных партий ВУТ

Наименование показателя	Единица измерения	Характеристика, числовое значение		
		Уголь	Угольный шлам	Угольный шлам
Тип исходного сырья				
Марка угля		Д, Г	СС	А
Массовая доля твердой фазы, С <sub>т</sub>	%	56÷60	58÷65	63÷68

Крупность частиц	мкм	0÷350	0÷500	0÷350
Эффективная вязкость при скорости сдвига $81 \text{ с}^{-1}$ и температуре $20^{\circ}\text{C}$	мПа·с	500÷850	500÷850	500÷850

На рисунке 4.4 показан график набора температуры в топке при сжигании ВУТ с различной низшей теплотой сгорания.

Как видно из рисунка 4.4, темп набора температуры в топке при использовании ВУТ с более высокой низшей теплотой сгорания ( $3823 \text{ ккал/кг}$ ) значительно выше, чем при сжигании топлива с более низкими значениями теплоты сгорания.

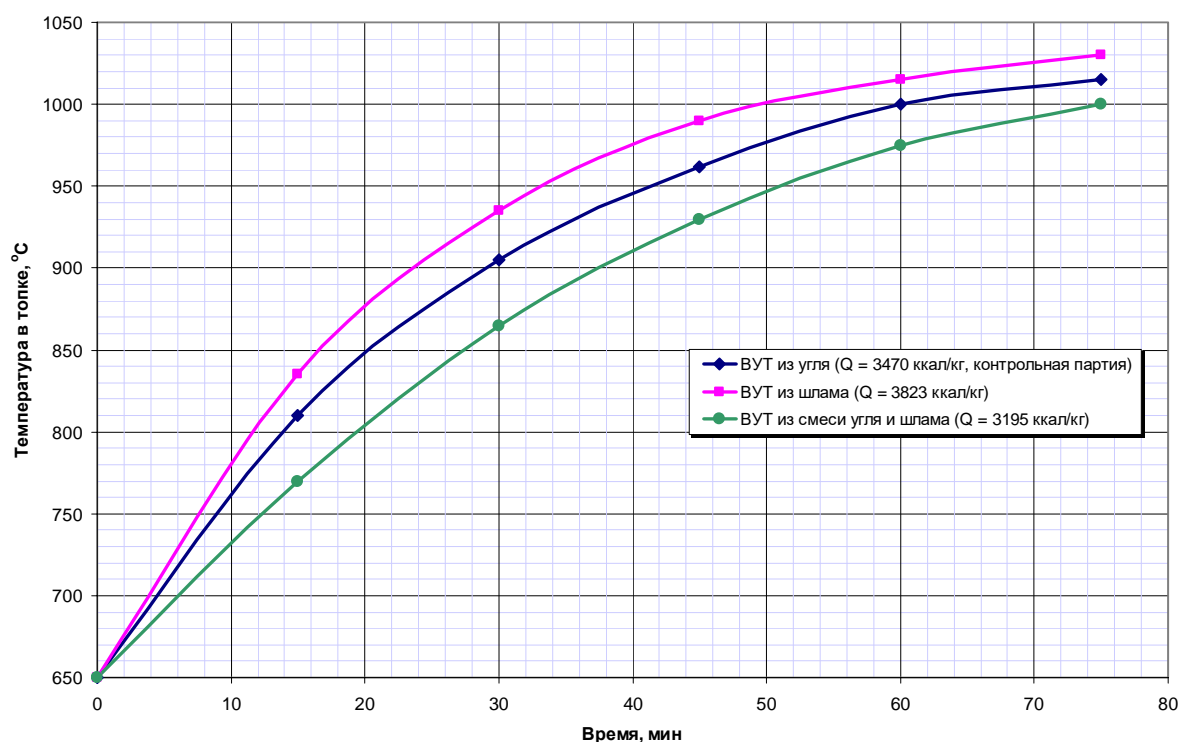


Рисунок 4.4 - График набора температуры в топке.

На рисунке 4.5 представлены результаты измерения параметров топочного процесса и содержания вредных веществ в дымовых газах.

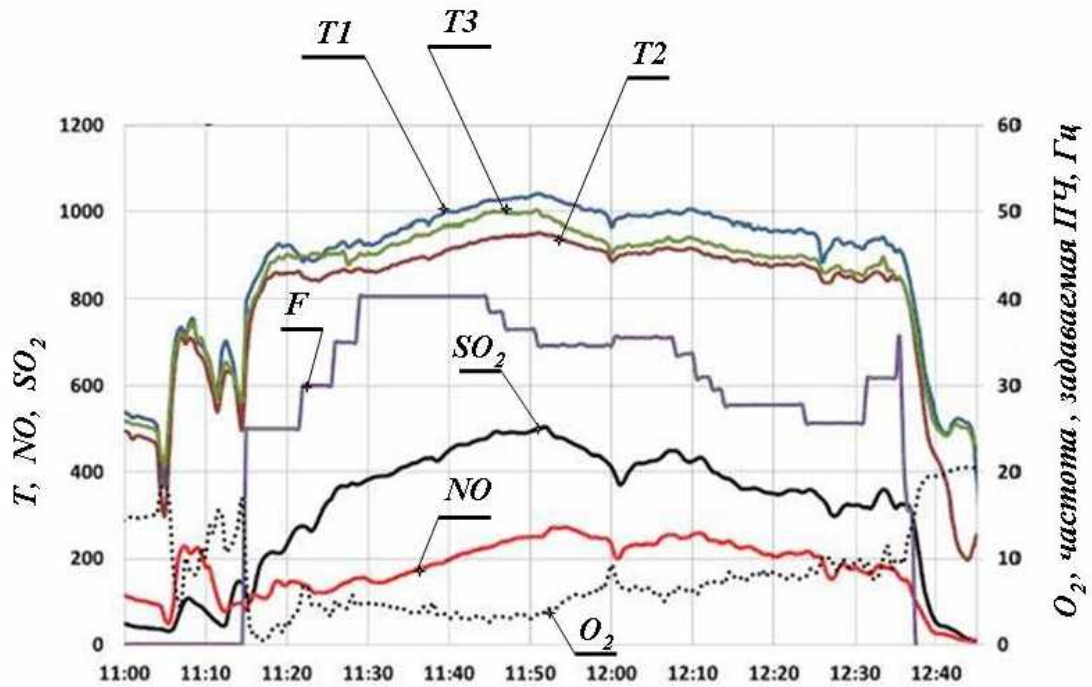


Рисунок 4.5 – Изменение параметров процесса горения при исследованиях.

Кривые на рисунке 4.5 обозначают:

T1 – температура в топке, °C ;

T2 – температура на входе в котел, °C ;

T3 – температура в борове, °C ;

F – частота, задаваемая ПЧ для насоса;

SO<sub>2</sub> – концентрация SO<sub>2</sub> в дымовых газах, мг/м<sup>3</sup>;

NO – концентрация NO в дымовых газах, мг/м<sup>3</sup>;

O<sub>2</sub> – концентрация O<sub>2</sub> в дымовых газах, %/

Проведенные сжигания показали, что ВУТ, приготовленные из углей и угольных шламов различных марок и зольности, надежно воспламеняются и эффективно сжигаются в вихревой топке. Механический недожог топлива (содержание горючих в уловленных золовых частицах) составил не более 3-5%. Аналогичный показатель для слоевых угольных топок составляет 20-60%.

В таблице 4.7 представлены результаты анализа газовых выбросов при сжигании водоугольного топлива.

Таблица 4.7 – Содержание вредных веществ в уходящих газах

Показатели контроля	НД на МВИ	Угольный шлам	Нормативное содержание
Монооксид азота NO (мг/м <sup>3</sup> )	Газоанализатор ДАГ 16	165	-
Оксиды азота NO <sub>x</sub> (мг/м <sup>3</sup> )	Газоанализатор ДАГ 16	173	750
Оксид углерода CO (мг/м <sup>3</sup> )	Газоанализатор ДАГ 16	112	375

Из таблицы 4.7 видно, что содержание вредных выбросов в 3,3-4,3 раза ниже предельно допустимых концентраций (для предприятий России).

Анализ полученных данных показывает, что реализованный вихревой способ сжигания ВУТ осуществляется при относительно низкой температуре, что обеспечивает приемлемый уровень интенсивности горения при отсутствии шлакования топки. В результате выполненных экспериментальных работ была установлена устойчивая работа топки на ВУТ, созданной в соответствии с рекомендациями, представленными в разделе 3.

#### 4.1.2 Разработка и создание теплогенератора для сушки зерна

В настоящее время большинство сушильных комплексов на предприятиях сельскохозяйственного комплекса работает на дорогостоящем жидком нефтяном топливе. Вследствие этого предприятия имеют серьезные экономические проблемы при переработке зерна.

С целью снижения стоимости топлива при сушке зерна и других сыпучих материалов был разработан экспериментальный образец модифицированного воздухонагревателя (теплогенератора), работающего на водоугольной суспензии

[79-81]. Модифицированный теплогенератор был создан на базе стандартного теплогенератора ТГ-2,5А. Назначение теплогенератора – сушка зерна и др. сыпучих материалов, отопление производственных помещений, и др.

На рисунке 4.6 представлена конструкция теплогенератора.

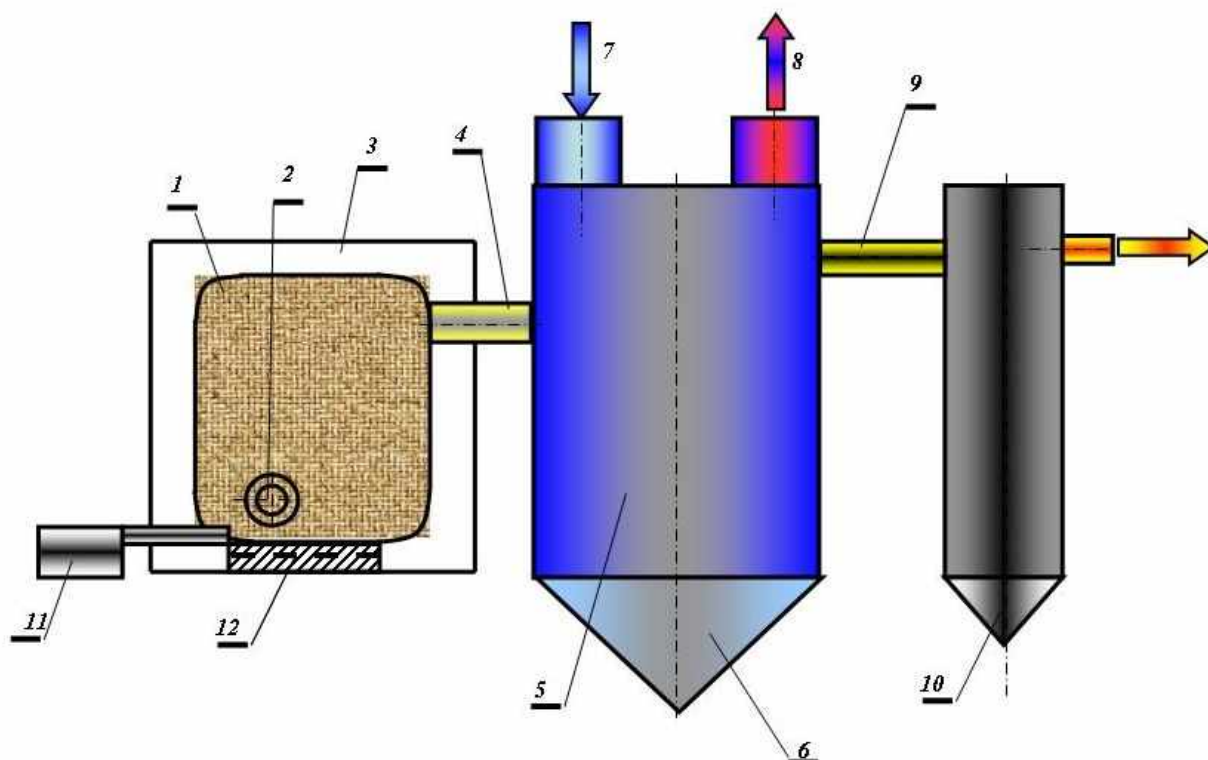


Рисунок 4.6 - Теплогенератор

Теплогенератор состоит из следующих основных частей: форкамеры 1, форсунки суспензионного угольного топлива 2, вихревой камеры сгорания 3 с пережимным окном 4, теплообменника 5 с камерой для сбора и удаления золы 6 и системы пылеулавливания 10, в нижней части вихревой камеры сгорания расположен поворотный колосник 12, а также (или) камера оборудована шурующей планкой 11 для удаления отложений шлака. При этом форкамера 1 расположена тангенциально к внутренней поверхности вихревой камеры сгорания 3, а форсунка суспензионного угольного топлива 2 установлена на оси форкамеры 1 так, что распыленная струя топлива направлена тангенциально к внутренней поверхности вихревой камеры сгорания 3. Выход продуктов сгорания в

теплообменник осуществляется через пережимное окно 4. В нижней части теплообменника 5 расположена камера для сбора и удаления золы 6. Газоход 9 соединяет теплообменник 5 с системой пылеулавливания 10. Для подачи нагреваемого рабочего агента в теплообменник 5 предназначен входной патрубок 7, а для отвода нагретого рабочего агента – выходной патрубок 8.

Теплогенератор работает следующим образом.

Сначала вихревая камера сгорания разогревается, например, при сжигании какого-либо топлива на колоснике.

После прогрева камеры сгорания до  $600, 850^{\circ}\text{C}$  через форсунку суспензионного топлива подается распыленная водоугольная суспензия. Разработанная конструкция форкамеры обеспечивает высокую надежность зажигания основного топлива. Воспламененная струя основного топлива поступает в вихревую камеру сгорания тангенциально внутренней поверхности последней. Благодаря этому она естественным образом, без разрушения, вовлекается в вихревое движение, которое дополнительно формируется тангенциальной подачей вторичного воздуха (на рисунке не показано). Температура в камере сгорания начинает быстро повышаться. При достижении рабочей температуры  $800-1050^{\circ}\text{C}$  (в зависимости от марки угля, из которого приготовлена суспензия) дальнейшая работа теплообменника обеспечивается за счет горения только лишь водоугольной суспензии.

Таким образом, конструкции форкамеры и вихревой камеры обеспечивают надежное воспламенение и устойчивое горение основного топлива. Вихревое движение горящих частиц в камере с пережимным окном обеспечивает пребывание частиц в камере на протяжении времени, необходимого для полного выгорания всех частиц. Камеру покидают с дымовыми газами только самые легкие, с полностью выгоревшим горючим частицы. Согласно полученным данным остаток горючих веществ в золовых частицах не превышает 3%, а насыпная плотность их не более  $350 \text{ кг/м}^3$ . Для сравнения: в шлаке и золе от сжигания угля в слоевых топках содержится от 15 до 55% углерода.

В теплообменнике наиболее крупные частицы золы оседают в камере, расположенной в нижней части теплообменника. Из этой камеры осевшая зола периодически удаляется.

Рабочий агент, проходящий через теплообменник, нагревается горячими газами. Соответственно, дымовые газы, проходящие через теплообменник, охлаждаются. При этом теплопередача происходит через стенки теплообменника без смешения дымовых газов и рабочего агента.

Отдавшие тепло газы с остатками тонких пылевых частиц поступают в систему пылеулавливания, после чего выбрасываются в атмосферу.

Техническая осуществимость и высокая эффективность работы теплообменника подтверждена при работе теплогенератора ТГ-2,5А с вихревой топкой, работающей на суспензионном угольном топливе. Указанный комплекс прошел успешные испытания в институте механизации и электрификации сельского хозяйства РАСХН (г. Новосибирск).

На экспериментальной базе института СибИМЭ был смонтирован разработанный испытательный комплекс, который включал в себя емкость с топливом, оборудование подачи топлива, топку, модифицированный теплогенератор, систему подачи воздуха для горения и удаления дымовых газов, систему подачи нагреваемого и удаления нагретого воздуха, компрессор для подачи сжатого воздуха, оборудование предварительного разогрева топки, приборы КИПиА.

На рисунке 4.7 представлены фото общего вида теплогенератора и вид работающей топки через амбразуру форсунки.



Рисунок 4.7 - Фото теплогенератора.

Водоугольное топливо готовилось по технологии и на оборудовании ЗАО НПП «Сибэкотехника» в г. Новокузнецке. Затем партия топлива в бочках доставлялось в Новосибирск. Дальность транспортирования составила 430 км. В процессе хранения и транспортирования водоугольное топливо сохраняло свои свойства.

Работа модифицированного теплогенератора осуществлялась следующим образом.

Первоначальный (предварительный) разогрев топки осуществлялся за счет горелки, работающей на дизельном топливе.

При достижении в топке требуемой температуры включалась форсунка водоугольного топлива. Одновременная работа дизельной горелки и водоугольной форсунки продолжалась 10 - 15 минут. Затем дизельная горелка отключалась. Дальнейшая работа теплогенератора осуществлялась только на водоугольном топливе.

Усредненная характеристика топлива приведена в таблице 4.8.



Таблица 4.8 - Характеристика водоугольного топлива

Наименование показателя	Единица измерения	Числовое значение
Гранулометрический состав:		
классы, мм	%	
+ 0,250		0,6
0,160 – 0,250		3,2
0,071 – 0,160		23,5
< 0,071		72,7
Итого		100,0
Массовая доля твердой фазы, $C_T$	%	58,4
Зольность, $A^d$	%	8,2
Эффективная вязкость при скорости сдвига $80 \text{ с}^{-1}$ и температуре $20^\circ\text{C}$ , $\eta$	мПа·с	370
Низшая теплота сгорания	ккал/кг	3900

На рисунке 4.8 представлена технологическая схема сжигания.

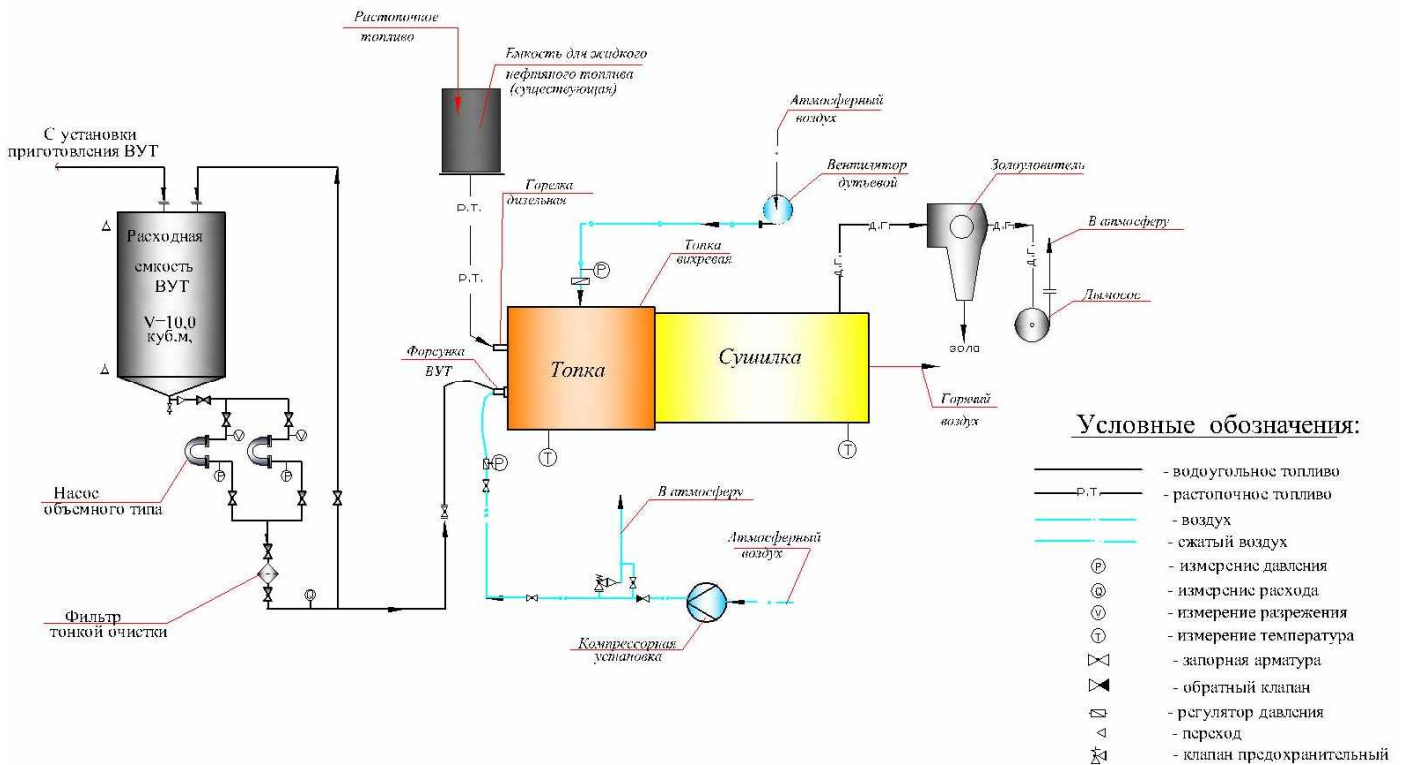


Рисунок 4.8 - Технологическая схема сжигания

Технологические результаты испытаний представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Результаты испытаний модифицированного теплогенератора

Наименование параметра	Единица измерения	Числовое значение
Расход топлива	л/ч	55
Температура в топке	°С	950
Температура воздуха	°С	80
Температура дымовых газов	°С	200
Тепловая мощность	кВт	250

При испытаниях работа топки была стабильной, горение устойчивое. Техническая характеристика топки представлена в таблице 4.10.

Таблица 4.10 - Техническая характеристика топки

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Величина
1.	Способ сжигания	-	вихревое
2.	Объем топочного пространства	м <sup>3</sup>	1,73
3.	Теплопроизводительность	Гкал/ч (МВт)	0,2 (0,25)
4.	Расход топлива	л/ч (кг/ч)	55 (66)
5.	Температура отходящих газов	°С	1000
6.	Размер пережимного окна	мм	Æ170
7.	Внутренний размер топки	мм	920x1300x1450

В процессе работы котла с использованием газоанализатора Testo t300 XXL измерялись концентрации вредных веществ в отходящих газах. Данные значения составили для окиси углерода 164 мг/м<sup>3</sup> (ПДК=375 мг/м<sup>3</sup>), для оксидов азота – 303 мг/м<sup>3</sup> (ПДК=750 мг/м<sup>3</sup>).

Таким образом, результаты испытаний модифицированного теплогенератора показали, что:

- водоугольное топливо обладает необходимой стабильностью при его транспортировке в емкостях на расстояние более 400км и сохраняет требуемые для процессов сжигания реологические и теплофизические характеристики;
- устойчивая работа горелки на водоугольном топливе обеспечивает необходимую теплопроизводительность теплогенератора;
- увеличение расхода топлива свыше 55л/ч вызывало повышение температуры отходящих дымовых газов и перегрев элементов теплообменной части теплогенератора, т.е. выбранный теплогенератор ТГ 2.5А оказался лимитирующим по теплопроизводительности для верхнего предела тепловой мощности топки;
- содержание вредных примесей в отходящих газах испытанного теплогенератора существенно меньше, чем предельно допустимые концентрации.

Расчет стоимости тепловой энергии (с учетом капитальных затрат) показал, что даже для столь малого объекта, как ТГ 2,5А (мощность 250 кВт), стоимость тепловой энергии в 3,3-3,5 раз ниже по сравнению с использованием жидких нефтепродуктов.

На основании полученных результатов, а также опыта промышленной эксплуатации котлов, работающих на ВУТ [82], видится следующее развитие данной технологии на предприятиях сельскохозяйственного комплекса.

В районном центре или крупном населенном пункте создается завод по производству водоугольного топлива. В летнее время топливо используется для сушильных комплексов зерна, витаминной травяной муки и т.д., расположенных в соседних населенных пунктах. Зимой ВУТ используется в существующих котельных, а также теплогенерирующих установках по отоплению производственных помещений различного назначения. В этом случае эффективность данной технологии увеличивается.

На основе применения вихревой адиабатической камеры сжигания отопительной котельной разработана технология термической утилизации



- тракт подачи сушильного агента в сушильный аппарат.

При этом обеспечивается:

- отсутствие вредных экологических воздействий на всех стадиях утилизации токсичных отходов жизнедеятельности животных и углеродсодержащих отходов и образований;

- уровень вредных выбросов, существенно меньший предельно допустимых значений при сжигании экологически чистого водоугольного топлива.

Расчеты показали, что при выработке тепловой энергии 5,4 Гкал/ч годовая экономия за счет использования более дешевого топлива (ВУТ) составляет 9 333 000 руб.

При этом обеспечивается полная утилизация обезвоженного навоза.

#### **4.1.3 Разработка установки сжигания водоугольного топлива для института химической переработки угля, г. Забже, Польша**

На базе института химической переработки угля в г. Забже, Польша была создана демонстрационная установка по сжиганию опытных партий водоугольного топлива в вихревой камере сжигания для отработки технологических режимов. Тепловая производительность топки - 0,250МВт (0,22Гкал/ч).

Сжигание ВУТ происходит в адиабатической вихревой топке, конструкция которой разработана в соответствии с рекомендациями, изложенными в разделе 3. Адиабатическая вихревая топка служит для обеспечения устойчивости топочного процесса с использованием ВУТ за счет стабилизации горения распылённого факела.

Техническая характеристика вихревой топки приведена в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Техническая характеристика адиабатической вихревой топки

№ п/п	Наименование параметра	Ед. измерения	Значение
1	Тепловая мощность	Гкал/ч (МВт)	0,22 (0,25)
2	Расход ВУТ	л/ч (кг/ч)	85 (100)
3	Расход сжатого воздуха	нм <sup>3</sup> /ч (нм <sup>3</sup> /мин)	60 – 120 (1,0 – 2,0)
4	Расход дутьевого воздуха	нм <sup>3</sup> /ч	600 - 800
5	Номинальная температура в топке	°С	1000 - 1100
6	Номинальный объем вихревой камеры	м <sup>3</sup>	1,8
7	Габаритные размеры (В x L x Н)	м	1,72x1,36x2,20
8	Размер пережимного окна	мм	Æ300
9	Внутренний размер топки	мм	928x1280x1500

Конструкция разработанной топки аналогична вихревым адиабатическим камерам сжигания описанным выше. Созданная топка ориентирована на сжигание водоугольного топлива (ВУТ), представляющего собой суспензию, приготовленную путем смешивания тонкомолотого угля или угольного шлама с водой и реагентом-пластификатором. Кроме того, топка может работать на высокорекреационном топливе (газ, мазут).

Ввод топлива в топочное пространство осуществляется путем диспергирования (распыления) его через форсунку. Распыляющим агентом является сжатый воздух.

Подвод вторичного воздуха в данной топке осуществляется через дутьевые сопла, расположенные внизу. Подводимый через сопла воздух выполняет две функции: является окислителем и обеспечивает вихревое движение газов в топке.

При работе на высокореакционном топливе (газ или мазут) следует использовать соответствующие форсунки.

Топочный объем по форме максимально приближен к форме внешнего контура вихря. Фронтальная и тыльная стенки – вертикальные плоские, боковые стенки – вертикальные, плоские, в верхней части переходящие в свод. Переход от боковых вертикальных стен к подине выполняется в виде откосов, внутри которых заделаны (замурованы) коллекторы (подводящие трубы) дутьевых сопел для вторичного дутья, обеспечивающего вихревое движение газов в топочном пространстве.

Для периодического обслуживания, а также для чистки служит люк-лаз, который располагается на фронтальной стенке топки.

Подача топлива в топку для сжигания осуществляется через форсунки специальной конструкции. Для размещения форсунок предназначено горелочное устройство. Горелочное устройство является частью топки, но выполняется в виде съемного элемента. Для размещения горелочного устройства в боковой стенке топки выполнен специальный проем, а на каркасе снаружи предусмотрены элементы для его крепления.

На задней стенке топки располагается газовыпускное окно, через которое горячие дымовые газы удаляются из топки для направления в теплообменный аппарат (как уже указывалось, в настоящем проекте теплообменный аппарат не предусмотрен). В настоящем проекте предусмотрено смешивание дымовых газов с воздухом для охлаждения до приемлемых значений температуры, после чего газы можно очистить от пыли и выбросить в атмосферу.

Проем для амбразуры, проем для люка-лаза и газовыпускное окно разгружаются от веса вышерасположенной кладки арками.

Кроме проемов для горелочного устройства, для люка-лаза и газовыпускного окна, в стене топки устраивается отверстие для наблюдения за горением и состоянием кладки внутри топки, так называемое смотровое окно.

Для размещения датчиков температуры и давления в кладке размещается закладная трубка.

Для поддержания горения и организации вихря в топку через специальные тангенциальные сопла от вентилятора подается дутьевой воздух.

Сотрудниками «Сибэкотехника» при участии автора совместно с польскими специалистами компании ООО «Жидкие угольные топлива», г. Катовице, Польша были проведены испытания пилотной установки сжигания водоугольного топлива (ВУТ). Монтаж установки осуществлен на площадке Института химической переработки угля, г. Забже, Польша (рисунок 4.10).



Рисунок 4.10 – Установка сжигания ВУТ, г. Забже, Польша

Топливо готовилось в лаборатории Института.

Результаты проведенных сжиганий подтвердили высокую эффективность сжигания ВУТ в разработанной топке и низкий уровень вредных выбросов.

На рисунке 4.11 представлены результаты проведенных сжиганий.



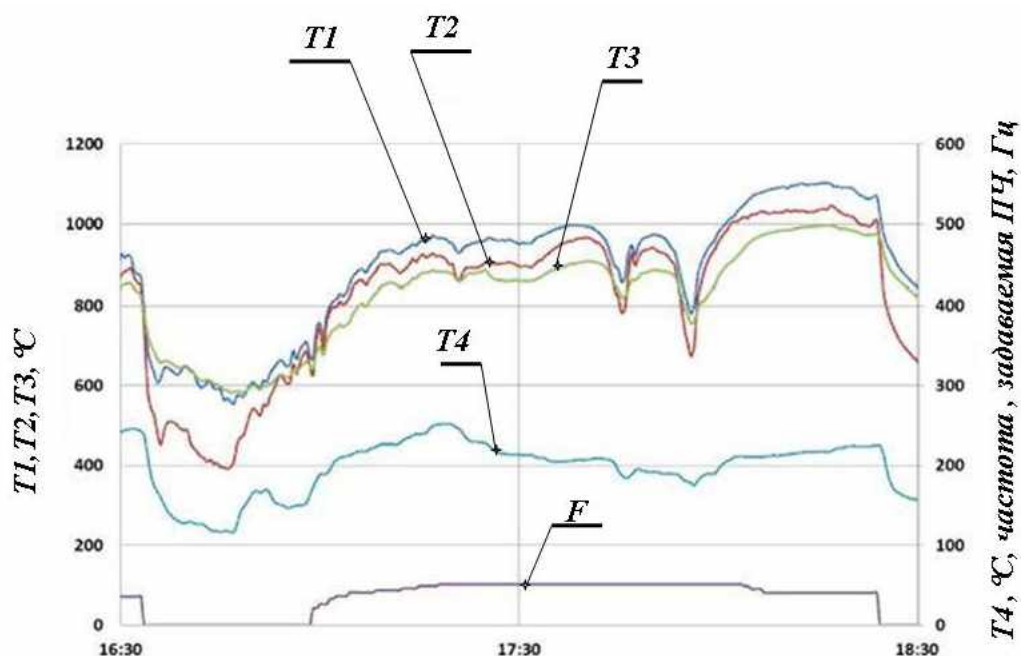


Рисунок 4.11 – Изменение параметров процесса горения при исследованиях.

Кривые на рисунке 4.11 обозначают:

T1 – температура в топке, °С ;

T2 – температура в борове, °С ;

T3 – температура перед котлом, °С ;

T4 – температура уходящих дымовых газов, °С;

F – частота, задаваемая ПЧ для насоса, Гц.

Опыт проведенных экспериментальных работ по сжиганию ВУТ в созданной вихревой топке показал, что на поде камеры сжигания отложений золы в виде спекшихся крупных частиц нет в виду, что удаляемая зола представлена легкими, хорошо выгоревшими частицами желтого цвета. В результате образующаяся при работе топки зола уносится дымогазовым потоком и, не оседая в элементах котла, достигает системы пылеулавливания.

## **4.2 Разработка конструкций и создание теплогенераторов малой и средней мощности с вихревыми топочными камерами с вертикальной осью вихря**

### **4.2.1 Разработка экспериментальной вихревой адиабатической топки**

Экспериментальный образец адиабатической топки с вертикальным вихрем был установлен на стендовой установке, технологическая схема которой представлена на рисунке 4.12.

Сжигание опытных партий суспензионного угольного топлива осуществлялось в специальной вихревой камере сжигания [5,6], оборудованной горелочными устройствами. Топливо из расходных емкостей с помощью винтового насоса, производительность которого составляет до 0,3 м<sup>3</sup>/ч, по системе трубопроводов подавалось к форсунке горелочного устройства. Регулирование производительности подачи топлива осуществлялось путем изменения частоты вращения двигателя насоса с помощью частотного преобразователя «Hitachi» J 100. К форсунке одновременно с топливом подводился сжатый воздух, энергия которого использовалась для распыления суспензионного топлива в пространство топки. Для обеспечения процесса горения в пространство топки дополнительно подавался воздух от дутьевого вентилятора, который забирался из помещения, в котором располагается опытно-промышленная установка. Подача дутьевого воздуха в топку осуществлялась через специальные дутьевые сопла, расположенные в кладке корпуса топки, тангенциально, по касательной к условной окружности, точно так же, как и форсунки подают в пространство топки распыленную струю топлива.

На рисунке 4.13 представлена адиабатическая вихревая топка с вертикальной осью вращения распыленного топлива и топочных газов, горелочным устройством и форсункой, котел, система дымогазоочистки и дутьевой вентилятор.

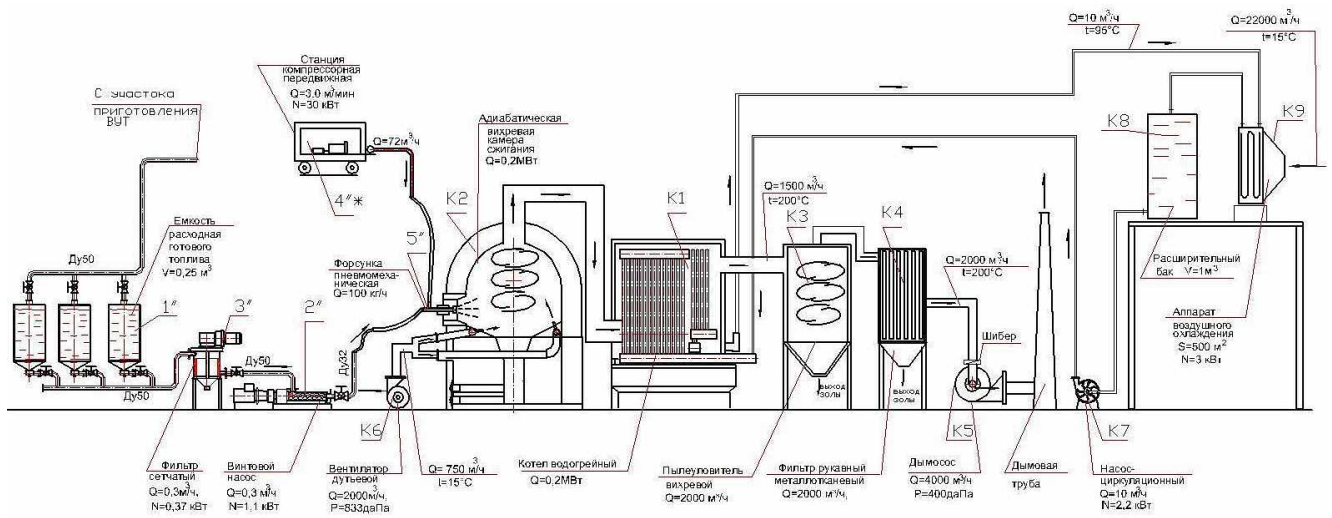


Рисунок 4.12 – Технологическая схема участка сжигания



Рисунок 4.13 – Общий вид установки для сжигания ВУТ

Температура в камере сжигания контролировалась с помощью термопреобразователя. Давление топлива и сжатого воздуха контролировалась датчиками давления, расход топлива и сжатого воздуха – соответствующими расходомерами. Все показания по давлению и температуре фиксировались на технологических измерителях. Для розжига применялась соляная горелка ВТЛ-

10Р. Топливом для нее служит дизельное топливо. Кроме того, для предварительного разогрева адиабатической топки может использоваться рядовой уголь или дрова.

Исходная температура в топке обычно составляла +25°C. Первоначально разогрев топки до температуры 680°C, осуществлялся с помощью солярной горелки в течение 40 минут. Затем в пространство топки подавалось распыленное суспензионное топливо и производилось совместное сжигание дополнительного и суспензионного жидкого топлива до достижения температуры 900°C. Далее подача дополнительного топлива прекращалась, дизельная горелка удалялась из горелочного устройства и горение суспензионного угольного топлива осуществлялось самостоятельно.

***Результаты исследования сжигания суспензионного угольного топлива в адиабатической топке с вертикальной осью вихря***

Для исследований использовались две опытные партии топлив. В таблице 4.13 представлена характеристика партий топлива.

Таблица 4.13 - Характеристика топлива, используемого для исследований

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значение	
			Топливо №1	Топливо №2
1.	Зольность	%	32	42
2.	Массовая доля твердой фазы	%	56	64
3.	Гранулометрический состав:	%		
	0,071 – 0,6 мм		20	80
	менее 0,071 мм		20	80
4.	Низшая теплота сгорания приготовленного топлива (расчетная)	МДж/кг	13,90	11,90

Расход топлива изменялся в пределах от 20 до 130 л/ч, разрежение в топке поддерживалось около 50 Па (5 мм вод. ст.). При этом режим работы дымососа изменялся таким образом, чтобы величина разрежения в топке сохранялась вблизи заданного значения. Основные характеристики процесса сжигания представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Режимы устойчивого горения

Наименование параметров	Топливо №1	Топливо №2
Температура в топке: $T_{\text{мин}}/T_{\text{макс}}$ °C	720/1150	850/1150
Расход ВУТ: $Q_{\text{вут мин}}/ Q_{\text{вут макс}}$ л/ч	20/80	100/130
СО в дымовых газах, мг/м <sup>3</sup>	170	190
NO <sub>x</sub> в дымовых газах, мг/м <sup>3</sup>	210	200

При поддержании расхода топлива №1 в пределах 30÷35 л/ч (37÷45кг/ч) горение суспензионного топлива без подсветки факелом солярной горелки затруднялось в первые три часа после розжига топки. При расходах свыше 60 л/ч (65 кг/ч и более) устойчивое горение факела суспензионного топлива без подсветки факелом солярной горелки достигалось уже через два часа после розжига топки из холодного состояния. Причина такого «поведения» топки заключается в том, что за два-три часа материал кладки (стенок) адиабатической топки недостаточно прогревается для обеспечения устойчивого горения факела суспензионного топлива и низкое тепловыделение в пространство топки (при сжигании малого количества топлива) приводит к «рассасыванию» тепла материалом топки (кирпичом кладки) и для поддержания процесса горения остается недостаточно энергии. Через четыре-пять часов работы топки устойчивое горение суспензионного топлива наблюдалось при расходах топлива не только 30÷35 л/ч (37÷45 кг/ч), но и при снижении расхода топлива до значений 18÷20 л/ч (22÷25 кг/ч). Температура в пространстве топки при сжигании топлива

№1 оказывалось легко управляемым параметром. Установлено, что при приближении коэффициента избытка воздуха к значению 1,4 или еще ближе к 1,0 (например, значения 1,35, 1,30 и еще менее) температура в пространстве топки начинает существенно повышаться, и достигает значения 1300 °С. При значениях температуры свыше 1150 °С зола начинает размягчаться, а при достижении 1250 °С она расплавляется. В результате при повышенных значениях температуры на стенах топки начинает нарастать скопление шлака. Такие обстоятельства при работе топки недопустимы, поэтому соотношение между расходами топлива и дутьевого воздуха для снижения температуры выбирается с серьезным избытком воздуха.

Устойчивое горение суспензионного топлива №2 без подсветки факелом солярной горелки обеспечивалось только после прогрева топки в течение пяти часов. Очевидно, сказывается не только повышенная зольность твердой фазы топлива, но и низкая реакционная способность компонентов топлива. Топливо, приготовленное из продуктов ОФ «Междуреченская», помимо высокой степени прогрева топки требует также и более тонкого регулирования соотношения между расходом топлива и расходом дутьевого воздуха. Устойчивое горение суспензионного топлива без подсветки другим факелом осуществлялось при изменении коэффициента избытка воздуха в пределах от 1,2 до 1,3, выходящих за пределы ( $a=1,2\div 1,3$ ) - приводило к снижению температуры. При поддержании расхода дутьевого воздуха в пределах, обеспечивающих величину  $a$  в оптимальном диапазоне, температура в топке быстро устанавливалась на уровне 1000÷1080 °С. Максимальное значение температуры в топке, которое было достигнуто при сжигании суспензионного топлива №2 составляет 1150 °С.

Сравнение режимов сжигания опытных партий топлив № 1 и №2 показывает, что снижение качества ВУТ за счет увеличения зольности с 24,6% до 42,0% приводит к соответствующему повышению расхода ВУТ от 80 до 130 л/ч.

Таким образом, работа созданной вихревой адиабатической топки подтвердила высокую эффективность сжигания ВУТ, полученного на основе ТДОУ даже при зольности отходов 42%.

#### 4.2.2 Разработка и создание экспериментального теплогенератора на базе котла «Теплотрон» (КВр-0,63ВУТ)

В КузГТУ при непосредственном участии автора был создан экспериментальный стенд приготовления и сжигания различных топлив с измерением расхода и давления топлива, распыляющего агента и дутьевого воздуха, температуры горения, а также состава дымовых газов, в том числе и суспензионного угольного топлива на основе ТДОУ [83- 84].

На рисунке 4.14 представлена технологическая схема участка сжигания на созданном стенде.

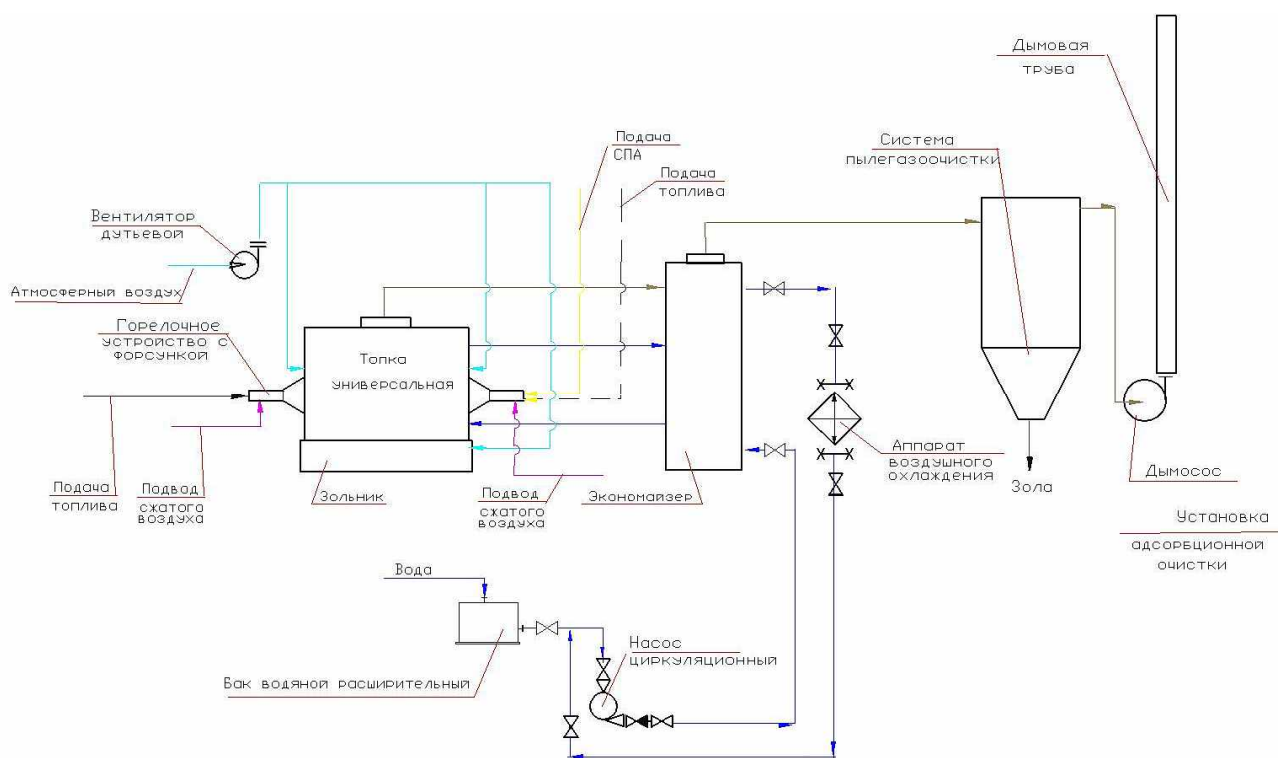


Рисунок 4.14 - Технологическая схема участка сжигания суспензионного угольного топлива (ВУТ)

Согласно разработанной технологической схеме (рис. 4.14) на сжигание подается либо дробленый уголь (кл. 0-6(13) мм), либо суспензионное водоугольное топливо (ВУТ). Дробленый уголь подается на колосниковую решетку котла вручную. ВУТ дозировано подается в котел насосом объемного типа с регулируемым приводом. Для распыления водоугольного топлива в топке

котла используется компрессорный воздух. Отходящие газы, проходя двухстадийную газоочистку, направляются в дымовую трубу.

Для сжигания угля и ВУТ был разработан специализированный котел на базе известных котлов «Теплотрон», изготавливаемых на Новокузнецком котельном заводе.

На рисунке 4.15 представлен общий вид котла «Теплотрон»

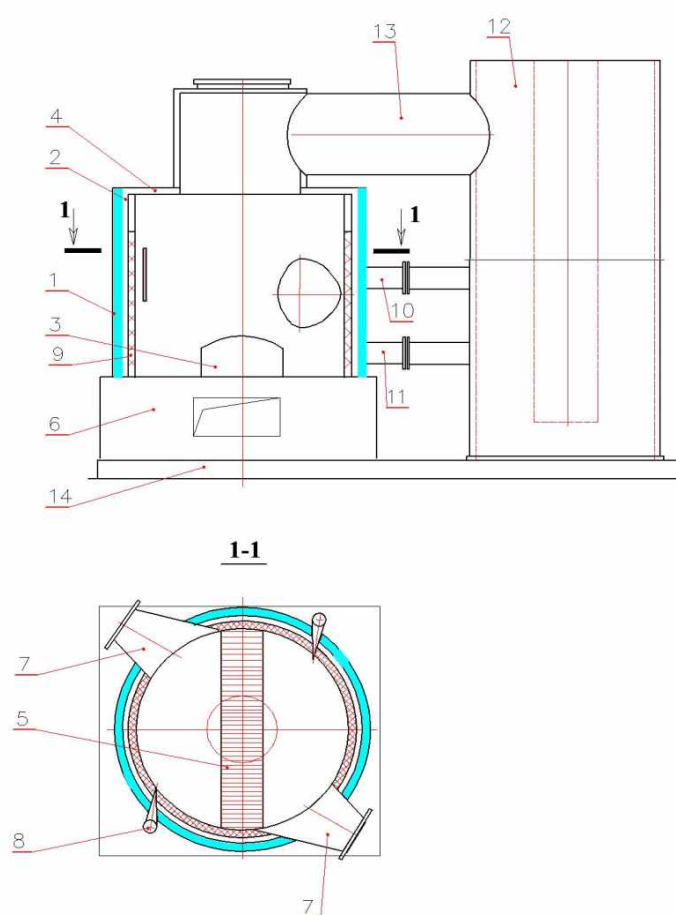


Рисунок 4.15 - Котел

Котел (рис. 4.15) состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1 с водоохлаждаемой рубашкой 2, дверцей 3 и крышкой 4, колосниковой решетки 5 и зольника 6. Наружная поверхность цилиндрического корпуса теплоизолирована. На боковой поверхности корпуса смонтированы горелочные устройства 7 с форсунками (на рисунке не показаны) и щелевые сопла 8 для тангенциальной подачи дутьевого воздуха. Внутренняя цилиндрическая поверхность камеры



сгорания над колосниковой решеткой теплоизолирована термостойким материалом 9. Для подвода и отвода жидкого теплоносителя смонтированы соответственно патрубки 10 и 11. Для теплосъема оборудована система теплообмена 12 между горячими продуктами горения и теплоносителем. Корпус котла и система теплообмена связаны газоходом 13. Корпус котла с зольником и система теплообмена установлены на раме 14.

Для сжигания угля и ВУТ был разработан специализированный котел на базе известных котлов «Теплотрон», изготавливаемых на Новокузнецком котельном заводе. Котел (рис. 2) состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1 с водоохлаждаемой рубашкой. Котел работает следующим образом.

Первоначально производится прогрев внутренней полости корпуса котла – камеры сгорания, размещенной над колосниковой решеткой, за счет сжигания твердого топлива (уголь, дрова и др.) на колосниковой решетке. Затем начинается подача суспензионного водоугольного топлива.

Суспензионное водоугольное топливо подается в котел насосом из емкости хранения (рисунок 4.14) через форсунки горелочных устройств 7. В форсунки также подается распыляющий компрессорный воздух. Струи распыленного топлива подаются тангенциально условной поверхности внутри камеры сгорания корпуса 1 котла. Одновременно тангенциально в камеру сгорания подается воздух через щелевые сопла 8, ориентированные в том же направлении, что и горелочные устройства. За счет организации вихревого движения в корпусе котла осуществляется эффективное сгорание распыленного топлива. Возможные несгоревшие крупные частицы угля выпадают на колосниковую решетку 5, где догорают, создавая при этом дополнительную «подсветку» в зоне горения распыленного топлива. Крупные частицы золы и шлаковые отложения, накапливаемые на колосниковой решетке, периодически разгружаются в зольник 6. Образующиеся при сгорании топлива горячие газы через внутреннюю полость крышки 4 котла и газоход 13 поступают в систему теплообмена 12. В результате происходит теплообмен между горячими газами и жидким теплоносителем. Частичный теплообмен между продуктами горения и жидким теплоносителем

происходит также в корпусе котла за счет наличия водоохлаждаемой рубашки 2. Надежная и эффективная работа котла обеспечивается также наличием адиабатических или близких к ним условий в зоне горения топлива.

Транспортирование дымовых газов из топки в экономайзер предусмотрено с помощью дымососа. После экономайзера дымовые газы поступают в двухступенчатый пылеуловитель, а затем через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу.

В таблице 4.15 представлены результаты испытаний нового котла типа «Теплотрон», работающего как на угле, так и на ВУТ.

Таблица 4.15 - Результаты испытаний котла

Наименование показателей	По проекту	Фактически достигнутые
Теплопроизводительность котла, МВт	0,63	0,65
Низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг	3000-3100	2900- 3400
Расход топлива, л/ч	300	160 - 370
Температура в топке, °С	1050±50	1100±100
Температура отходящих газов, °С	180	180
Температура воды, °С:		
– на входе	60	55
– на выходе	80	87
К.П.Д. котла, %	0,85	0,86

Результаты разработки нового котла на базе выпускаемых котлов «Теплотрон», позволяющего эффективно сжигать отходы углеобогащения. При этом уровень вредных примесей, образующихся при сжигании, существенно ниже допустимых значений.

Данные по содержанию вредных примесей, образующихся при сжигании ВУТ, приведены в таблице 4.16 в пересчете на величину  $\alpha = 1,4$ .

Результаты работы созданного котла полностью подтвердили его проектные показатели. При этом были достигнуты высокие показатели по уровню мех- и химнедожога топлива (соответственно не более 5 % и 80 мг/м<sup>3</sup>, что существенно меньше предельно допустимых значений).

Таблица 4.16 – Состав и количество вредных выбросов в дымовых газах при сжигании опытных образцов топлива

Исходное сырье	ПДК*	ВУТ	
		«ОФ ш. Комсомолец»	«ОФ ш. имени С.М. Кирова»
Пыль, мг/м <sup>3</sup>	250	не более 170	не более 200
СО, мг/м <sup>3</sup>	375	не более 75	не более 75
NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	750	не более 250	не более 230
SO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	1200	не более 200	не более 200
ПАУ (бенз(а)пирен), мг/м <sup>3</sup>	0,1·10 <sup>-3</sup>	менее 0,1·10 <sup>-3</sup>	

\* – нормативы удельных выбросов в атмосферу твердых частиц, окиси углерода, оксидов азота и серы, бенз(а)пирена

### 4.3 Перевод на сжигание ВУТ промышленных угольных котлов

#### 4.3.1 Разработка и создание технологического комплекса по приготовлению и сжиганию ВУТ на шахте «Заречная»

На промплощадке шахты ОАО «Шахта «Заречная» был реализован проект технологического комплекса по приготовлению суспензионного топлива (ВУТ) на

основе кека фильтр-пресса и переводу на его сжигание котла Е-1-9 в летней котельной шахты [85]. Технология приготовления топлива характеризуется простотой и малой энергоемкостью.

Исходный кек автопогрузчиком загружается в приемный бункер и конвейером направляется в двухшнековый смеситель специальной конструкции. Одновременно в смеситель дозировано подается техническая вода с реагентом. После перемешивания в течение 24-30 минут полученная суспензия разгружается в приемный зумпф через фильтр грубой очистки. Готовое топливо специальным насосом – активатором перекачивается в аккумулирующую емкость.

В таблице 4.17 представлена усредненная характеристика суспензионного топлива, приготовленного на основе фильтр-кека шахты «Заречная».

Таблица 4.17 - Усредненная характеристика топлива, приготовленного на основе фильтр-кека шахты «Заречная»

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Числовое значение
1	Содержание твердой фазы	%	не менее 58
2	Зольность твердой фазы	%	25– 28
3	Гранулометрический состав, мм		
	0,2 – 0,5		1,3
	0,1 – 0,2		16,6
	0,05 – 0,1		15,7
	- 0,05		66,4
4	Эффективная вязкость	мПа·с	не более 800
5	Низшая теплота сгорания	Ккал/кг (МДж/кг)	3100 – 3300 (13–14)

Сжигание ВУТ осуществляется в котле Е-1-9, установленном в котельной шахты, эксплуатируемой в летний период. Для этого рядом с котлом была

сооружена топка специальной конструкции. Подача топлива из аккумулирующей емкости в топку осуществляется перистальтическим насосом. Регулирование подачи топлива осуществляется изменением частоты вращения оборотов электродвигателя насоса. Для распыления ВУТ используется форсунка пневмомеханического типа.

В таблице 4.18 приведена техническая характеристика топки.

Таблица 4.18 - Техническая характеристика топки

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Величина
1.	Способ сжигания	-	вихревое
2.	Объем топочного пространства	м <sup>3</sup>	1,5
3.	Теплопроизводительность	Гкал/ч (МВт)	0,4- 0,7 (0,5- 0,8)
4.	Расход топлива	л/ч (кг/ч)	125- 195 (150- 234)
5.	Температура отходящих газов	°С	120- 135
6.	Размер пережимного окна	мм	Æ278
7.	Внутренний размер топки	мм	1250x875x1350

В процессе комплексного опробования была разработана режимная карта работы котла на ВУТ, обеспечивающая регулирование теплопроизводительности котла в пределах от 0,4 до 0,7 Гкал/ч. Установлен к.п.д. работы котла, равный 87% при паспортном значении 88%.

Результаты работы котла на суспензионном угольном топливе представлены в таблице 4.19.

Таблица 4.19 - Результаты работы котла Е-1-9 на ВУТ

Наименование параметра	Единица измерения	Числовое значение	
		минимально	максимально
1	2	3	4
Теплопроизводительность	Гкал/ч	0,4	0,7
Температура воды на входе	°С	60	69
Температура воды на выходе	°С	75	96
Расход воды через котел	м <sup>3</sup> /ч	26,5	26,5
Расход топлива	л/ч	125	195
Температура отходящих газов	°С	120	135

В процессе работы котла с использованием газоанализатора Testo 300 XXL измерялись концентрации вредных веществ в отходящих газах. Данные значения составили для окиси углерода 164 мг/м<sup>3</sup> (ПДК=375 мг/м<sup>3</sup>), для оксидов азота - 303 мг/м<sup>3</sup> (ПДК=750 мг/м<sup>3</sup>).

На рисунке 4.16 представлено фото котла Е-1-9 с топкой для сжигания ВУТ



Рисунок 4.16 - Фото котла Е-1-9 с топкой ВУТ.

В рамках реализации проекта:

- было приготовлено и сожжено более 400 т ВУТ, приготовленного на основе фильтр - кека ОФ;
- была разработана режимная карта работы котла на ВУТ, обеспечивающая регулирование теплопроизводительности котла в пределах от 0,4 до 0,7 Гкал/ч;
- установлен к.п.д. работы котла, равный 87% при паспортном значении 83%.

В результате проведенных промышленных испытаний было установлено, что эффективным экологически чистым способом утилизации угольных шламов (кека пресс-фильтров) является его сжигание в виде суспензионного топлива с получением тепловой и (или) электрической энергии.

В таблице 4.20 представлены сравнительные технико-экономические показатели работы котла Е-1-0,9 на угле и водоугольном топливе (летняя котельная шахты «Заречная»).

Таблица 4.20 - Техничко-экономические показатели работы котла Е-1-9 на угле и ВУТ

№ п/п	Наименование показателя	Ед-цы изм.	Вид топлива	
			уголь	ВУТ
1	2	3	4	5
1.	Марка		ГР, рядовой	на основе фильтр-кека
2.	Низшая теплота сгорания	ккал/кг	5500	3200
3.	Зольность	%	15	28
4.	Стоимость топлива	руб/т	1000	218
5.	Расход топлива на время работы	т/сезон	611	742
6.	Удельный расход	т/час	0,170	0,206

Продолжение таблицы 4.20

7.	Производительность за время работы	Гкал/сезон	2016	2016
8.	К.п.д. котла	%	0,6	0,85
9.	Общие удельные затраты на получение 1 Гкал	руб/Гкал	503	318
10.	Экономический эффект сжигания ВУТ	руб/сезон	-	373 000

По результатам работы было подготовлено предложение по созданию мини-ТЭЦ на основе сжигания кека фильтр-прессового отделения обогатительной фабрики с использованием получаемых отходов от сжигания ВУТ в стройиндустрии.

#### **4.3.2 Разработка и создание технологического комплекса приготовления и сжигания ВУТ, г. Черепаново**

В г. Черепаново, Новосибирской области при непосредственном участии автора был создан технологический комплекс по приготовлению и сжиганию водоугольного топлива (ВУТ), приготовленного из угольных шламов и отходов углеобогащения. Территориально комплекс расположен в Новосибирской области в 109 км к югу от г. Новосибирска.

Основной целью создания комплекса было снижение стоимости вырабатываемой тепловой энергии с соблюдением требуемых экологических показателей.

В состав технологического комплекса входят следующие участки:

- участок приготовления ВУТ со складом исходного материала;
- участок подачи ВУТ на сжигание;
- котельная ячейка в составе:
  - специализированный котел для сжигания ВУТ;
  - тягодутьевое и вспомогательное оборудование;



- пылеулавливающая система с двухстадийной очисткой.

Водоугольное топливо из расходно-аккумулирующих емкостей насосом с регулируемым приводом через фильтр тонкой очистки подается на сжигание через форсунки в топку котла. Для распыления ВУТ в топку используется сжатый воздух от компрессорной станции.

Сжигание полученного топлива осуществлялось в котельной установке, оснащенной котлом с адиабатической вихревой камерой сгорания. Дозированная подача ВУТ в камеру сгорания осуществлялась насосом через пневмомеханическую форсунку. Для исключения забивания сопел форсунки на линии подачи ВУТ установлен самоочищающийся фильтр тонкой очистки. Распыление ВУТ осуществлялось сжатым воздухом.

Проектная теплопроизводительность котла составляет 0,8МВт, расчетный КПД - не менее 80%.

На рисунке 4.17 представлено фото установки приготовления и сжигания ВУТ.



Рисунок 4.17 – Общий вид установки приготовления и сжигания ВУТ

Характеристика топлива, сжигаемого в котельной, представлена в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Характеристика топлива, сжигаемого в котлоагрегате

№ п/п	Наименование показателя	Ед-ца изм.	Значение
1.	Влага общая	%	38- 41
2.	Зольность (на сухое)	%	20- 32
3.	Выход летучих	%	25- 42
4.	Крупность частиц	мм	0- 0,5
5.	Низшая теплота сгорания (среднее значение)	МДж/кг (ккал/кг)	15,07 (3600)

В таблице 4.22 представлены технологические параметры, зафиксированные в процессе эксплуатации комплекса.

Таблица 4.22 - Параметры работы котла на ВУТ

№	Технологический параметр	Значение
1	Расход ВУТ	200 л/ч или 240 кг/ч
2	Давление ВУТ	0,24 МПа
3	Давление воздуха	0,25 МПа
4	Расход теплоносителя (воды)	51,7 м <sup>3</sup> /ч
5	Разница температур теплоносителя (подача-обратка)	15 °С
6	Температура входящих в котел газов	843 °С
7	Температура газов в топке	1072 °С
8	Температура дымовых газов	175 °С
9	Теплопроизводительность котла	0,56 МВт 0,48 Гкал/ч
10	КПД котла	80,8%

Из приведенных данных следует, что полезная тепловая мощность комплекса на момент наблюдения составила 0,9 МВт при проектной 0,8 МВт. При этом КПД работы котла составил 89,8%. В расчете учтены потери тепла комплекса в окружающую среду и с дымовыми газами. Высокое значение КПД (практически на уровне газовых котлов) объясняется применением высокоэффективной вихревой системы сжигания тонкодисперсного топлива, при которой существенно снижены механический и химический недожог топлива.

#### **4.3.3 Разработка и создание технологического комплекса по приготовлению и сжиганию ВУТ на ОАО «Междуречье»**

На современных углеобогатительных фабриках при обогащении образуются тонкодисперсные отходы в виде фильтр-кека с влажностью 30-45 % и зольностью от 20 до 60 %. В настоящее время данный продукт не реализуется и сбрасывается в породный отвал. В результате усугубляется и без того неблагоприятная экологическая обстановка в угольных регионах, а также безвозвратно теряются миллионы тонн добытого угля.

Для решения данной проблемы был разработан технологический комплекс на ОАО «Междуречье» (г. Междуреченск, Кемеровская обл.) [86,87]. Суспензионное угольное топливо (ВУТ) приготавливается на основе фильтр-кека, получаемого при обогащении углей марок «КС», «СС» и «Т», и сжигается в котле ДКВР 10-13 промышленной котельной, расположенной на промплощадке.

Технологический комплекс включает в себя:

— установку приготовления ВУТ на основе фильтр-кека обогатительной фабрики. Установка расположена в главном корпусе обогатительной фабрики на участке погрузки фильтр-кека в автотранспорт;

— участок приема, хранения и подачи ВУТ на сжигание, расположенный в отдельном помещении в непосредственной близости от котельной. Доставка ВУТ от установки приготовления до узла хранения осуществляется автотранспортом. Расстояние доставки составляет не более 1 км. Подача ВУТ в котел

осуществляется насосами по трубопроводам, проложенным по галерее подачи угля в котельную;

— котел ДКВР 10-13 (№1) в котельной промплощадки разреза переоборудован на сжигание ВУТ. Особенностью реконструированного котла ДКВР 10-13 ВУТ является наличие в топочном объеме котла вертикальной вихревой топки с пережимным окном. Вихревая топка оборудована горелочными устройствами с форсунками ВУТ, расположенными в два яруса и ориентированными тангенциально к условной внутренней цилиндрической поверхности. В нижней части вихревой топки смонтировано дополнительное топочное устройство в виде решетки с шурующей планкой, на которую подается дробленый промпродукт (уголь) для розжига котла и «подсветки» при работе на низкокачественном ВУТ.

Характеристика исходного фильтр-кека ОФ представлена в таблице 4.23.

Таблица 4.23 - Характеристика фильтр-кека

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Влага общая	$W_t^r$	%	39- 43
Зольность на сухое состояние	$A^d$	%	35 - 48
Выход летучих веществ	$V^{daf}$	%	24,2
Высшая теплота сгорания	$Q_{daf}^s$	МДж/кг (ккал/кг)	33,14 (7920)
Низшая теплота сгорания	$Q_r^i$	МДж/кг (ккал/кг)	8,7- 11,9 (2080-2850)
Гранулометрический состав: класс крупности 0-3	$d$	мм	0- 100

Технология приготовления ВУТ отличается простотой и малой энергоемкостью. Производительность установки приготовления составляет 4 т/ч. Фильтр-кек с конвейерной ленты реверсивного конвейера направлялся в шнековый питатель, которым подавался в реактор-смеситель. Одновременно в смеситель дозировано подавался водный раствор реагента-пластификатора. После смешивания водоугольная суспензия разгружалась на фильтр грубой очистки, нижний продукт которого перекачивался в аккумулирующие емкости. Из емкостей полученное топливо автотранспортом доставлялось на участок сжигания котельной. Сжигание топлива производилось на котле ДКВР-10/13. В нижней части вихревой топki смонтировано дополнительное топчное устройство в виде решетки с шурующей планкой, на которую подается дробленый промпродукт (уголь) для розжига котла и «подсветки» при работе на низкокачественном ВУТ.

Вследствие необходимости добавления жидкой фазы в виде раствора реагента-пластификатора влажность ВУТ увеличивается на 2-3% по сравнению с влажностью исходного фильтр-кека. Характеристика ВУТ, получаемого на основе фильтр-кека, представлена в таблице 4.24.

Таблица 4.24 - Характеристика водоугольного топлива, приготовленного на технологическом комплексе ОАО «Междуречье»

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
1	2	3
Массовая доля твердой фазы	%	56,2
Зольность	%	31,5
Выход летучих веществ	%	24,2
Высшая теплота сгорания	МДж/кг (ккал/кг)	31,14 (7920)

Низшая теплота сгорания	МДж/кг (ккал/кг)	8,8 (2100)
Гранулометрический состав	%	
+0,355 мм		—
0,250-0,355 мм		2,1
0,071-0,250 мм		26,2
-0,071 мм		71,7
Эффективная вязкость при скорости сдвига $81 \text{ с}^{-1}$ $t=20^{\circ}\text{C}$	мПа·с	281

Реконструкция котла заключалась в демонтаже существующей слоевой топки и устройстве в топочном пространстве котла низкотемпературной вихревой топки с вертикальной осью вращения вихря. Конструктивно топка разделена пережимом в виде газовыпускного окна на два объема: верхний – отводящая камера дожигания и нижний – собственно вихревая топка с шурующей планкой. Вихревая топка снабжена системой специальных сопел для тангенциальной подачи дутьевого воздуха с целью формирования в топочном объеме вихревой аэродинамики. Для подачи дутьевого воздуха через сопла в вихревую камеру устанавливается вентилятор острого дутья.

Распыленное водоугольное топливо подается также тангенциально через форсунки двух горелочных устройств, расположенных на стенках вихревой камеры. Распыление ВУТ осуществляется с использованием сжатого воздуха или пара. В качестве резервного топлива и топлива для розжига используется уголь по существующей системе подачи угля в котел с поддувом для разброса топлива на колосник шурующей планки.

Шурующая планка предназначена для равномерного распределения подаваемого угля и удаления шлаковых образований при его сжигании. Под колосник шурующей планки осуществляется дополнительная подача воздуха от существующего дутьевого вентилятора.

Золоудаление производится по существующей схеме при работе котла на угле. Применение вихревого топочного процесса с удержанием мелких частиц угля или распыленного ВУТ и дожиганием уноса в потоке острого дутья обеспечивает глубокое выжигание горючих, повышенную экономичность и высокие экологические показатели в процессе сжигания.

Пылеулавливание летучей золы осуществляется существующими пылеуловителями.

Схема реконструкции котла представлена на рисунке 4.18.

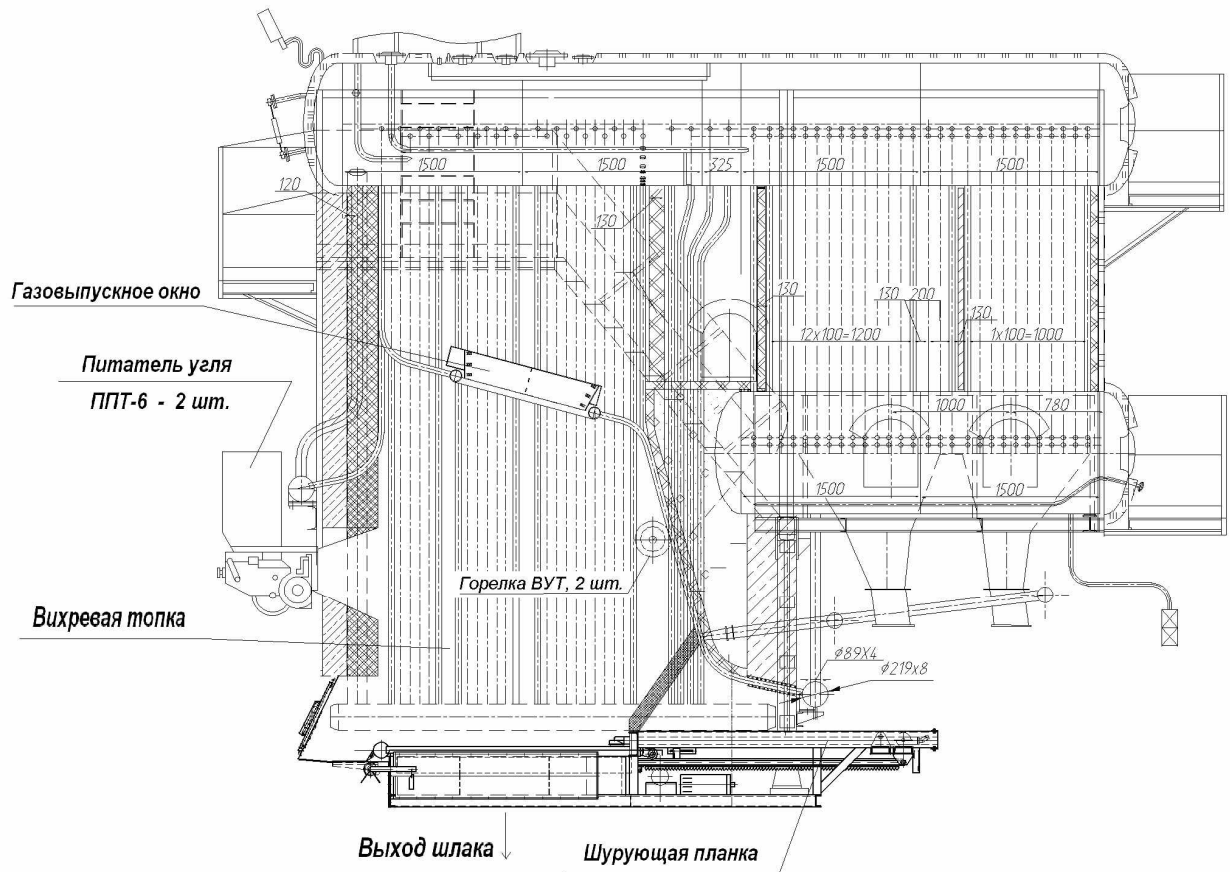


Рисунок 4.18 - Котел ДКВР-10-13ВУТ продольный разрез.

Сжигание партий топлива на котле производилось по следующей схеме.

Котел, работающий на угле в номинальном режиме, был переведен на совместное сжигание угля и ВУТ. Затем осуществлялся постепенный перевод работы котла на ВУТ без использования угля.

Фото котлоагрегата ДКВР-10-13, реконструированного для сжигания ВУТ представлено на рисунке 4.19.

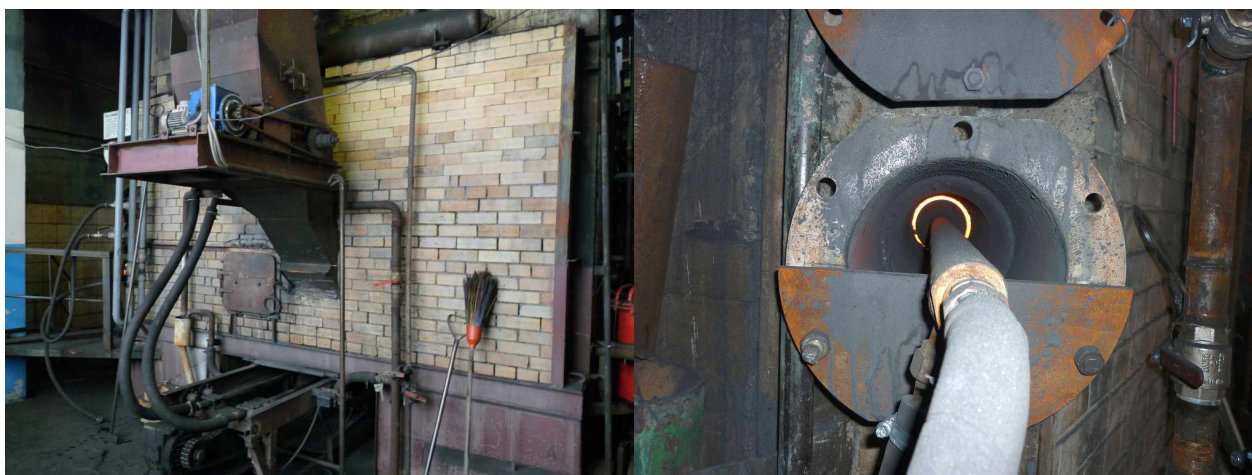


Рисунок 4.19 - Котел ДКВР-10-13ВУТ, котельная ОАО «Междуречье»

Работа котла осуществляется в трех режимах:

1-й режим — работа котла на рядовом угле;

2-й режим — работа котла при совместной подаче угля и ВУТ;

3-й режим — работа котла только на ВУТ, без подачи угля.

Результаты сжигания партий водоугольного топлива в котле ДКВР 10-13 ВУТ представлены в таблице 4.25.

Таблица 4.25.- Результаты работы котла ДКВР 10-13 при различных режимах.

№ п/п	Наименование параметра	Ед-ца изм.	Описание работы		
			работа на угле	совместное сжигание ВУТ и угля	сжигание ВУТ
1	2	3	4	5	6
1	Расход угля	кг/ч	400	249	-
2	Расход ВУТ	кг/ч	-	1540	1500
3	Низшая теплота сгорания $Q_i$	ккал/ч	5000	1540	2400



Продолжение таблицы 4.25

1	2	3	4	5	6
4	Паропроизводительность, в том числе:	т/ч	4,5	5,3	6,0
	на угле		4,5	1,9	-
	на ВУТ		-	3,4	6,0
5	Температура в топке котла	°С	900-1000	950-1100	1050-1100
6	Давление сжатого воздуха	атм.	-	3,5-4,0	4,0-5,0
7	Давление ВУТ	атм.	-	5-5,5	5,5-6,5
8	КПД ( расчетный)		0.78	0,81	0,88

При промышленной эксплуатации технологического комплекса были выявлены следующие особенности:

— наблюдалось наличие существенных колебаний низшей теплоты сгорания ВУТ ( $Q_{н}^r$ ) за счет значительных колебаний влажности и зольности фильтр-кека;

— не удавалось достичь номинальных значений паропроизводительности котла даже при подаче твердого топлива на «подсветку», вследствие низких значений  $Q_{н}^r$  ВУТ (в отдельных случаях  $Q_{н}^r$  составляла 6,2 МДж/кг (1482 ккал/кг)).

Установлено, что при подаче ВУТ, приготовленного на основе промпродукта с низшей теплотой сгорания 2906 ккал/кг, процесс сжигания происходит более интенсивно. При расходе ВУТ 1,5-1,6 м<sup>3</sup>/ч и температуре в топке 1040-1101°С фактическая паропроизводительность котла составила в среднем 5,6т/ч. Горение ВУТ поддерживалось при температуре в пределах 1100-1150°С, и при этом не происходило зашлаковывания топки.

Мехнедожог при сжигании ВУТ составил не более 5 %.

Режимные испытания технологического комплекса по утилизации тонкодисперсных отходов углеобогащения путем приготовления и сжигания ВУТ показали его работоспособность и соответствие проектным характеристикам.

Достигнута устойчивая работа котла на ВУТ без подсветки углем при значениях низшей теплоты сгорания ВУТ 2400 ккал/кг и более. При этом КПД работы котла при сжигании ВУТ составил более 80%.

#### **4.4 Выводы**

Разработаны, созданы и опробованы в стендовых, опытно-промышленных и промышленных условиях конструкции теплогенераторов малой и средней мощности с вертикальной и горизонтальной осью вихря в адиабатической камере сжигания в том числе.

## **ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ПИЛОТНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ПТК ) НА ОСНОВЕ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ НА ВУТ**

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований, а также проведенных опытно-промышленных испытаний непосредственным участником которых является автор, был разработан и утвержден бизнес-план по созданию пилотного технологического комплекса по приготовлению и сжиганию суспензионного угольного топлива (ПТК ВУТ) на основе теплогенераторов малой и средней мощности.

Суть проекта заключается в создании пилотного технологического комплекса по получению дешевой тепловой энергии за счет использования в качестве топлива – суспензионного угольного топлива (ВУТ), полученного на основе отходов углепереработки (фильтр-кека) (ОУП).

Бизнес план разработан для котельных теплопроизводительностью 1,6МВт (1,4 Гкал/ч) и 11,6 МВт (10) (Гкал/ч).

Комплекс включает следующие сооружения:

- установку приготовления ВУТ;
- котельную ячейку с участком топливоподачи ВУТ.

Принципиальная схема, предлагаемого комплекса представлена на рисунке 5.1.

Работа комплекса осуществляется по следующей схеме.

Некондиционная угольная мелочь автотранспортом доставляется на закрытый склад участка по приготовлению ВУТ.

Со склада некондиционная угольная мелочь подается в приемную воронку ленточного конвейера, который направляет исходный материал в лопастной смеситель. Одновременно с ним в смеситель дозировано подается насосом-дозатором водный раствор реагента-пластификатора.

Водный раствор реагента-пластификатора готовится в установке приготовления реагента.

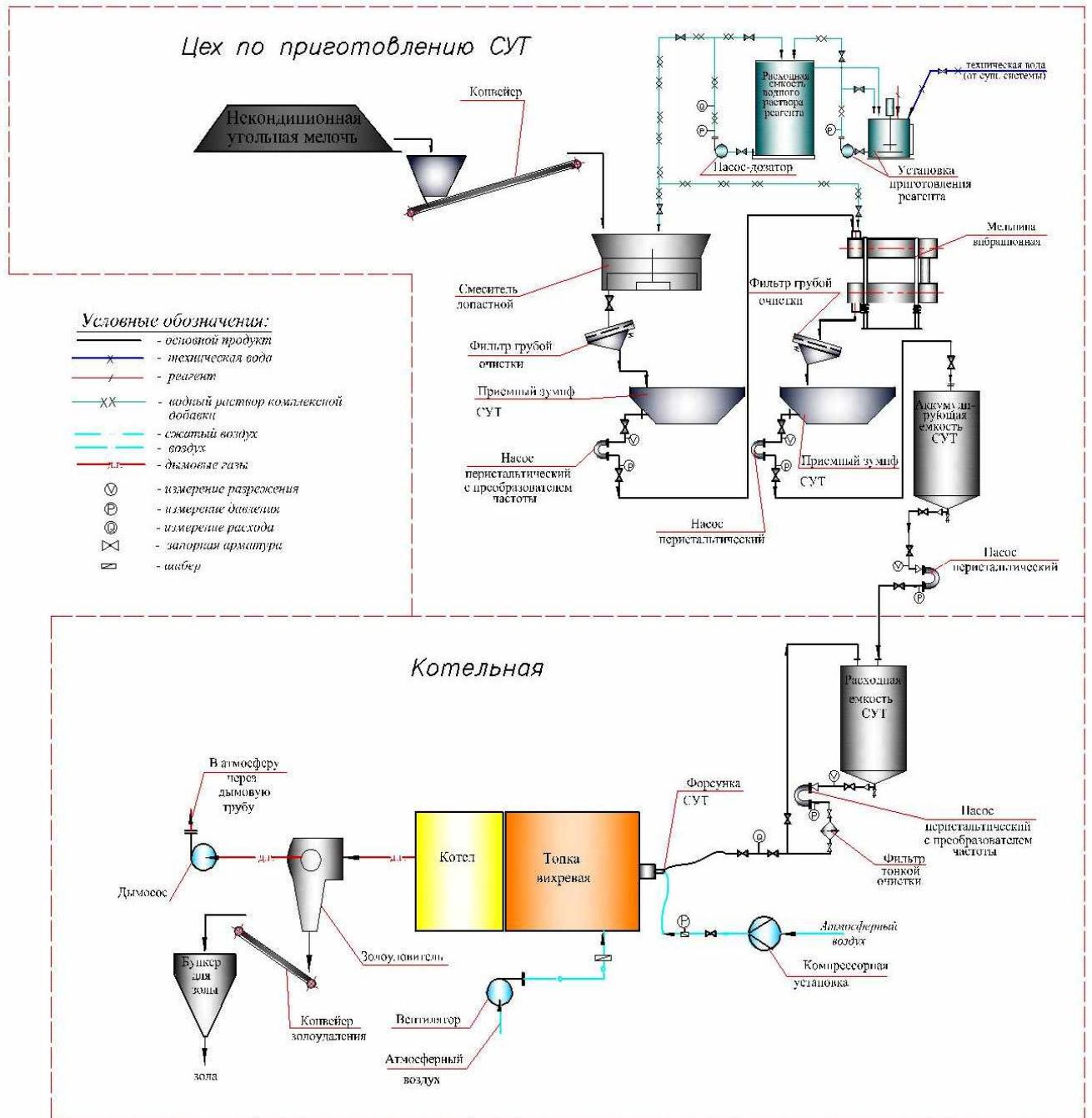


Рисунок 5.1 - Принципиальная технологическая схема ПТК ВУТ.

После перемешивания в лопастном смесителе угольной мелочи с водным раствором реагента угольная суспензия самотеком поступает на фильтр грубой очистки для удаления посторонних примесей и крупных частиц. После фильтрации подрешетный продукт самотеком поступает в зумпф и затем насосом направляется на доизмельчение и дополнительное перемешивание в барабанную

вибрационную мельницу. После доизмельчения и перемешивания угольная суспензия самотеком поступает в зумпф, откуда насосом – диспергатором направляется в аккумулирующие емкости, при этом осуществляется процесс гомогенизации, что позволяет снизить вязкость топлива. Готовое ВУТ аккумулируется в вертикальных металлических резервуарах с нижним выпуском. Количество и объем резервуаров определяется на стадии рабочего проектирования.

Из аккумулирующих резервуаров ВУТ насосом загружается в автоцистерну и направляется в котельную.

В котельной установлены приемно-расходные резервуары, объем и количество которых определяется исходя из необходимого запаса топлива для бесперебойной работы котельных агрегатов. Для сжигания ВУТ в котельной устанавливаются специализированные котлоагрегаты с вихревой системой сжигания. В горелочных устройствах котлоагрегатов установлены пневмомеханические форсунки специальной конструкции.

Подача ВУТ из расходной емкости к пневмомеханической форсунке осуществляется насосом через фильтр тонкой очистки. Насос оснащен частотным преобразователем, что позволяет поддерживать оптимальный расход ВУТ. Одновременно с ВУТ к форсунке подается сжатый воздух для распыла в топочном пространстве. В топку от вентилятора подается дутьевой воздух, который через сопла поступает в топочное пространство и служит для поддержания горения и образования вихря. Таким образом, осуществляется вихревой способ сжигания в топочном объеме котла ВУТ.

Применение вихревого способа сжигания позволяет достичь наиболее полного выгорания горючих составляющих топлива. Зола от сжигания ВУТ мелкая с содержанием горючих не более 5%. Для очистки дымовых газов и улавливания золы используются высокоэффективные тканевые фильтры.

Для стабильной работы котельной технологическая характеристика ВУТ должна соответствовать следующим параметрам:

– крупность частиц  $0 - 0,350\text{мм}$ ;

- массовая доля твердой фазы 58 – 62%;
- низшая теплота сгорания не ниже 3000ккал/кг;
- статическая стабильность не менее 10 суток.

***Расчетные показатели.***

Установка по приготовлению ВУТ обеспечивает производительность по готовому топливу 4 т/ч.

Режим работы установки соответствует режиму работы котельной:

- отопительный период 240 дней.

За данный период объем приготовленного топлива составит:

$$G_{\text{ВУТ}} = 4 \times 240 \times 20 = 19200 \text{ т,}$$

где 4 – производительность установки, т/ч;

240 – длительность отопительного периода, дни;

20 – время работы оборудования в сутки, ч.

В таблице 5.1 приведена потребность в исходных компонентах для получения ВУТ с требуемыми технологическими параметрами.

Таблица 5.1 - Потребность в исходных компонентах для приготовления ВУТ.

Исходный компонент	Потребность		
	т/ч	т/сут.	т/сезон
Отходы углеобогащения	3.32	66.4	15936.0
Реагент-пластификатор	0.024	0.48	115.2
Техническая вода	0.656	13.12	3148.8
ВУТ	4.0	80.00	19200.0

В таблице 5.2 приведен перечень основного технологического оборудования установки по приготовлению ВУТ.

Таблица 5.2 – Перечень основного технологического оборудования установки по приготовлению ВУТ.

Наименование оборудования	Кол-во, шт.
Погрузчик	1
Конвейер ленточный	1
Питатель - шнековый	1
Реактор-смеситель	1
Фильтр грубой очистки	2
Приемный зумпф ВУТ	2
Насос перистальтический шланговый	4
Установка приготовления раствор	1
Мельница вибрационная	1
Расходная емкость водного раствора реагента	1
Насос центробежный	1
Насос-активатор погружной	1
Аккумулирующая емкость ВУТ	-
Трубопроводы и трубопроводная арматура	-

Общая установленная мощность технологического оборудования – 150кВт.

В таблице 5.3 приведен расчет себестоимости 1т ВУТ

Таблица 5.3 - Эксплуатационные затраты и себестоимость 1т ВУТ.

№ п/п	Элементы затрат	Потребность	Цена, руб.	Затраты, тыс. руб.	Удельные затраты	
					руб.	%
1	2	3	4	5	6	7
I	<b>Материальные затраты</b>					

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3	4	5	6	7
1.	Отходы углеобогащения, т/год	15908,6	100	1591,0	82,9	31,5
2.	Реагент- пластификатор, т/год	67,0	21000	1403,0	73,0	27,8
3.	Техническая вода, м <sup>3</sup> /год	3224,4	3,0	9,7	0,5	0,2
	<b>ВСЕГО I:</b>	<b>19 200,0</b>	<b>-</b>	<b>3 03,7</b>	<b>156,4</b>	<b>59,5</b>
<b>II</b>	<b>Эксплуатационные затраты</b>					
1.	Расходные материалы (металл, ГСМ)	-	-	50,0	2,6	1,0
2.	Электроэнергия	315 тыс. кВт⋅ч/ год	2,5	780,0	40,6	15,5
3.	ФОТ	3 чел/сут.		480,0	25,0	9,5
4.	ЕСН	-	-	144,0	7,5	2,8
5.	Амортизационные отчисления	-	-	342,0	17,8	6,8
6.	Текущий ремонт	-	-	68,4	3,6	1,4
7.	Прочие общезаводские расходы	-	-	178,1	9,3	3,5
	<b>ВСЕГО II:</b>			<b>2 042,5</b>	<b>106,4</b>	<b>40,5</b>
	<b>Общие затраты</b>			<b>5 046,2</b>	<b>262,8</b>	<b>100</b>
	<b>Себестоимость</b>				<b>263,0</b>	



На производство 1 Гкал тепловой энергии потребность в топливе (ВУТ) составит:

$$G_{\text{ВУТ}} = 1 : 3,3 : 0,80 = 0,378 \text{ т/ч}$$

где, 1 - количество произведенной тепловой энергии, Гкал/ч;

3,3 - низшая теплота сгорания ВУТ, Гкал/т;

0,8 - к.п.д. котла при работе на ВУТ.

При себестоимости ВУТ 263 руб./т затраты на топливо при производстве 1 Гкал составят:

$$263 \cdot 0,378 = 99,6 \text{ руб./Гкал,}$$

По данным Заказчика максимальная подключенная тепловая нагрузка в отопительный сезон составляет 1,4 Гкал/ч.

Для производства требуемого количества тепловой энергии в котельном зале котельной устанавливается котельный агрегат производительностью 1,4 Гкал/ч работающий на ВУТ. Кроме того, в непосредственной близости от котла размещается участок топливоподачи ВУТ к котлоагрегату.

В таблице 5.4 приведен перечень основного технологического оборудования котельной ячейки и участка топливоподачи.

Таблица 5.4 – Перечень основного технологического оборудования котельной ячейки и участка топливоподачи.

Наименование оборудования	Кол-во, шт.
1	2
Приемно-расходная емкость	-
Насос перистальтический шланговый с преобразователем частоты	2
Насос перистальтический шланговый	1
Фильтр тонкой очистки	2
Котел водогрейный ВУТ Q=1,6 Гкал/ч	1

Продолжение таблицы 5.4

1	2
Форсунка для ВУТ	2
Компрессорная установка	1
Вентилятор	1
Дымосос	1
Система золоулавливания	1
Выгружатель шлака	1
Трубопроводы и трубопроводная арматура	-

По данным Заказчика в настоящее время на котельной используется уголь с низшей теплотой сгорания 5,2 – 5,7 Гкал/т. В 2014 году было сожжено 1 239 т. Годовые затраты на уголь составили 1 273 405,01 руб. Исходя из представленных данных, стоимость угля составила:

$$1\,273\,405,01 : 1\,239 = 1\,027,8 \text{ руб./т,}$$

На производство 1 Гкал тепловой энергии потребность в угле составляет:

$$G_y = 1 : 5,4 : 0,70 = 0,264 \text{ т/ч}$$

где, 1 – количество произведенной тепловой энергии, Гкал/ч;

5,4– низшая теплота сгорания угля, Гкал/т;

0,70 – КПД котла при работе на угле.

При стоимости угля 1027,8 руб./т затраты на уголь при производстве 1 Гкал составят:

$$1\,027 \cdot 0,264 = 271,3 \text{ руб./Гкал,}$$

Экономия на топливной составляющей при замене угля на ВУТ при производстве 1 Гкал составляет:

$$271,3 - 99,6 = 171,7 \text{ руб.}$$

Объем произведенной тепловой энергии в 2014 году на основании представленных данных составил:

$$1\,239 \times 5,4 \times 0,7 = 4683,4 \text{ Гкал.}$$

где, 1 239 – количество израсходованного угля, т/год;

5,4 – теплота сгорания угля, Гкал/т;

0,7 – к.п.д. котла при работе на угле.

Общий экономический эффект при замене угля на ВУТ при производстве тепловой энергии в объеме 4683.4 Гкал составит:

$$4\ 683.4 \times 171,7 = 802,7 \text{ тыс. руб.}$$

***Техническое обеспечение реализации проекта.***

Общая сумма капитальных затрат для реализации данного проекта составляет 14 990 тыс.руб.

Для реализации предлагаемого комплекса необходимо затратить средства на проведение работ по выполнению проектно-сметной документации, проведению авторского надзора при проведении строительных работ и монтажа оборудования, на проведение пуско-наладочных работ и режимных испытаний.

Затраты на перечисленные работы составят 2200тыс. руб., в том числе:

– установка приготовления ВУТ – 1000 тыс. руб.

из них проектно-сметная документация 600 тыс.руб.;

– котельная ячейка с участком топливоподачи – 1200 тыс. руб из них проектно-сметная документация 800 тыс.руб..

Затраты на строительно-монтажные работы (СМР) определены по сметам-аналогам и удельным затратам и для предлагаемого комплекса составляют 2 280 тыс. руб., в том числе:

– СМР по установке приготовления ВУТ – 580 тыс.руб.;

– СМР по котельной – 1 700 тыс.руб.;

Затраты на покупку оборудования определены по сметам-аналогам и для предлагаемого комплекса составляют 10 510 тыс. руб., в том числе:

– оборудование для установки приготовления ВУТ – 3 390,0 тыс.руб.;

– оборудование для котельной ячейки

с участком топливоподачи – 7 120,0 тыс.руб.

Таблица 5.5 – План реализации проекта.

Наименование работ	Сроки исполнения	Затраты, тыс. руб.	
		установка приготовления	котельная ячейка и топливоподача
Разработка проектно-сметной и конструкторской документации, проведение экспертизы.	2 мес.	600,0	800,0
Поставка оборудования	3 мес.	3 390,0	7 120,0
Строительно-монтажные работы.	3 мес.	580,0	1700,0
Авторский надзор, пуско-наладочные работы, обучение персонала	2 мес.	400,0	400,0
Общий срок осуществления работ	7мес.	4970,0	10020,0
Общие затраты по комплексу		14 990,0	

На рисунке 5.2 приведен поквартальный график реализации проекта по созданию комплекса.

Общая сумма затрат на реализацию проекта по созданию ПТК составит 14 990 тыс. руб. (с НДС). Основными источниками финансирования данной суммы являются средства инвестора. В таблице 5.6 представлены основные технико-экономические показатели ПТК ВУТ.

№ п/п	Наименование работ	Месяц						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
1	Разработка проектно- сметной документации и проведение экспертизы	■						
2	Заказ, изготовление и поставка оборудования		■					
3	Строительно-монтажные работы				■			
4	Пуско – наладочные работы							■

Рисунок 5.2 – Поквартальный график реализации проекта.

Таблица 5.6 – Основные технико-экономические показатели ПТК ВУТ.

№ п/п	Наименование показателей	Значение			
		Q= 1,6 (1,4) МВт (Гкал/ч)		Q= 11,6 (10)МВт ( Гкал/ч)	
1	2	3	4	5	6
1.	Вид топлива	Уголь	ВУТ	Уголь	ВУТ
2.	Режим работы	Отопительный сезон			
3.	Производство тепловой энергии, МВтж	10 524		75 168	
4.	КПД работы котельной установки	0,6	0,85	0,6	0,85
5.	Низшая теплота сгорания топлива, Гкал/т	5,300	3,300	5,300	3,300
6.	Капитальные затраты, тыс. руб.	10 000		35 000	
7.	Расход топлива, т/МВт	0,36	0,44	0,36	0,44
8.	Стоимость топлива, руб./т	1500	500	1500	500

## Продолжение таблицы 5.6

1	2	3	4	5	6
9.	Экономический эффект при замене угля на ВУТ, тыс. руб./се-зон		2 560		18 210
10.	Срок окупаемости капитальных вложений, год		3,9		2,7

**Основные экономические показатели к концу реализации проекта.**

К концу реализации проекта по созданию ПТК общие затраты предприятия-инвестора составят 30 млн. руб.

Показатели работы ПТК в течение первых 3-х лет эксплуатации приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Показатели работы ПТК.

Основные статьи	1-ый год, тыс. руб.	2-ой год, тыс. руб.	3-ий год, тыс. руб.
1	2	3	4
Выручка без НДС в прогнозных ценах	30 500	45 780	45 780
Материальные затраты без НДС	7 725	11 590	11 590
Зарплата	1 280	1 920	1 920
Производственные затраты без НДС в прогнозных ценах	5 550	8 326	8 326
Стоимость основных производственных фондов на начало периода	20 200	18 560	16 920
Амортизационные отчисления	1 640	1 640	1 640

Продолжение таблицы 5.7

1	2	3	4
Остаточная стоимость основных производственных фондов на конец периода	18 560	16 920	15 280
Налоги всего (на имущество + ЕСН + страхование)	444+576= 1 000	410+576= 986	370+576= 946
Всего доходы	30 500	45 780	45 780
Всего расходы	17 200	24 500	24 400
Прибыль	13 300	21 300	21 380
Налог на прибыль	3 325	5 325	5 345
Чистая прибыль	9 975	15 975	16 035

Уровень рентабельности проекта определяется как отношение чистой прибыли предприятия к стоимости основных фондов и оборотных средств.

Для данного предприятия уровень рентабельности составит:

$$Y_p = 15975 / (20200 + 19915) = 0,5.$$

Срок окупаемости инвестиций определен с учетом дисконтирования денежных потоков:

$$T = K - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_p + A}{(1+r)^i}}{\emptyset},$$

где

- ПР – прибыль, руб.;
- К – стоимость основных фондов (средств), руб.;
- А – амортизационные отчисления, руб.;
- r – ставка дисконтирования, равная 15 %;

-  $i$  – порядковый номер расчетного года;

-  $n$  – номер года, на котором произойдет окупаемость затрат.

При учете продолжительности строительства равной 1 году приток денежных потоков за период строительства (0 год) происходить не будет.

Таблица 5.8 – Расчет срока окупаемости инвестиций с учетом дисконтирования денежных потоков.

№ расчетного года	Чистая прибыль	Коэффициент дисконтирования	Дисконтированная прибыль, тыс. руб.	Оставшаяся сумма инвестиций на текущий год, тыс. руб.
0	-	1	-	30000,0
1	9975	0,87	8678,25	21322,0
2	15975	0,76	12141,00	9181,0
3	16035	0,66	10583,10	-1402,1

Сумма дисконтированных доходов за 3 года составит 31 402,35 тыс. руб., что больше размера инвестиций и это значит, что возмещение первоначальных инвестиционных расходов произойдет раньше 3 лет.

То есть дисконтированный срок окупаемости инвестиций составляет 2 года 10 мес.

***Возможные моменты, типы и источники рисков, меры по их уменьшению.***

К основным стратегическим рискам относятся:

1. Риски, связанные с государственным регулированием тарифов на тепло-энергию, в результате чего они могут быть установлены ниже экономически обоснованного уровня.

Действия предприятия для уменьшения данных рисков:



- повышение операционной эффективности путём реализации программ по снижению производственных издержек и экономии топлива;
- проведение работы по заключению долгосрочных контрактов на теплоснабжение;
- расширение рынков сбыта с целью диверсификации структуры сбыта, продажа части тепловой энергии на открытом рынке.

2. Эксплуатационные риски, связанные со старением оборудования и износом основных фондов. Возможные негативные изменения: потеря надежности энергоснабжения, перебои в производстве тепловой энергии.

Действия предприятия для уменьшения данных рисков:

- реконструкция действующих и строительство новых объектов;
- техническое перевооружение основных фондов.

3. Риски, связанные с возможным изменением цен на сырье, услуги, используемые предприятием в своей деятельности.

Действия предприятия для уменьшения данных рисков:

- повышение операционной эффективности предприятия путём реализации программ по снижению производственных издержек и экономии топлива;
- заключение долгосрочных договоров с поставщиками по стабильным, заранее известным ценам.

4. Риски, связанные с повышением цен на оборудование и другие материально-технические ресурсы, используемые предприятием в своей деятельности.

Действия предприятия для уменьшения данных рисков:

- создание конкурентной среды в сфере закупок работ и услуг;
- оптимизация затрат на ремонтно-эксплуатационные нужды и капитальное строительство.

5. Риски, связанные с введением целевой модели конкурентного рынка тепловой энергии.

Действия предприятия для уменьшения данных рисков:

- постоянный анализ конъюнктуры рынка электро- и теплоэнергии;
- гибкая стратегия участия;
- выбор оптимального состава контрагентов.

В таблице 5.9 приведены возможные риски меры по их предотвращению.

Таблица 5.9 – Таблица рисков.

№ п/п	Описание риска	Ранг риска	Меры по предотвращению. Меры реагирования в случае возникновения.
1	2	3	4
<b>Прогнозируемые риски.</b>			
1	Технический риск (недостаточный опыт работы с отходами углеобогащения и АПК)	3	Проведение дополнительных испытаний использования тонкодисперсных отходов углеобогащения и ОЖЖ для приготовления топлива на стендовой установке. Использование финансового резерва по статье непредвиденные расходы.
2	Производственный риск (недостаточная квалификация персонала, возможность перебоев в теплоснабжении при вводе в эксплуатацию)	2	Организация обучения технического персонала. Создание резервного запаса топлива. Предусмотреть возможность работы на резервном топливе. Использование финансового резерва по статье непредвиденные расходы.

Продолжение таблицы 5.9

1	2	3	4
3	Коммерческий риск (возможный срыв сроков реализации проекта)	2	Составление и строгое выполнение графика изготовления, поставки и монтажа оборудования.  Разработка мероприятий по минимизации непредвиденных расходов и превышение сметы проекта.

### 5.1 Выводы

Помимо расчетных показателей экономической эффективности, проект расширяет возможности сферы использования водоугольного топлива. А также оптимизирует экологические затраты предприятий за загрязнение окружающей природной среды от процессов доставки, хранения, погрузки- разгрузки угля; за загрязнение окружающей природной среды при сжигании топлива в котельных.

#### *Экологический эффект от использования водоугольного топлива:*

- экологически безопасное топливо на всех стадиях производства, транспортирования и использования;
- позволяет в 1,5-3,5 раза снизить вредные выбросы в атмосферу (пыли, оксидов азота, бенз(а)пирена, двуокиси серы);
- позволяет эффективно использовать образующуюся при сжигании летучую золу.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определено влияние зольности и выхода летучих на: состав газовой фазы в атмосфере топки, режим сжигания и температуру в топочном пространстве, необходимые для устойчивого горения суспензионного топлива.

2. На основании анализа предложенной модели, а также численных расчетов установлено, что процесс горения различных по структуре частиц (капли ВУТ и угольные частицы) в адиабатической топке становится идентичным уже по истечении нескольких долей секунды, при этом температурный режим стабильного горения ВУТ устанавливается в границах 850–1100°С в зависимости от выхода летучих веществ, при этом, время нахождения в топке капель ВУТ и угольных частиц должно быть не менее 3–5 секунд.

3. Найдены зависимости параметров сжигания ВУТ из угольных шламов и ТДОУ от характеристик топлива; разработана методика расчета геометрических размеров вихревых адиабатических камер сгорания малой и средней мощности с учетом их теплопроизводительности и качества ВУТ.

4. Экспериментальные исследования, испытания в опытно-промышленных и промышленных условиях теплогенераторов, работающих на ВУТ, показали их высокую техническую эффективность (механический недожог составил не более 5 %, КПД котлов не менее 86 %), а количество вредных выбросов в уходящих газах существенно меньше предельно допустимых значений (в 2,1–3,0 раза).

5. Предложены конструкции и созданы теплогенераторы малой и средней мощности с горизонтальной и вертикальной осью вращения в вихревой топочной камере и разработаны технологические режимы их работы; определена технико-экономическая эффективность применения теплогенераторов малой и средней мощности, работающих на ВУТ различного качества, в разных отраслях промышленности;

6. Разработан бизнес-плана создания ПТК ВУТ на основе теплогенераторов малой и средней мощности производительностью 1,6 (1,4)

МВт (Гкал/ч) и 11,6 (10) МВт (Гкал/ч). Экономический эффект при замене угля на ВУТ составляет от 2,56 до 18,21 млн. руб./сезон.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1) H.W. Liu, W.D. Ni, Z. Li, L.W. Ma, Strategic thinking on IGCC development in China, Energy Policy 36 (1) (2008) 1–11.

2) Антипенко, Л.А. Обогащение углей: проектирование, опробование и контроль/ Л.А. Антипенко, С.А. Силютин. - М.: Изд-во «Горная книга» ООО «Киммерийский центр», 2019. - 520 с.

3) Антипенко Л.А. Технологические регламенты обогатительных фабрик Кузнецкого бассейна/ Л. А. Антипенко. Изд. 2-е, перер. и доп. - г. Прокопьевск: Изд-во «Прокопьевское полиграфическое производственное объединение». 2007. - 463 с.

4) Антипенко Л.А., Вахрушева Г.Д., Мурко В.И., Федяев В.И., Чичиндаев М.Г., Венгер К.Г. Тонко-дисперсные отходы углеобогащения – как сырьевая база для создания энергогенерирующих комплексов. Уголь, 2011. 9, 76-77

5) Разработка научно-технических основ для создания технологии подготовки и сжигания суспензионного угольного топлива, приготовленного на основе отходов углеобогащения и пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса: отчет о НИР №322/2010 / Мочалов С.П. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2011. – .....с.

6) Мочалов, С.П. Автоматизированный экспериментально-лабораторный энерготехнологический комплекс / С.П. Мочалов, А.А. Ивушкин, Л.П. Мышляев, К.Г. Венгер, В.И. Мурко, А.И. Куценко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко // Уголь. – 2012. – № 10 (1039). – С. 49-53.

7) Крашенинников, О.Н. Опытнo - промышленная проверка технологии сжигания водоугольного топлива на основе побочных продуктов обогащения угля и исследование золоотходов / О.Н. Крашенинников, Т.П. Белогурова, А.В. Цырятьева, В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко. Деп. рукопись 01.07.2014, № 181-В2014.

8) Мурко, В.И. Разработка технологии комплексного использования побочных продуктов обогащения угля / В.И. Мурко, В.И. Карпенко, Т.П. Белогурова, И.А. Миханошина // Уголь. – 2017. – № 4 (1093). – С. 54-59.

9) Мурко, В.И. Утилизация отходов углеобогащения на предприятиях по производству тепловой энергии / В.И. Мурко, В.И. Карпенко, Д.А. Черных, В.Н. Делягин, Н.М. Иванов // В сборнике: Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства. IV Международная научная экологическая конференция (с участием экологов Азербайджана, Армении, Беларуси, Германии, Грузии, Казахстана, Киргизии, Латвии, Ливана, Молдовы, Приднестровья, России, Словакии, Узбекистана и Украины). Редколлегия: Трубилин А. И., Шоба С. А., Кошаев А. Г., Шеуджен А. Х., Белюченко И. С., Гукалов В. Н., Смагин А. В., Радионов А. И., Терпелец В. И., Корунчикова В. В., Новопольцева Л. С., Выходцева Н. А. – 2015. – С. 612-617.

10) Мурко, В.И. Разработка экологически чистых технологий использования отходов углеобогащения и сжигания / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко, В.П. Мастихина, В.О. Шеховцова // В сборнике: ПРИРОДНЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ СИБИРИ. СИБРЕСУРС 2016. сборник материалов XVI международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 180.

11) Murko, V.I. THE USAGE OF BOILERS WITH A VORTEX FURNACE FOR BURNING ENRICHMENT PRODUCTS AND DEBALLASTING COAL / V.I. Murko, V.I. Karpenok, V.I.Fedyaev, E.M. Puzyryov, M.P. Baranova // В сборнике: XVIII International Coal Preparation Congress. Conference proceedings. – 2016. – С. 345-350.

12) Murko, V.I. THE DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGICAL COMPLEX FOR UTILIZATION OF FINE WASTE COAL PP "TUGNUYSKAYA" / V.I. Murko, V.I. Karpenok, V.I. Fedyaev, S.A. Silyutin // В сборнике: XVIII International Coal Preparation Congress. Conference proceedings. – 2016. – С. 339-343.

13) Зайденварг, В.Е. Производство и использование водоугольного топлива / В.Е. Зайденварг, К.Н. Трубецкой, В.И. Мурко, И.Х. Нехороший. - М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. - 176 с.

14) Мурко, В.И. Физико-химические основы водоугольного топлива / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.А. Хямяляйнен; под общ. ред. В.И. Мурко. РАЕН; ГУ КузГТУ. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2009. – 195 с.

15) Делягин, Г.Н. Обводненное твердое топливо – энергетическое топливо / Г.Н. Делягин, Б.В. Канторович // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий: сборник. – М.: Наука, 1967. – С.5-13.

16) Делягин, Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха / Г.Н. Делягин // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий: сборник. – М.: Наука, 1967. – С.45-55.

17) Делягин, Г.Н. Теплогенерирующие установки: Учеб. для вузов/Г.Н. Делягин, В.И. Лебедев, Б.А. Пермяков. – М.: Стройиздат, 1986. – 559 с.

18) Делягин, Г.Н. Об условиях совместного протекания процессов испарения воды и выгорания капли водоугольной суспензии/ Г.Н. Делягин // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий: сборник. – М.: Наука, 1967. – С.55-67.

19) Делягин, Г.Н. Перспективы использования высокозольных обводненных отходов углеобогащения в энергетических установках / Г.Н. Делягин, В.М. Иванов, Б.С. Исаев, Б.С. Филиппов // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий: сборник. – М.: Наука, 1967. – С.19-30.

20) Давыдова, И.В. Экспериментальное исследование процесса горения водоугольной суспензии / И.В. Давыдова, Г.Н. Делягин, Б.В.Канторович, В.С. Леваневский // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. - М.: Наука, 1965. - С.140-145.

21) Делягин, Г.Н. Сжигание водоугольных суспензий из донецких тощих углей в топке промышленного порового котла / Г.Н.Делягин, В.И. Кирсанов, А.Г.



Онищенко, А.И. Гладкий // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. - М.: Наука, 1969. - С.40-51.

22) Смирнова, З.В. О взаимодействии обводненного твердого топлива с кислородом / З.В. Смирнова, Г.Н. Делягин // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий: сборник. – М.: Наука, 1967. – С.68-77.

23) Делягин, Г.Н. Исследование процесса воспламенения капли водоугольной суспензии / Г.Н.Делягин, Б.Н. Сметанников // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. - М.: Наука, 1965. – С.126-140.

24) Бутылькова, Г.Н. Зола и шлак при сжигании водоугольных суспензий/ Г.Н. Бутылькова, Г.Н. Делягин // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. - М.: Наука, 1969. - С.58-64.

25) Вулканов, Е.И. Исследование топочного процесса в паровом котле при сжигании водоугольной суспензии/ Е.И. Вулканов, Г.Н. Делягин, В.И. Кирсанов, В.С. Леваневский, А.Г. Онищенко // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий: сборник. – М.: Наука, 1967. – С.122-135.

26) Бутылькова, Г.Н. Сжигание обводненных каменных углей с малым содержанием летучих в виде водоугольных суспензий в опытной топке парового котла / Г.Н. Бутылькова, Е.И. Вулканов, Г.Н. Делягин, В.С. Фролов // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий: сборник. – М.: Наука, 1967. – С.135-144.

27) Бурдуков, А. П. Экспериментальное исследование динамики горения капель водоугольных суспензий / Бурдуков А. П., Карпенко Е. И., Попов В. И., Разваляев В. Н., Федосенко В. Д. // Физика горения и взрыва, 1996, т. 32, №4. – С.62-66.

28) Берг Б. В. Тепло - и массоперенос в топках с кипящим слоем при сжигании водоугольной смеси/ Берг Б. В., Богатова Т. Ф. // Инженерно-физический журнал, 1996, т. 69, №6. – С.993-999.

29) Основы практической теории горения / Под ред. В. В. Померанцева // – Л.: Энергия, 1973. –263с.

30) Виленский, Т. В. / Динамика горения пылевидного топлива/ Т.В. Виленский, Д. М. Хзмалян // -М.: Энергия, 1978. – 248с.

31) Кондратьев, В. Н. Кинетика и механизм газофазных реакций/ В. Н.Кондратьев, Е. Е. Никитин // – М.: Наука, 1974. – 558с.

32) Хитрин, Л. Н. / Физика горения и взрыва/ Л. Н. Хитрин // –Издательство Московского Университета, 1957. – 442с.

33) Винтовкин, А. А. Технологическое сжигание и использование топлива / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, Ю.М. Голдобин, Г.П. Ясников//– М.: Metallurgy, 1998. -292с.

34) Сенчулова, Ю.А. Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками/ Ю.А. Сенчулова, В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба, Е.М. Пузырев // Известия Томского Политехнического Университета. – Т.312. - № 4. - 2008. – с. 37-40.

35) Сенчулова, Ю.А. Модель распыления водоугольного топлива /Ю.А. Сенчулова, В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды VII международной научно – практической конференции – Кемерово: ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, ИУУ СО РАН, КузГТУ, ЗАО КВК «Экспо-Сибирь», 2005. – с. 93-94.

36) Сенчулова, Ю.А. Результаты исследований распыления водоугольного топлива/ Ю.А. Сенчулова, В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба // Материалы VI международной научно – практической конференции – Кемерово, 15-16 ноября 2005 г. / отв. ред. Ю.А. Антонов; зам. отв. ред. Л.А. Шевченко; Кузбасс. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2005. – с. 152-154.

37) Сенчулова, Ю.А. Механизм распыления водоугольного топлива / Ю.А. Сенчулова, В.И. Мурко // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых (8-11 декабря 2005 г.): в 7 ч. /Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2006. – Ч.3. – С.84-86.

38) Сенчурова, Ю.А. К вопросу о сжигании дисперсионных водоугольных суспензий /Ю.А. Сенчурова, В.И. Мурко // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов XII Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: ТПУ, 2006. – С. 161- 164.

39) Бойко, Е. Е. Разработка методических основ сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий при плазменном сопровождении в котлоагрегатах ТЭС: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.14 /Бойко Екатерина Евгеньевна. - Новосибирск, 2018. - 162 с.

40) Овчинников, Ю.В. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий: монография /Ю.В. Овчинников, Е.Е. Бойко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 308 с.

41) Овчинников, Ю.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.

42) 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.

43) Dorokhov, V.V. Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals / V.V.Dorokhov, G.V.Kuznetsov, G.S.Nyashina, P.A. Strizhak// Environmental Pollution (IF=6.792, Q1). 2021. 285. Article number 117390.

44) Nikitin, A.D. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels/ A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak // Science of the Total Environment (IF=6.551, Q1). 2021. V. 772. Article number 144909.

45) Nyashina, G.S. Effects of plant additives on the concentration of sulfur and nitrogen oxides in the combustion products of coal-water slurries containing petrochemicals/ G.S. Nyashina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Environmental Pollution (IF=6.792, Q1). 2020. 258. Article number 113682.

46) Akhmetshin, M.R. Comparative analysis of factors affecting differences in the concentrations of gaseous anthropogenic emissions from coal and slurry fuel combustion/ M.R. Akhmetshin, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // Fuel (IF=5.578, Q1). 2020. V. 270. Article number 117581.

47) Nyashina, G.S. Impact of micro-explosive atomization of fuel droplets on relative performance indicators of their combustion / G.S. Nyashina, K.Y. Vershinina, P.A. Strizhak // Fuel Processing Technology (IF=4.982, Q1). 2020. V. 201. Article number 106334.

48) Kurgankina, M.A. Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals/ M.A. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // Applied Thermal Engineering (IF=4.725, Q1). 2019. V. 147. P. 998-1008.

49) Nyashina, G.S. Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal/ G.S. Nyashina, K.Yu.Vershinina, M.A.Dmitrienko, P.A. Strizhak // Journal of Hazardous Material (IF=9.038, Q1). 2018. Vol. 347. P. 359-370.

50) Радзюк, А.Ю. Методы и средства подготовки водоугольной суспензии для теплотехнологических установок: дис.... Канд. техн. наук: 05.14.04/ Радзюк Александр Юрьевич. – Красноярск, 2005. – 128 с.

51) Мурко, В.И. Гидротранспортные топливно-энергетические комплексы / В.И. Мурко, А.К. Джундубаев, М.П. Баранова, А.И. Бейбосунов, В.А. Кулагин. – Красноярск: Сибирский федеральный университет. 2015. - 248 с.

52) Мурко, В.И. Получение стабильных бинарных топливных систем/ В.И. Мурко В.А. Кулагин, М.П. Баранова//Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии – 2017. – Т.10. - №8. - С. 985-992.

53) Джундубаев, А.К. Режимы течения топливных водоугольных суспензий в каналах распыливающих устройств / А.К. Джундубаев, М.С. Султаналиев, В.И. Мурко, Л.В. Кулагина, М.П. Баранова// Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии – 2018. – Т.11. - №2. - С. 242-249.

54) Murko, V.I. The intensification of the solid fuel grate-firing process /V.I. Murko, M.P. Baranova, I.I. Grishina// В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 2019. С. 012024.

55) Murko, V.I. The creation of a low-capacity boiler plant on coal-enrichment waste/ V.I. Murko, V.A. Khyamyalyainen, M.P. Baranova // В сборнике: 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", EastConf 2019. 2019. С. 8725397.

56) Kuznetsov, G.V. Numerical modeling of ignition of coal–water fuel particles/ G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov, S.V. Syrodoy Combust// Explos. Shock Waves 51 (2015) 409–415.

57) Kuznetsov, G.V. Influence of conditions of heat exchange on characteristics of ignition of coal–water fuel particles /G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov, S.V. Syrodoy //Therm. Eng. 62 (2015) 703–707.

58) Syrodoy, S.V. Influence of particle shape on the characteristics of ignition of hydrocarbon fuel /S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov// Solid Fuel Chemistry 49 (2015) 365–371.

59) Syrodoy, S.V. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment/ S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, A.V. Zhakharevich, N.Y. Gutareva, V.V. Salomatov// Combust. Flame 180 (2017) 196–206.

60) Frank-Kamenetskii, D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics/ D.A. Frank-Kamenetskii. – M.: Nauka, 1987.

61) Spalding, D.B. Combustion and mass transfer/ D.B. Spalding. –Elsevier, 1978.

62) Prationo, W. Influence of steam on ignition of Victorian brown coal particle stream in oxy-fuel combustion: in-situ diagnosis and transient ignition modeling/ W. Prationo, L. Zhang //Fuel 181 (2016) 1203–1213.

63) Zhang, W. Direct numerical simulation of ignition of a single particle freely moving in a uniform flow/ W. Zhang, H. Watanabe, T. Kitagaw// Adv. Powder Technol. 28 (2017) 2893–2902.

64) Salomatov, V. Effect of high-temperature gas flow on ignition of the water-coal fuel particles./ V.Salomatov, G.Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva// Combustion and Flame, 203, 375–385. doi:10.1016/j.combustflame.2019.02.025 (2019).

65) Баноидзе, П.А. Перевод жидкотопливных отопительных котельных на сжигание водоугольного топлива / П.А. Баноидзе, Б.Н. Белых, Е.Л. Власов и др.// Энергетик. – 1997. – №2. – С. 14-16.

66) Пузырев, Е.М. Использование вихревых топков для сжигания углей/ Е.М. Пузырев, М.А. Шарапов, А.М. Шарапов, К.С. Афанасьев // VI Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива». - 2006. - часть 2. - С. 212-216.

67) Технологии вихревого сжигания «ТОРНАДО», [Электронный ресурс] [sibpromnergo.ru>boiler/vih/tornado.html](http://sibpromnergo.ru>boiler/vih/tornado.html)

68) Алексеенко, С.В. Топочное устройство для сжигания водоугольного топлива / С.В. Алексеенко, Л.И. Мальцев, В.В. Саломатов, И.В. Кравченко, А.И. Кравченко, В.Е. Самборский // VII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива». - 2009. - часть 2. - С. 4-7.

69) Мальцев, Л.И. Пневматическая форсунка для распыливания ВУТ / Л.И. Мальцев, И.В. Кравченко, А.И. Кравченко, В.Е. Самборский// VII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива». - 2009. - часть 2. - С. 83-88.

70) Сенчурова, Ю.А. Совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках, автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Кемерово, 2008, 20 с. [Senchurova Yu.A. Improvement of the technology of combustion of coal-water fuel in vortex furnaces, abstract of dis. for the degree of Cand. tech. sciences. Kemerovo, 2008, 20 p.] (in Russian)

71) Мурко, В.И. Исследование механизма распыления и сжигания суспензионного водоугольного топлива (английский язык)/ В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенюк, И.М. Засыпкин, Ю.А. Сенчурова, А. Риестерер // Thermal Science, 2015, 19/1,243-251. [Murko V.I., Fedyaev V.I., Karpenok V.I., Zasypkin I.M.,

Senchurova Yu.A., Riesterer A. Investigation of the spraying mechanism and combustion of the suspended coal fuel. *Thermal Science*. - 2015.- 19 / 1.243-251.

72) Pinchuk V., Sharabura T.A., Moumane M., Kuzmin A. Experimental investigation of the influence of temperature, coal metamorphic stage, and of the size of coal–water fuel drop on the fuel drop combustion process. *Inter. J. Energy Clean Environ*, 2019, 20, 43–62.

73) Григорьев, И.С. Физические величины: Справочник. /И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов: М. Энергоатомиздат, - 1991. 1232с. [I.S. Grigorieva, E.Z. Meilikhova Physical quantities: Reference book. M., Energoatomizdat, 1991, 1232p.] (in Russian)

74) Крестовников, А.Н. Химическая термодинамика/ Крестовников, А.Н., Вигдорович В.Н. изд.2-е: М., «Металлургия», 1973. 566 с. [Krestovnikov A.N., Vigdorovich V.N. Chemical thermodynamics. 2nd ed., M., "Metallurgy", 1973, 566 p.] (in Russian)

75) Мурко, В.И. Результаты численного моделирования процесса сжигания водоугольного топлива / В.И. Мурко, А. Риестерер, С.А. Цецорина, В.И. Федяев, В.И. Карпенюк // Ползуновский Вестник.- 2011.- 2/1 С.230-234. [Murko V.I., Riesterer A., Tsetsorina S.A., Fedyayev V.I., Karpenok V.I. Results of numerical modeling of the process of combustion of water-coal fuel. *Polzunovskiy Vestnik*. – 2011. - 2/1. P. 230-234. (in Russian)

76) Мурко, В.И. Моделирование процесса распыления и сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий/ В.И. Мурко, В.И. Карпенюк, Ю.А. Сенчурова// Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: тез. докл. IX Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 2015, 99. [Murko V.I., Karpenok V.I., Senchurova Yu.A. Simulation of the process of spraying and combustion of finely dispersed coal-water suspensions. *Combustion of fuel: theory, experiment, applications: report at IX All-Russia. conf. with int. participation, Novosibirsk*. – 2015. – С. 99.

77) Введение в гидродинамику: учебно-методическое пособие / В.М. Ларионов, С.Е. Филиппов – Казань.: Физический факультет Казанского государственного университета, 2010. – 108 с.

78) Мурко, В.И. Физико-технические основы водоугольного топлива/ В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.А. Хямяляйнен. – Кемерово: Кузбассвуиздат. – 2009. – 195с.

79) Делягин, В.Н. Использование водоугольного топлива в тепловых процессах АПК/В.Н. Делягин, Н.М. Иванов, В.Я. Батищев, В.И. Бочаров, И.П. Щеглов, В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко// Ползуновский вестник. – 2011. – № 2-1. – С. 239-242.

80) Мурко, В.И. Сжигание водоугольного топлива в теплогенерирующих установках малой мощности / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко, Д.А. Дзюба, В.Н. Делягин. Н.М. Иванов, В.Я. Батищев // Ползуновский вестник. –2014. –№ 4-1. –С. 59-63.

81) Делягин, В.Н. Комплексная утилизация отходов с использованием теплоэнергетических установок / В.Н. Делягин, Н.М. Иванов, В.И. Мурко, В.И. Карпенко, Д.А. Черных // Достижения науки и техники АПК. – 2016. –Т. 30. –№ 4. –С. 83-86.

82) Мурко, В.И. Утилизация отходов углеобогащения на предприятиях по производству тепловой энергии / В.И. Мурко, В.И. Карпенко, Д.А. Черных, В.Н. Делягин, Н.М. Иванов // В сборнике: Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства. IV Международная научная экологическая конференция (с участием экологов Азербайджана, Армении, Беларуси, Германии, Грузии, Казахстана, Киргизии, Латвии, Ливана, Молдовы, Приднестровья, России, Словакии, Узбекистана и Украины). Редколлегия: Трубилин А. И., Шоба С. А., Коцаев А. Г., Шеуджен А. Х., Белюченко И. С., Гукалов В. Н., Смагин А. В., Радионов А. И., Терпелец В. И., Корунчикова В. В., Новопольцева Л. С., Выходцева Н. А. – 2015. – С. 612-617.

83) Мурко, В.И. Результаты испытаний экспериментального комплекса по приготовлению и сжиганию угольных топлив с очисткой дымовых газов /В.И.



Мурко, З.Р. Исмагилов, Е.С. Михайлова, В.А. Хямяляйнен, О.В. Тайлаков, В.П. Мастихина, В.И. Карпенюк// В книге: Углекислотная и экология Кузбасса. Сборник тезисов докладов. – 2017. – С. 40.

84) Мурко, В.И. Результаты сжигания суспензионного водоугольного топлива в котле типа «Теплотрон»/ В.И. Мурко, В.И. Федяев, Ю.Е. Прошунин, А.А. Почечуев, В.И. Карпенюк, В.А. Хямяляйнен// Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2018. – Т. 11. – № 5. – С. 560-566.

85) Карпенюк, В.И. Результаты промышленного опробования технологического комплекса по приготовлению и сжиганию суспензионного угольного топлива / В.И. Карпенюк, В.Ю. Красноперов, В.И. Мурко, В.Д. Снижко, А.П. Стариков, В.И. Федяев, В.Г. Харитонов //Сибирский уголь в XXI веке. – 2008. –№1. – С. 38.

86) Мурко, В.И. Разработка и создание технологического комплекса по сжиганию тонкодисперсных отходов углеобогащения в котельной ОАО «Междуречье» / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенюк, В.П. Мастихина, Х.Л. Айнетдинов, А.В. Яковенко, В.А. Бугров, П.С. Воскобойников // Уголь Кузбасса. – 2010. – №4. – С. 102.

87) Мурко, В.И. Результаты работы технологического комплекса по сжиганию тонкодисперсных отходов углеобогащения в котельной ОАО «Междуречье»/ В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенюк, В.П. Мастихина., Х.Л. Айнетдинов, А.В. Яковенко, В.А. Бугров, П.С. Воскобойников//Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2011.– № 1 (6). – С. 52-55.

88) Патент на изобретение RU 2678591 от 30.01.2019 «Способ деструкции органической массы угля и технологическая линия для его осуществления»

89) Патент на полезную модель RU 182807 от 04.09.2018 «Технологический комплекс для сушки углей с высоким выходом веществ преимущественно бурых углей»

90) Патент на полезную модель RU 177021 от 06.02.2018 «Котел»

- 91) Патент на полезную модель RU 168289 от 11.04.2016 «Котел для сжигания забалластированных высокосернистых угольных топлив»
- 92) Патент на полезную модель RU 173264 от 21.08.2017 «Вибромельница»
- 93) Патент на полезную модель RU 159508 от 10.02.2016 «Котел»
- 94) Патент на полезную модель RU 147336 от 10.11.2014 «Устройство для сжигания топлив»
- 95) Патент на полезную модель RU 117323 от 27.06.2012 «Вихревой пылеуловитель»
- 96) Патент на полезную модель RU 120648 от 27.09.2012 «Технологический корпус по переработке угля»
- 97) Патент на полезную модель RU 120649 от 27.09.2012 «Технологический комплекс по получению суспензионного угольного топлива»
- 98) Патент на полезную модель RU 105417 от 10.06.2011 «Теплогенератор»
- 99) Патент на полезную модель RU 109136 от 10.10.2011 «Технологический комплекс для приготовления суспензионного угольного топлива на основе угольных шламов»
- 100) Патент на полезную модель RU 109529 от 20.10.2011 «Форсунка»
- 101) Патент на полезную модель RU 109831 от 27.10.2011 «Форсунка»
- 102) Патент на полезную модель RU 91885 от 10.03.2010 «Фильтр для очистки высоковлажных жидкостей»
- 103) Патент на полезную модель RU 92156 от 10.03.2010 «Теплогенератор с вихревой топкой для сжигания суспензионного угольного топлива»
- 104) Патент на полезную модель RU 93032 от 20.04.2010 «Котлоагрегат для сжигания угольного топлива»
- 105) Патент на полезную модель RU 93033 от 20.04.2010 «Котлоагрегат для сжигания суспензионного угольного топлива»
- 106) Патент на полезную модель RU 96860 от 20.08.2010 «Технологический комплекс по переработке угольных шламов»

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ОАО «шахта Заречная»



Харитонов В.Г.

УТВЕРЖДАЮ  
ген. директор ЗАО «НПП Сибэкотехника»



Федяев В.И.

### А К Т

Комплексного опробования котла Е 1-9  
при работе на водоугольном топливе

г. Полысаево

17 сентября 2007

Комиссия в составе:  
от ОАО «Шахта Заречная»

Дворниченко В.В.  
Апарин А.Ф.

заместитель главного энергетика  
начальник котельной

от ЗАО «НПП Сибэкотехника»

Карпенко В.И.  
Красноперов В.Ю.

директор по производству  
начальник экспериментального участка,

настоящим актом подтверждают, что после пусконаладочных работ на котле Е 1-9 летней котельной ОАО «шахта Заречная», переведенном на сжигание водоугольного топлива в соответствии с договором от 22 апреля 2005 г, было проведено комплексное опробование оборудования продолжительностью 72 часа. Розжиг котла был осуществлен 11 сентября в 12 часов. После этого была остановлена котельная КМТ и теплоснабжение обеспечивалось котлом Е 1-9, работающим на водоугольном топливе (ВУТ).

При работе в период комплексного опробования в качестве основы для приготовления топлива использовался кек с пресс-фильтров обогатительной фабрики ОАО «шахта Заречная». Топливо готовилось на участке приготовления ВУТ путем смешивания кека, воды и стабилизирующих добавок. Приготовленное топливо представляло собой суспензию с содержанием твердой фазы не менее 58% по массе с зольностью 26.6 – 29%. Участок приготовления является одним из звеньев технологической цепи летней котельной с котлом Е 1-9. Приготовление ВУТ осуществлялось в дневное время с накоплением приготовленного топлива в аккумулирующей емкости. В процессе приготовления и сжигания топлива было задействовано всё технологическое оборудование, предусмотренное проектом.

Комиссия отмечает, что в течение 72 часов, пока продолжалось комплексное опробование оборудования, горячая вода в баки – аккумуляторы горячей воды поступала только от котла Е 1-9, работающего на ВУТ. Перебоев в теплоснабжении не наблюдалось. Температура в баках-аккумуляторах горячей воды изменялась от 60<sup>0</sup>С в периоды интенсивного разбора тепла и разбавления холодной водой до 82<sup>0</sup>С в периоды минимального теплопотребления.

Режимы работы котла в период комплексного опробования находились в пределах, обозначенных в ориентировочной режимной карте.

параметр	минимально	максимально
Теплопроизводительность, Гкал/ч	0.50	0.58
Температура воды на входе, <sup>0</sup> С	60	82
Температура воды на выходе, <sup>0</sup> С	80	104
Расход воды через котел, куб.м/ч	26.56	26.56
Расход топлива, л/час (кг/ч)	120 (144)	150 (180)
Температура в контрольной зоне топки, <sup>0</sup> С	720	790
Температура отходящих газов, <sup>0</sup> С	120	135

Работа котла была остановлена 14 сентября в 12 час 30 мин в соответствии с программой комплексного опробования.

На основании вышеизложенного комиссия решила:

1 Комплексное опробование проведено в полном объеме в соответствии с программой испытаний.

2. Разработанная технология приготовления ВУТ обеспечивает получение стабильного водоугольного топлива со следующими характеристиками:

массовая доля твердой фазы 58 – 60%

зольность твердой фазы 26.6—29%

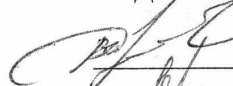

эффективная вязкость при скорости сдвига  $81 \text{ с}^{-1}$  не более  $800 \text{ мПа}\cdot\text{с}$

3. Теплопроизводительность котла Е 1-9 , переведенного на сжигание ВУТ составляет  $0.50 - 0.58 \text{ Гкал/ч}$  при расходе топлива  $120 - 130 \text{ л/ч}$ , что обеспечивает необходимое теплотребление.

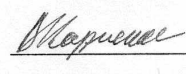
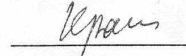
4. Принятие котла с топкой ВУТ в постоянную эксплуатацию возможно при условии устранения следующих замечаний:

- площадку для приема шлама оборудовать твердым покрытием
- разработать мероприятия по обеспечению золоулавливания и золоудаления
- теплоизолировать наружную поверхность топки
- разработать мероприятия по возможности устойчивой работы котла на пониженных режимах
- установить общий шибер на систему вторичного дутья
- отрегулировать работу компрессорной станции с возможностью работы одного компрессора
- оборудовать помещение котельной системой вентиляции

ПОДПИСИ: от Заказчика

  
Дворниченко В.В.  
  
Апарин А.Ф.

от Исполнителя

  
Карпенко В. И.  
  
Красноперов В.Ю.

**УТВЕРЖДАЮ:**  
 Генеральный директор  
 ЗАО НПП «Сибэкотехника»  
 г. Новокузнецк  
 Федяев В.И.



**УТВЕРЖДАЮ:**  
 Генеральный директор  
 ОАО «Междуречье»  
 г. Междуреченск  
 Жилин В.П.



промышленных испытаний сжигания водоугольного топлива (ВУТ),  
 приготовленного из фильтр-кека ОФ «Междуречье»,  
 на котле ДКВР-10-13 котельной ОАО «Междуречье».

г. Междуреченск

29.01.2010г.

Комиссия в составе:

от **ЗАО НПП «Сибэкотехника»**

Директор по науке

Мурко В.И.

Директор по производству

Карпенко В.И.

Технический директор

Звягин В.Н.

Зав. углехимической лабораторией

Павлова Т.М.

от **ОАО «Междуречье»**

Директор ЭДМ

Айнетдинов Х.Л.

Главный энергетик

Яковенко А.В.

Начальник УПК

Бугров В.А.

Механик УПК

Воскобойников П.С.

от **ООО НПП «Котельно-промышленная компания»**

Директор

Климов Г.А.

от **ООО «СКБ Проэнергомаш»**

Главный инженер

Афанасьев К.С.

Конструктор

Пузырев М.Е.

с 14.01.2010г. по 29.01.2010г. провела промышленные испытания процессов приготовления водоугольного топлива (ВУТ) из фильтр-кека ОФ «Междуречье», транспортирования ВУТ от установки приготовления до



участка хранения и сжигания полученного ВУТ в котле ДКВР-10-13 котельной ОАО «Междуречье».

Работы проводились в соответствии с Договором подряда №3/6/2009/246/09 от 30.07.2009г.

Разработка рабочей и проектной документации по реконструкции котла выполнена ООО «СКБ Проэнергомаш» г. Барнаул.

Строительно-монтажные и пусконаладочные работы произведены ООО НПП «Котельно-промышленная компания» г. Бийск.

Установка приготовления ВУТ включает в себя:

- шнековый питатель фильтр-кека,
- реактор смеситель ДС – 2,
- установку приготовления реагента-пластификатора,
- дозатор реагента-пластификатора,
- фильтр грубой очистки,
- зумпф,
- емкости хранения ВУТ по 10м<sup>3</sup> – 2 шт.,
- шланговые насосы перекачки ВУТ НП – 50 – 2шт.

Участок хранения и подачи ВУТ включает в себя:

- аккумулирующую емкость вместимостью 50м<sup>3</sup>,
- перестальтические насосы НП – 50 – 2шт,
- винтовые насосы – 2шт.,
- фильтры тонкой очистки – 2шт,
- трубопроводы подачи ВУТ к котлу.

Приготовление ВУТ производится из фильтр-кека, который подается на установку приготовления ВУТ непосредственно с ленточного конвейера фабрики. Конвейер подает фильтр-кек на шнековый питатель-дозатор, который загружает его в смеситель ДС – 2. Одновременно с фильтр-кеком в смеситель дозировано подается раствор реагента-пластификатора. После перемешивания готовое ВУТ разгружается на фильтр грубой очистки, подрешетный продукт которого поступает в зумпф, а затем насосами НП - 50



перекачивается в аккумулирующие емкости. Надрешетный продукт собирается в емкость для отходов.

Транспортирование ВУТ до участка хранения производится автотранспортом (машина с емкостью м<sup>3</sup>). Закачивание ВУТ в автоцистерну на установке приготовления осуществляется шланговыми насосами НП-50. На участке хранения разгрузка автоцистерны осуществляется насосами НП – 50 в расходную емкость V = 50 м<sup>3</sup>.

Характеристики партий полученных ВУТ представлены в таблице № 1.

Таблица № 1 Характеристика ВУТ приготовленного из фильтр-кека в период с 28.12.2009г. по 29.01.2010г.

Дата	Массовая доля тв. фазы, %	Зольность А, %	Гранулометрический состав вещества, в %						Эф. вязкость мПа·С	Низшая теплота сгорания Q <sub>н</sub> ккал/кг
			+1,6 мм	0,63-1,6	0,355-0,63	0,250-0,355	0,071-0,250	- 0,071		
28.12.09г.	55,0	56,6	1,4	4,4	3,8	3,3	19,4	67,2	415	1530
14.01.10г.	51,3	53,3	—	1,5	1,6	1,7	16,9	78,3	326	1463
18.01.10г.	50,6	50,0	—	1,2	1,2	1,9	19,0	76,7	711	1604
19.01.10г.	55,0	45,1	—	0,5	1,6	2,8	22,4	72,7	825	2024
25.01.10г.	53,7	43,3	—	0,4	1,4	2,1	22,9	73,2	593	2035
29.01.10г.	49,6	52,8	—	0,3	1,3	2,4	21,1	74,9	518	1478

Массовая доля твердой фазы существенно зависит от содержания влаги в исходном материале - фильтр-кеке (содержание влаги в фильтр-кеке в период испытаний составляло 42-48%).

Для сжигания ВУТ был модернизирован котёл ДКВР-10-13.

При реконструкции были установлены:

- вихревая топка с системой раздачи дутья и газовыпускным водоохлаждаемым окном,
- 4 форсунки для подачи распыления ВУТ в топку,
- выгрузатель шлака с шурующей планкой,
- питатель топлива (угля).

За котлом установлен воздухоподогреватель ВП-160. Для распыления ВУТ сжатым воздухом смонтирована компрессорная установка.

Первоначально производилась растопка котла на угле с использованием топки с шурующей планкой и прогрев камеры сжигания при  $t^{\circ}$  600-800 $^{\circ}$ C в течение 3-4 часов. Затем подавалось ВУТ с постепенным снижением количества подаваемого угля. Достигнуто устойчивое горение ВУТ при  $t^{\circ}$  950-1100 $^{\circ}$ C с подсветкой от сжигаемого угля.

Пробное сжигание в течение 1 часа осуществлено 14.01.2010г.

В дальнейшем в период с 15.01.2010г. по 29.01.2010г. производилась работа котла на ВУТ продолжительностью от 15 до 22 часов. Остановки котла были связаны с устранением технических неполадок.

Результаты сжигания ВУТ на котле ДКВР-10-13 представлены в таблице № 2.

Таблица № 2 - Результаты сжигания водоугольного топлива (ВУТ), приготовленного из фильтр-кека на котле ДКВР-10-13 котельной ОАО «Междуречье» в период с 27.01.2010г. по 29.01.2010г.

№ п/п	Наименование параметра	Ед-ца изм.	Числовое значение	
			работа котла на угле (розжиг)	совместное сжигание ВУТ и угля
1.	Время работы	час	3	22
2.	Расход угля:			
	- удельный	кг/ч	309	249
	- общий	кг	998	5478
3.	Расход ВУТ			
	- удельный	кг/ч	-	1540
	- общий	кг	-	33880
4.	Низшая теплота сгорания $Q_i$	ккал/кг	5000	1500
5.	Паропроизводительность котла	т/ч	2,2	5,3
	(в т.ч. на угле на ВУТ)			(1,9 3,4)
6.	Давление пара	атм.	3,5	4,5 - 5,0
7.	Количество форсунок ВУТ	шт	—	2
8.	Давление сжатого воздуха	атм.	—	3,5 – 4,0
9.	Давление ВУТ (в магистрале)	атм.	—	5 - 5,5
10.	Температура в камере сжигания	°С	600-800	950-1100
	Температура за газовыпускным окном	°С	300-400	600-700



## ВЫВОДЫ:

1. Монтаж оборудования технологического комплекса по подготовке, хранению, подачи и сжиганию ВУТ на основе фильтр-кека выполнен в соответствии с проектом в полном объеме.

2. Участок приготовления ВУТ обеспечивает заданную проектом производительность, при этом качество приготавливаемого топлива существенно зависит от характеристик исходного фильтр-кека. В результате низшая теплота сгорания ВУТ в среднем составляет 1400-2000 ккал/кг, что меньше проектного значения (2170 ккал/кг).

3. Доставка ВУТ автотранспортом, прием, хранение и подача топлива в котёл производится в соответствии с проектом.

4. Сжигание ВУТ в котле обеспечивается при совместной подаче угля и водоугольного топлива. Степень замещения угля ВУТ оценивается около 50%.

5. По результатам проведенных промышленных испытаний выявлены следующие замечания:

- повышенные значения влажности и зольности исходного сырья фильтр-кека,
- неконтролируемое попадание технической воды в узел приготовления ВУТ из технологии фабрики,
- не обеспечивается необходимый расход сжатого воздуха на распыление ВУТ,
- повышенный износ внутренней поверхности камеры смешения форсунок,
- не отработан режим работы шурующей планки и шлаковыгрузателя,
- не обеспечена надежная работа смотрового люка с фронта котла и шиберов воздухопроводов,
- подсосы воздуха через люк, питатель, гидрозатвор.

**РЕКОМЕНДАЦИИ:**

1. Совместно с ОФ «Междуречье» рассмотреть техническую возможность снижения влажности фильтр-кека.
2. Рассмотреть возможность приобретения компрессорной установки с требуемыми параметрами сжатого воздуха.
3. Отработать режимы работы топки с шурующей планкой и шлаковыгрузателем при сжигании угля.
4. Произвести инструментальный замер расхода дутьевого воздуха и угля при сжигании ВУТ.
5. Заменить смотровой люк на фронте котла.
6. Обеспечить снижение износа внутренней поверхности камеры смещения форсунок.
7. Принять меры по снижению подсосов воздуха.



Мурко В.И.



Карпенко В.И.



Звягин В.Н.



Павлова Т.М.



Айнетдинов Х.Л.



Яковенко А.В.

Бугров В.А.



Воскобойников П.С.



Климов Г.А.



Афанасьев К.С.



Пузырев М.Е.

Рекомендовать на серийное производство.

### 9. Выводы

9.1. Горелочное устройство с пневмомеханической форсункой выдержало испытания по программе и методике.

9.2. Горелочное устройство с пневмомеханической форсункой соответствует требованиям технического задания.

Испытания проводили:

Начальник ОПШ



В.О. Дмитриев

Проректор по научной работе и инновационному развитию  
СибГИУ



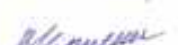
Л.П. Мышленев

Руководитель лаборатории ЭТнК



В.И. Мурко

Старший научный сотрудник лаборатории ЭТнК



В.И. Карпенюк

Старший научный сотрудник лаборатории ЭТнК



В.И. Федеев



УТВЕРЖДАЮ  
 Генеральный директор  
 ООО «Объединенная компания  
 «Сибшахтострой» А.А. Ивушкин  
 «16» декабря 2011г.

**АКТ**  
**приемочных испытаний**  
**опытного образца горелочного устройства с пневмомеханической форсункой**

Договор от «22» октября 2010 г. № 322/2010

«16» декабря 2011г.

г. Новокузнецк

Для проведения приемочных испытаний опытных образцов компонентов АЭГК по договору от «22» октября 2010г. №322/2010 на выполнение научно-исследовательских работ по теме «Разработка научно-технических основ для создания технологии подготовки и сжигания суспензионного угольного топлива, приготовленного на основе отходов углеобогащения и пилотного образца автоматизированного энергетического комплекса» комиссия в составе:

Председатель	- технический директор ООО «ОК «Сибшахтострой» К.Г. Венгер
Зам. председателя	- ректор СибГИУ С.П. Мочалов
Члены комиссии:	
	<i>от ООО «ОК «Сибшахтострой»</i>
	- начальник ОПП В.О. Дмитриев
	<i>от СибГИУ</i>
	- проректор по научной работе и инновационному развитию Л.П. Мышляев
	- руководитель лаборатории ЭТиК В.И. Мурко
	- старший научный сотрудник В.И. Федяев
	- старший научный сотрудник В.И. Карпенко
	<i>от ООО «Сибирский завод металлических конструкций»</i>
	- технический директор А.П. Старчиков

рассмотрела результаты приемочных испытаний опытного образца горелочного устройства с пневмомеханической форсункой ГУ 0.000, заводской № 2011-374-ГУ 12, в экспериментальной лаборатории СибГИУ.

1. Комиссией установлено:

1.1. Программа приемочных испытаний выполнена полностью.





1.2. Горелочное устройство с пневмомеханической форсункой ГУ 0.000 и его техническая документация выдержали приемочные испытания.

2. Выводы

2.1. Объект испытаний соответствует всем требованиям, заданным техническим заданием.

2.2. Техническая документация на объект испытаний в техническом и патентно-правовом аспекте пригодна для постановки на производство и последующей реализации продукции.

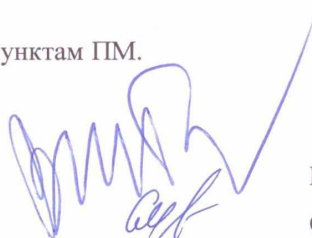
3. Замечания и рекомендации

3.1. Присвоить рабочей (конструкторской и технологической) документации литеру «О».

3.2. Согласовать технические условия на горелочное устройство с пневмомеханической форсункой.

Приложение: Протокол испытаний по пунктам ПМ.

Председатель

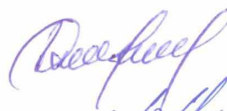


К.Г. Венгер

Зам. председателя

С.П. Мочалов

Члены комиссии:



В.О. Дмитриев



Л.П. Мышляев



В.И. Мурко



В.И. Федяев



В.И. Карпенюк



А.П. Старчиков



**Кемеровская региональная общественная организация  
«Научно-инновационный центр «СИБИРЬ»**

654000, Кемеровская область, г.Новокузнецк, пр.Бардина, 2, оф. 521.  
[www.sibinnovation.ru](http://www.sibinnovation.ru) Тел./факс: 8(3843) 390-812.

05 ноября 2014г.

№ 01/11-2014

Главе города  
Кузнецову С.Н.

**Отчет**

о поездке в г. Черепаново (Новосибирская область) 29.10.2014г.  
для ознакомления с результатами промышленного внедрения  
технологии сжигания водоугольного топлива,  
приготовленного на основе угольных шламов и отходов углеобогащения

В состав рабочей группы, командированной в г. Черепаново для ознакомления с результатами промышленного внедрения технологии сжигания экологически чистого водоугольного топлива (ВУТ), приготовленного на основе угольных шламов и отходов углеобогащения, входили:

1. Гусев Игорь Михайлович, начальник управления промышленности Администрации г. Новокузнецка.
2. Хасанов Дамир Зиятдинович, начальник производственно-технического отдела Сибирской Сбытовой Компании.
3. Ордин Максим Витальевич, ведущий инженер производственно-технического отдела Сибирской Сбытовой Компании.
4. Козлов Андрей Сергеевич, начальник котельного цеха ТЭЦ Центральная (КМК).
5. Мурко Василий Иванович, директор по научной работе ЗАО НПП «Сибэкотехника», член Экспертного совета при Главе города по инновационному развитию промышленности, доктор технических наук, профессор КузГТУ.
6. Прошунин Юрий Евгеньевич, директор ООО «Энергоресурс», председатель Экспертного совета при Главе города по инновационному развитию промышленности, доктор технических наук.

**Цель командировки:** ознакомление с действующими технологиями приготовления и сжигания ВУТ, оценка стабильности процесса горения ВУТ без подачи дополни-

тельного топлива (природного газа, мазута и т.д.), оценка эффективности работы технологического комплекса по приготовлению и сжиганию ВУТ, предварительные выводы о перспективности технологии сжигания ВУТ, приготовленного на основе угольных шламов и отходов углеобогащения, а также о возможности и целесообразности реализации данной технологии на теплогенерирующих комплексах в г. Новокузнецке.

### **Место расположения**

Технологический комплекс по приготовлению и сжиганию ВУТ территориально расположен в г. Черепаново Новосибирской области в 109 км к югу от г. Новосибирска. Разработка и проектирование комплекса, авторский надзор монтажных и пусконаладочных работ выполнены ЗАО НПП «Сибэкотехника» (г. Новокузнецк) по договору с ООО «Объединенная сервисная компания» (г. Новосибирск), занимающимся генерированием и поставкой тепловой энергии различным потребителям.

### **Технология приготовления и сжигания ВУТ. Схема цепи аппаратов**

Схема цепи аппаратов технологического комплекса приведена на рисунке 1.

Технологический комплекс по приготовлению и сжиганию ВУТ размещен в существующем здании. В качестве сырья для приготовления ВУТ использовались угольные шламы и отходы углеобогащения (фильтр-кек) ОФ «Щедрухинская», ЦОФ «Абашевская» и ОФ «Барзасское товарищество». Угольные шламы первых двух обогатительных фабрик могут явиться потенциальным сырьем для котельных и ТЭЦ г. Новокузнецка, что придает особую значимость проводимым работам.

Исходный продукт доставляется автотранспортом на площадку складирования, затем загружается в скип смесителя, куда одновременно с ним подается водный раствор реагента-пластификатора. После смешивания в смесителе полученная суспензия разгружается в приемный зумпф, откуда насосом направляется в вибромельницу на дополнительное перемешивание и доизмельчение.

После мельницы готовое топливо самотеком поступает в зумпф, откуда насосом направляется в расходно-аккумулирующие емкости. При крупности частиц в исходном материале менее 500 мкм полученное в смесителе суспензионное водоугольное топливо сразу перекачивается в расходно-аккумулирующие емкости.





Водоугольное топливо из расходно-аккумулирующих емкостей насосом с регулируемым приводом через фильтр тонкой очистки подается на сжигание через форсунки в топку котла. Для распыления ВУТ в топку используется сжатый воздух от компрессорной станции.

Проектная теплопроизводительность котла составляет 0,8МВт, расчетный КПД - не менее 80%.

Следует отметить, что вследствие недостаточности финансирования заказчиком, часть оборудования пока не смонтирована: не установлен золоуловитель перед дымовой трубой, присутствует операция ручной загрузки угольных шламов (или других отходов) в скип смесителя. Тем не менее, в существующем виде комплекс работоспособен, и имеется возможность предварительной оценки надежности и перспективности используемой технологии.

В ходе наблюдений установлено, что приготовленное топливо обладает седиментационной устойчивостью и необходимой текучестью, процесс горения ВУТ стабилен без подачи дополнительного топлива (природного газа, мазута и т.д.).

#### **Оценка эффективности работы технологического комплекса по приготовлению и сжиганию ВУТ**

В процессе эксплуатации комплекса зафиксированы следующие технологические параметры.

№	Технологический параметр	Значение
1	Расход ВУТ	200 л/ч или 240 кг/ч
2	Давление ВУТ	0,24 МПа
3	Давление воздуха	0,25 МПа
4	Расход теплоносителя (воды)	51,7 м <sup>3</sup> /ч
5	Разница температур теплоносителя (подача-обратка)	15 °С
6	Температура входящих в котел газов	843 °С
7	Температура газов в топке	1072 °С
8	Температура дымовых газов	175 °С

Нижшая теплота сгорания ВУТ при массовой доле твердой фазы 60,5% - 15,07 МДж/кг (3600 ккал/кг).

Из приведенных данных следует, что полезная тепловая мощность комплекса на момент наблюдения составила 0,9 МВт при проектной 0,8 МВт. При этом КПД работы котла составил 89,8%. В расчете учтены потери тепла комплекса в окружающую среду и с дымовыми газами. Высокое значение КПД (практически на уровне газовых котлов)

может быть объяснено применением высокоэффективной вихревой системы сжигания тонкодисперсного топлива, при которой существенно снижены механический и химический недожог топлива. Конечно, указанные данные носят предварительный характер и нуждаются в дальнейшем уточнении.

В целом, после ознакомления специалистов рабочей группы с действующими технологиями приготовления и сжигания ВУТ можно сделать следующие выводы:

1. Аппаратурное оформление процесса сжигания ВУТ обеспечивает стабильность технологии получения тепла без подачи дополнительного топлива.

2. На момент наблюдения достигнуты весьма впечатляющие технологические показатели процесса получения тепловой энергии на основе сжигания ВУТ: тепловая мощность комплекса составила 0,9 МВт при КПД = 89,8%. Указанные характеристики должны быть уточнены в ходе дальнейшей эксплуатации на различных видах исходного сырья. Для получения исчерпывающей информации о промышленной реализации процесса сжигания ВУТ рекомендовать специалистам Сибирской сбытовой компании, ТЭЦ «Центральная», управления промышленности и экологической службы Администрации г. Новокузнецка ознакомиться с опытом разработки и эксплуатации промышленных установок приготовления и сжигания ВУТ на основе научно-технической документации (отчеты о проведении пуско-наладочных работ и экологических исследований, выполненных ведущими специализированными организациями России на Беловской ГРЭС и ТЭЦ №5 г. Новосибирска, которые находятся в архиве ЗАО НПП "Сибэкотехника").

3. Представляется целесообразным рассмотреть возможность снижения стоимости вырабатываемой тепловой энергии в г. Новокузнецке путем организации процесса сжигания водоугольного топлива на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения (кека) углеобогажительных фабрик вследствие: относительной дешевизны топлива (другими способами данное сырье практически невозможно переработать, и его просто вывозят в отвалы), доступности сырья из-за расположения вблизи города нескольких углеобогажительных фабрик, экологической чистоты процесса сжигания ВУТ по сравнению со сжиганием пылеугольного топлива или слоевым сжиганием рядового и сортированного углей.

4. Рекомендовать Администрации г. Новокузнецка принять решение о переводе отопительного котла одной из муниципальных котельных г. Новокузнецка на сжигание ВУТ. ЗАО НПП «Сибэкотехника» готово в течение двух недель представить предложе-



ние с указанием сроков и перечня работ, необходимого финансирования для реконструкции котла в объеме, необходимом для дальнейшей постоянной эксплуатации агрегата в рабочем режиме на ВУТ. В дальнейшем может быть принято решение о целесообразности последующего внедрения данной технологии на других энергетических объектах города.

Гусев И.М.

с возражениями  
по п. 4. см. ниже

Хасанов Д.З.

Козлов А.С.

Мурко В.И.

Прошнин Ю.Е.




п. 4. Администрация «Новокузнецк» рассмотреть вопрос о переводе энергетического котла одной из коммунальной котельной с определенным объемом финансирования.

Д.З. Хасанов





## КУЗБАССКАЯ ЯРМАРКА

 Всемирная ассоциация выставочной индустрии  
 Российский союз выставок и ярмарок  
 Кузбасская торгово-промышленная палата

# ДИПЛОМ БРОНЗОВАЯ МЕДАЛЬ

НАГРАЖДАЕТСЯ

**ООО НПЦ «Сибэкотехника», СибГИУ,  
 КузГТУ, институт угля СО РАН,  
 ООО «ПРОЭНЕРГОМАШ»,  
 ООО УГК «Энергетика», СООО «МИРАТ»  
 ООО «Завод ГИДРОМАШ»**

*за цифровую мини ТЭЦ,  
 работающую на отходах углеобогащения  
 представленную на конкурс «Лучший экспонат»,  
 проводимый в рамках XXVI Международной  
 специализированной выставки*

**«УГОЛЬ РОССИИ И МАЙНИНГ»,  
 «ОХРАНА, БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»,  
 «НЕДРА РОССИИ»**

**(4-7 июня 2019 г.)**

Генеральный директор  
 ВК «Кузбасская ярмарка»

В.В. Табачников

г. Новокузнецк  
 2019 г.



## КУЗБАССКАЯ ЯРМАРКА

Ufi Всемирная ассоциация выставочной индустрии

Российский союз выставок и ярмарок

Кузбасская торгово-промышленная палата

# ДИПЛОМ ЗОЛОТАЯ МЕДАЛЬ

НАГРАЖДАЕТСЯ

**ООО НПЦ «Сибэкотехника», СибГИУ,  
ООО «СибНИИУглеобогащение»  
(филиал в г. Прокопьевске),  
КузГТУ, институт угля СО РАН,  
ООО «ПРОЭНЕРГОМАШ»**

*за разработку и создание автоматизированной  
мини ТЭЦ на отходах углеобогащения  
(авторы: Мурко В.И., Темлянцев М.В.,  
Волков М.А., Тайлаков О.В., Пузырева Е.М.)*

*представленной на конкурс «Лучший экспонат»,  
проводимый в рамках*

**VIII ФОРУМА ПРЕДПРИНИМАТЕЛЕЙ И ПРОМЫШЛЕННИКОВ**

**(20-22 ноября 2019 г.)**

Генеральный директор  
ВК «Кузбасская ярмарка»

В.В. Табачников

г. Новокузнецк





## КУЗБАССКАЯ ЯРМАРКА

 **Всемирная ассоциация выставочной индустрии**

 **Российский союз выставок ярмарок**

 **Кузбасская торгово-промышленная палата**

# ДИПЛОМ

## ГРАН-ПРИ

НАГРАЖДАЕТСЯ

**ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
индустриальный университет»,  
ООО «НПЦ «Сибэкотехника»,  
ООО «Завод-Гидромаш»**

*за технологический комплекс по частичной замене  
пылеугольного топлива на ТЭЦ (ГРЭС)  
водоугольным топливом из угольных шламов  
(авторы: Мурко В.И., к.э.н., Черникова О.П.,  
Федяев В.И., Карпенко В.И., Бугров В.С.)*

*представленный на конкурс «Лучший экспонат»,  
проводимый в рамках XXIX Международной  
специализированной выставки*

**«УГОЛЬ РОССИИ И МАЙНИНГ», «ОХРАНА, БЕЗОПАСНОСТЬ  
ТРУДА И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ», «НЕДРА РОССИИ»**

**(1-4 июня 2021 г.)**

Генеральный директор  
ВК «Кузбасская ярмарка»

В.В. Табачников

г. Новокузнецк  
2021 г.



## КУЗБАССКАЯ ЯРМАРКА



Всемирная ассоциация выставочной индустрии



Российский союз выставок ярмарок



Кузбасская торгово-промышленная палата

# ДИПЛОМ СЕРЕБРЯНАЯ МЕДАЛЬ

НАГРАЖДАЕТСЯ

**ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
индустриальный университет»,  
ООО НПП «Архимед», ФГБОУ ВО «Кузбасский  
государственный технический  
университет им Т.Ф. Горбачева»,  
ООО «НПЦ «Сибэкотехника»**

за установку приготовления и подачи топливных присадок  
для повышения эффективности сжигания углей  
(авторы: Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И.,  
Трошин Е.П., Хамялайнен В.А.)

представленную на конкурс «Лучший экспонат»,  
проводимый в рамках XXIX Международной  
специализированной выставки

«УГОЛЬ РОССИИ И МАЙНИНГ»,  
«ОХРАНА, БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»,

«НЕДРА РОССИИ»

(1-4 июня 2021 г.)

Генеральный директор  
ВК «Кузбасская ярмарка»

В.В. Табачников

г. Новокузнецк  
2021 г.