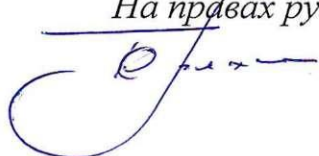


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова»

На правах рукописи


Терехин Алексей Павлович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ
ОБЛАСТИ ПУТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ
КОТЛОАГРЕГАТОВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ**

2.4.5 Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Марьяндышев Павел Андреевич,

Доктор технических наук, доцент

Архангельск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КОТЛОАГРЕГАТОВ СЖИГАЮЩИХ ОСАДОК СТОЧНЫХ ВОД И КОРОДРЕВЕСНОЕ ТОПЛИВО	14
1.1 Влияние энергетической эффективности сжигания осадка сточных вод и кородревесного топлива на энергосистему	14
1.2 Энергетическое использование осадка сточных вод.....	16
1.3 Энергетическое использование кородревесного топлива	17
1.4 Повышение энергетической ценности биотоплива с помощью термохимического преобразования биомассы.....	18
1.5 Повышение энергетической ценности биотоплива с помощью гранулирования	19
1.6 Сжигание биомассы в кипящем слое	20
Выводы по главе 1	23
ГЛАВА 2. КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД И КОРОДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА.....	25
2.1 Доля осадка сточных вод и кородревесного топлива в энергобалансе Архангельского ЦБК и региона.....	25
2.2 Теплотехнические и элементные характеристики кородревесного топлива и осадка сточных вод	26
2.3 Рентгенофлуоресцентный анализ кородревесного топлива и осадка сточных вод.....	28
2.4 Термический анализ осадка сточных вод и кородревесного топлива.....	30
2.5 Микроскопические исследования осадка сточных вод.....	40
2.6 Газохроматографический анализ кородревесного топлива и осадка сточных вод.....	44
Выводы по главе 2.....	51

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КОТЛОАГРЕГАТОВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ.....	53
3.1 Теплотехнические показатели кородревесного топлива и осадка сточных вод во время исследования котельных агрегатов	54
3.2 Паровой котел Е-75,39-440 ДФТ	56
3.2.1 Результаты исследования работы котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании лиственного кородревесного топлива с осадком сточных вод	57
3.2.2 Результаты исследования работы котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании хвойного кородревесного топлива с осадком сточных вод.....	60
3.2.3 Результаты комплексного исследования котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании лиственного кородревесного топлива с осадком сточных вод.....	64
3.3 Паровой котел КМ-75-40.....	70
3.3.1 Результаты исследования работы котельного агрегата КМ75-40 при сжигании лиственного кородревесного топлива с осадком сточных вод.....	71
3.3.2 Результаты исследования работы котельного агрегата КМ75-40 при сжигании хвойного кородревесного топлива с осадком сточных вод	75
3.4 Паровой котел Е-83,5-9,8-540 ДФ	77
3.4.1 Результаты исследования работы котельного агрегата Е-83,5-9,8-540 ДФ при сжигании кородревесного топлива с осадком сточных вод.....	78
3.4.2 Результаты комплексного исследования работы котельного агрегата Е-83,5-9,8-540 ДФ при сжигании кородревесного топлива с осадком сточных вод	81
3.5 Экологические показатели работы котельных агрегатов с кипящим слоем	91
3.6 Технические мероприятия, направленные на увеличение энергетической эффективности работы котельных агрегатов с кипящим слоем.....	93
Выводы по главе 3.....	94
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ МАТЕРИАЛА КИПЯЩЕГО СЛОЯ	95

4.1 Работа котельного агрегата	95
4.2 Отбор проб кородревесного топлива и осадка сточных вод	96
4.3 Визуальный контроль кипящего слоя	99
4.4 Гранулометрический анализ частиц материала слоя и скорость его псевдооживления	102
4.5 Рентгенофлуоресцентный анализ донной золы	105
4.6 РФА агломератов	109
4.7 Параметры работы кипящего слоя	110
4.8 Сравнительный анализ	113
4.9 Исключение агломерации материала слоя с помощью снижения температуры кипящего слоя и увеличения расхода первичного воздуха	114
4.10 Микроскопические исследования агломератов	118
4.11 Материальный баланс оксида калия в кипящем слое	121
4.12 Рекомендации по исключению агломерации материала кипящего слоя с частицами топливной золы	122
4.13 Техничко-экономическая оценка технических решений, направленных на исключение агломерации в материале кипящего слоя	124
Выводы по главе 4	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	130
ПРИЛОЖЕНИЕ А	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	149

ВВЕДЕНИЕ

Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, рациональному природопользованию, энергетической эффективности и безопасности, диверсификации используемых видов топлива и энергии, экологической приемлемости – одни из главных задач Энергетической стратегии России на период до 2050 года. От выбора направлений развития топливно-энергетического комплекса напрямую зависит безопасность страны, ее экономика и состояние окружающей среды [1,2,3]. Одним из способов для решения данных задач является использование в энергетических системах местных вторичных энергоресурсов и повышение уровня энергетической утилизации отходов. Это особенно актуально для ТЭК Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), что подчёркивается не только Энергетической стратегией, но и Доктриной энергетической безопасности России, утвержденной указом президентом Российской Федерации 13 мая 2019 года [4, 5].

Одним из наиболее перспективных методов обеспечения энергетической и экологической безопасности и повышения энергоэффективности является увеличение доли альтернативных (возобновляемых) источников энергии в энергобалансе. Рост населения и стремительная индустриализация приводят к значительному увеличению потребления энергии промышленным сектором. Использование ископаемого топлива в качестве основного источника энергии привело к истощению невозобновляемых природных ресурсов и негативному влиянию выбросов вредных веществ на окружающую среду. Это привело к необходимости увеличить долю энергии, вырабатываемую за счет возобновляемых видов топлива, таких как биомасса [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Биомасса, являясь возобновляемым источником энергии обладает огромным потенциалом для снижения зависимости от ископаемого топлива и в то же время обеспечивает более экологичное и углерод-нейтральное производство энергии [13, 14, 15, 16].

Актуальность темы и степень её разработанности.

В настоящее время неуклонно растет спрос на электроэнергию. Это заставляет по-новому взглянуть на новые альтернативные источники энергии. Биомасса является перспективным топливом для выработки тепло и электроэнергии. Ежегодно в мире образуется от 123 до 155 миллионов тонн биомассы различного происхождения. Проблема зависимости энергоёмких отраслей от ископаемых видов топлива может быть решена за счёт применения биотоплива — эффективного альтернативного источника энергии. Стремление к декарбонизации энергетического сектора, повышение энергоэффективности и включение биомассы в энергобаланс содействуют устойчивому развитию и охране экосистем. На фоне нестабильности цен на традиционное топливо и рисков, связанных с глобальным потеплением, мировое сообщество всё активнее обращается к возобновляемым источникам энергии, в первую очередь — к биомассе. Источники биомассы весьма разнообразны: это могут быть отходы аграрного и лесного секторов, а также твёрдые бытовые отходы. Хотя такое многообразие гарантирует широкую доступность сырья, оно одновременно обуславливает различия в химическом составе биомассы разных типов [15]. Рациональное использование биоотходов для решения экологических и энергетических вызовов — одно из приоритетных направлений современной энергетики. Для производства биотоплива пригодны различные виды сырья: энергетические культуры, сельскохозяйственные и лесосечные отходы, водоросли, осадок сточных вод (ил), а также бытовые и пищевые отходы [16].

Экономика России во многом опирается на предприятия энергоёмких отраслей. Бесперебойная работа крупных предприятий напрямую зависит от стабильности их энергетического обеспечения, что делает главной задачей эффективную эксплуатацию и обслуживание соответствующих энергосистем данных предприятий.

Одни из наиболее энергоёмких отраслей Архангельского энергорайона - целлюлозно-бумажные и картонные производства, обеспечение которых до сих

пор преимущественно зависит от ископаемых видов топлива – каменного угля, мазута и природного газа. Данная ситуация сложилась из-за двух основных факторов: высокой энергоёмкости целлюлозно-бумажной отрасли и роли таких предприятий в обеспечении энергетических потребностей близлежащих населённых пунктов. Так одни из крупнейших ЦБП предприятий региона – Архангельский ЦБК и Котласский ЦБК обеспечивают потребности населения в теплоэнергии (горячая вода, отопление) и электроэнергии.

Сократить долю ископаемых топлив, повысить надёжность энергосистемы за счёт диверсификации топлив, возможно за счёт использования вторичных энергоресурсов — например, заменой части ископаемого топлива в энергобалансе побочными продуктами производства. Одними из таких побочных продуктов являются осадок сточных вод и кородревесное топливо, повышение эффективности энергетического использования которых является важной задачей для сокращения доли традиционных топлив. На целлюлозно-бумажных предприятиях осадок получается в результате очистки промышленных и городских сточных вод. Кородревесное топливо является отходом, получаемым при подготовке щепы.

С глобальным ростом мирового населения производство осадка сточных вод растёт год за годом. В Российской Федерации каждый год образуется свыше 100 млн. м³ осадка (влажностью 98%), в КНР в 2020 году образование осадка сточных вод превысило 60 млн. м³ и к 2025 году достигло 90 млн. м³. Большинство очистных сооружений производят осадок, содержащий до 30-35% твёрдых веществ, образующихся в результате физических, либо биологических процессов очистки сточных вод, при этом большую часть состава осадка составляют органические и питательные вещества. Последние зависят от источника сточных вод, процесса очистки и периода их образования [17, 18].

Технологии утилизации осадка делятся на несколько категорий: хранение на полигонах ТБО, извлечение из осадка полезных веществ и их использование в качестве удобрения, совместная энергетическая утилизация осадка с различными видами высококалорийного топлива [19, 20, 21, 22]. Утилизация осадка сточных

вод первыми двумя способами загрязняет почву и воды, поскольку осадок содержит тяжелые металлы, бактерии и органические вещества [23].

Энергетическое использование осадка сточных вод является одной из лучших технологий его утилизации. Однако, энергетическое использование данного отхода по-прежнему представляет собой сложную задачу в связи с высокой влажностью осадка, высоким содержанием металлов и низкой теплотворной способностью [24, 25]. Несмотря на большой потенциал пиролиза и газификации в качестве альтернативных способов увеличения энергетической плотности осадка, проблемы, связанные с присутствием в осадке тяжёлых металлов и прочих загрязнителей, изучены не полностью с точки зрения всего технологического процесса преобразования отходов в энергию [26].

Поэтому работа, направленная на увеличение надежности энергетической системы Архангельской области путем повышения эффективности энергетического использования кородревесного топлива и осадка сточных вод в котельных агрегатах с кипящим слоем, является актуальной. За счёт наращивания доли альтернативных источников в энергетическом балансе области удастся уменьшить привязанность региона к ископаемому топливу. Диверсификация базовых энергоресурсов обеспечит более высокую надёжность энергосистемы, одновременно сокращая вредное влияние энергетических объектов на экологию региона.

Степень разработанности темы. Увеличением энергетической эффективности и надежности котельных агрегатов в разные годы занимались Моррис Дж. Д., Дауд С. С., Ниммо У., Зайченко В., Ханнл Т. К., Приш А. Дж., Алкман М., Куба М., Чернявский А., Басу П., Реддер Г. Дж., Хаймерл Дж., Чен Ю., Гадерер М., Фендт П. Г., Сплитхофф Х., Шевченко А., Странберг А., Тайрел М., Фальк Дж., Оман М., Скоглунд Н., Ядловек М., Брийард А., Тейлор М., Хорнсби К., Ли П., Гани А., Шен К., Литун Д. С., Рябов Г. А., Марьяндышев П. А., Любов В. К. и другие отечественные и зарубежные ученые.

Большое количество работ посвящено изучению характеристик различных вторичных энергоресурсов и их сжиганию в различных энергоустановках, преимущественно в котельных агрегатах с кипящим слоем. Однако недостаток научно обоснованных рекомендаций для повышения эффективности и надежности сжигания не позволяет в полной мере использовать вторичные энергоресурсы в существующих энергоустановках. Обозначенные выше практические и теоретические проблемы позволили сформулировать цель и задачи настоящего исследования.

Цель исследования: Повышение эффективности энергетической системы Архангельской области путем увеличения надежности работы котельных агрегатов с кипящим слоем сжигающих осадок сточных вод и кородревесное топливо.

Задачи исследования:

1. Получение теплотехнических характеристик и элементного состава кородревесного топлива и осадка сточных вод.
2. Проведение термического анализа получение механизма термического разложения основных органических компонентов кородревесного топлива и осадка сточных вод.
3. Изучение морфологических характеристик осадка сточных вод.
4. Исследование образования газовых компонентов в процессе термодеструкции кородревесного топлива и осадка сточных вод.
5. Исследование эффективности работы котельных агрегатов с кипящим слоем сжигающих осадок сточных вод и кородревесное топливо, разработка рекомендаций по повышению энергетической эффективности их работы. Исследование процесса агломерации частиц топливной золы с материалом слоя при сжигании осадка сточных вод и кородревесного топлива.
6. Проведение экспериментальных исследований на действующих энергоустановках по определению эмиссии вредных соединений (NO_x , CO , HCl , SO_2) и твёрдых частиц в процессе сжигания смеси из осадка сточных вод и кородревесного топлива.

7. Разработка технических мероприятий, направленных на исключение агломерации частиц золы с материалом кипящего слоя котлоагрегатов с кипящим слоем сжигающих кородревесное топливо и осадок сточных вод.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Получены данные о работе котельных агрегатов с кипящим слоем сжигающих осадок сточных вод и кородревесное топливо.

2. Получены экспериментальные данные процесса агломерации частиц топливной золы и инертного материала кипящего слоя, влияющего на эффективность и надежность работы котельного агрегата.

3. Разработаны технические мероприятия, направленные на увеличение энергоэффективности Архангельской области путем повышения надежности работы котельных агрегатов с кипящим слоем и увеличением их межремонтного периода.

Теоретическая значимость работы:

1. Теплотехнический анализ позволил определить энергетический потенциал кородревесного топлива и осадка сточных вод.

2. Результаты анализа химического состава минеральной части осадка сточных вод и кородревесного топлива позволили определить проблемы при их энергетическом использовании.

3. Термогравиметрические и микроскопические исследования позволили оценить реакционную способность и её влияние на горение осадка сточных вод и кородревесного топлива в кипящем слое.

4. С помощью газохроматографического анализа выявлены летучие вещества, выделяющиеся при различных температурах пиролиза осадка сточных вод и кородревесного топлива.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны технические мероприятия по повышению эффективности и надежности работы котельных агрегатов с пузырьковым кипящим слоем.

2. Экспериментально подтвержден метод расчета концентрации оксида калия в материале кипящего слоя.

Методология и методы научного исследования.

Образцы топлива подготавливались с помощью мельницы РМ 200 фирмы Retzsch и ситового анализатора Retzsch AS 200 Control до фракции от 63-125 мкм.

Для определения теплотехнических характеристик использовали калориметр ИКА С 2000 Basic Version 2 (погрешность 0,1%), муфельную печь и сушильный шкаф. При проведении исследований пользовались ГОСТ Р 52911–2022, ГОСТ Р 55660–2013 и ГОСТ Р 55661–2013. Химический состав минеральной части топлив определен на спектрометре EDX-8000 (погрешность 1,5%). Содержание горючих определено с помощью анализатора EuroVector EA-3000 (погрешность 0,1-0,3%). Термический анализ выполнялся на термоанализаторе “STA 449 F3 Jupiter” (погрешность 2,0%). Термогравиметрические исследования осадка разной влажности также проводились на термоанализаторе Q600 TA (погрешность 2,0%). Морфология осадка исследовалась с помощью TESCAN VEGA – сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) четвертого поколения с термоэмиссионным вольфрамовым катодом. Продукты пиролиза получали с использованием пиролизера *EGA/PY-3030D*. Анализ продуктов пиролиза проводился при помощи газового хроматомасс-спектрометра *GCMS-QP2010Plus* и библиотек масс-спектров Nist и Wiley 2011.

Эксперименты по сжиганию при изотермических температурах от 600 до 900 °С проводились в печи Nabertherm. Выбросы вредных веществ (СО, СО₂, NO, NO₂ и общее содержание углеводородов) измерялись в выхлопной магистрали с помощью анализатора NGA2000 Rosemount (погрешность ±8% для СО₂, ±5% для СО) с пламенно-ионизационным детектором.

Положения, выносимые на защиту.

1. Повышение надежности энергосистемы Архангельской области путем увеличения энергетической эффективности использования осадка сточных вод и кордревесного топлива в котельных агрегатах с кипящим слоем.

2. Результаты технического и элементного анализов кородревесного топлива и осадка сточных вод.

3. Результаты термического анализа кородревесного топлива и осадка сточных вод.

4. Результаты исследования структуры осадка сточных вод и её влияния на реакционную способность осадка.

5. Данные газохроматографического анализа летучих продуктов пиролиза (при разных температурах) для кородревесного топлива и осадка сточных вод.

6. Технические мероприятия, направленные на повышение энергетической эффективности совместного сжигания кородревесного топлива и осадка сточных вод в котельных агрегатах с кипящим слоем.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются комплексными и всесторонними исследованиями, основанными на апробированных методиках экспериментальных исследований; большим объемом экспериментальных и опытных данных, повторяемостью экспериментов; сравнением полученных данных с результатами ранее опубликованных научно-исследовательских работ ученых; применением современного программного обеспечения и средств измерения; подтверждением результатов экспериментальными данными.

Публикации. Всего автором опубликованы 14 научных работ, по теме диссертационной работы - 13. В журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий ВАК, опубликовано 6 работ. В журналах первого квартиля (К1) ВАК опубликованы 4 работы и в журналах второго квартиля (К2) – 2 работы. В базы данных цитирования Scopus, Web of Science включены 6 статей, 1 публикация включена в первый квартиль (Q1) базы данных Web of Sciences. 7 статей включены в ядро РИНЦ. В белый список включены 6 работ, 1 работа опубликована в журнале 1 уровня (У1), 3 работы опубликованы в журналах 2 уровня (У2), 2 работы опубликовано в журналах 4 уровня (У4).

Апробация. Основные результаты диссертационной работы представлялись, докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: III Международной молодежной научно-практической конференции «Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию» (г. Архангельск, 2022 г.); X Международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (г. Архангельск, 2025 г.); Международной научно-технической конференции «Энергия Арктики 2025» (г. Архангельск, 2025 г.); Научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов САФУ имени М.В. Ломоносова (Архангельск, 2022 – 2026 гг.);

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 149 страниц, в том числе 36 таблиц, 57 рисунков и список литературы из 130 наименований, 2 приложения с актами внедрения результатов диссертационной работы.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КОТЛОАГРЕГАТОВ СЖИГАЮЩИХ ОСАДОК СТОЧНЫХ ВОД И КОРОДРЕВЕСНОЕ ТОПЛИВО

1.1 Влияние энергетической эффективности сжигания осадка сточных вод и кородревесного топлива на энергосистему

Котельные установки — ключевой элемент современных систем энергоснабжения, оказывающий значительное влияние на надежность и эффективность энергосистемы. На крупных ТЭС доля затрат на топливо достигает 70–80 % эксплуатационных расходов и даже небольшое повышение эффективности сжигания вторичных энергоресурсов даёт существенный экономический эффект.

Важная роль ТЭС, сжигающих вторичные энергоресурсы - это сокращение экологических нагрузок. Повышение эффективности работы котлоагрегатов сжигающих вторичные энергоресурсы снижает выбросы парниковых газов. Одновременно с этим повышается надёжность всего энергетического комплекса за счет диверсификации используемых топливных ресурсов. Это делает установки сжигающие альтернативное топливо не просто локальными источниками энергии, а стратегическими элементами энергосистемы.

Архангельский энергорайон - часть ОЭС Северо-Запада и ЕЭС России, оперативно-диспетчерское управление осуществляет Филиал АО «СО ЕЭС» — Архангельское РДУ. Генерирующие источники энергорайона: Архангельская ТЭЦ (450 МВт электрической и 1368 Гкал/ч тепловой мощности, топливо — природный газ и мазут), Северодвинские ТЭЦ-1 (работает на каменном угле и мазуте) и ТЭЦ-2 (природный газ и мазут), а также ТЭС Архангельского ЦБК (239 МВт и 612 Гкал/ч, топливо — каменный уголь, газ, мазут кородревесное топливо, черный щёлок, осадок сточных вод). Энергорайон связан с Вологодской областью, Республикой Коми, Кировской областью и Карелией, при этом он энергодефицитен, нет

достаточного развития системообразующих сетей. Архангельский энергорайон характеризуется высокой долей промгенерации (37 % от суммарной установленной мощности), при этом доля тепла, вырабатываемого на ТЭЦ, составляет около 80%.

Доля электроэнергии вырабатываемой за счет сжигания вторичных энергоресурсов в Архангельском энергорайоне остается низкой. Из крупных ТЭЦ и ТЭС района только на Архангельском ЦБК происходит выработка электроэнергии за счет вторичных энергоресурсов. При этом существующая работа паровых котлов, сжигающих вторичные энергоресурсы в Архангельском энергорайоне сталкивается с рядом эксплуатационных проблем, снижающих их энергетическую эффективность.

В России основной технологией энергетического использования вторичных энергоресурсов является сжигание в кипящем слое. Так на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности и лесопромышленного комплекса утилизация кородревесного топлива, осадка сточных вод происходит в котлах с кипящим слоем. На Архангельском ЦБК установлены 3 котельных агрегата с пузырьковым кипящим слоем. На ТЭЦ Монди СЛПК установлен один из крупнейших в России паровых котлов с технологией пузырькового кипящего слоя. В Братском филиале «Илим» (Иркутская область) эксплуатируется котёл Е-75-3,9-440ДФТ с кипящим слоем. Котельные агрегаты Е-25-3,9-440ДФТ с кипящим слоем установлены на Мини-ТЭЦ «Белый Ручей» (Вологодская область). В СССР заводом БКЗ выпускались котельные установки КМ-75-40. В данных котлоагрегатах сжигали разнообразные виды топлива: отходы лесопильного производства, мазут, природный газ, каменный уголь, а также низкокалорийное топливо, для сжигания которого требовалось добавление к нему ископаемого топлива с высокой теплотой сгорания. Позднее многие из этих агрегатов были переоснащены под технологию кипящего слоя — среди них, например, модели КМ75-40 на Соломбальском и Архангельском ЦБК.

1.2 Энергетическое использование осадка сточных вод

Сжигание осадка сточных вод изучалось во многих работах [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

В [27] Ядловек и соавторы определяли количество выбросов загрязняющих веществ при совместном сжигании осадка с гранулами из биомассы (в различных пропорциях) и обнаружили, что при увеличении доли осадка в топливной смеси с 25% до 50% выбросы оксидов азота (NO_x) увеличились в полтора раза, а выбросы оксида серы (SO_2) более чем в два раза.

Вонг и соавторы [29] исследовали влияние изменения концентрации кислорода на сжигание высушенного осадка сточных вод и пришли к выводу, что для интенсивной термической утилизации осадка сточных вод необходимо принять меры по снижению потенциального риска выделения вредных веществ, образующихся в результате такой обработки.

В [34] авторы моделировали установку для переработки 400 тонн осадка в день путем его сушки и сжигания и пришли к выводу, что энергетический баланс сушки и сжигания осадка достигается при 50-60% влажности.

Ханнл и соавторы [33] изучали совместное сжигание в псевдоожиженном слое осадка сточных вод с сельскохозяйственными отходами, авторам удалось добиться устойчивой работы установки по сжиганию при температуре 950 °С, однако это вызвало агломерацию материала слоя.

Специалисты Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе [35] проводили исследования каталитического сжигания в кипящем слое и добились эффективного сгорания осадка в реакторе кипящего слоя.

В [36] ИТС 9-2020 «Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами» рассмотрены наиболее распространенные виды оборудования для термической обработки отходов: слоевые печи, печи с псевдоожиженным слоем, вращающиеся печи, циклонные печи, шахтные печи, печи с жидкой ванной расплава и подовые печи. Одной из наилучших доступных технологий сжигания

осадка без предварительной подготовки в справочнике указана технология сжигания в кипящем слое.

Большинство исследований [30,31,32,33,34] сосредоточены на эффективности сжигания осадка сточных вод в котлоагрегатах с кипящим слоем.

1.3 Энергетическое использование кородревесного топлива

Кородревесное топливо — это многообещающий альтернативный источник возобновляемой энергии, который может помочь в решении глобальных проблем, таких как растущий спрос на энергию, выбросы парниковых газов и изменение климата. Сжигание кородревесного топлива и проблемы, возникающие при его энергетическом использовании, изучались во многих работах [37, 38, 39, 40, 41].

В [37] Роедер и соавторы изучали выбросы оксидов азота на различных теплоэлектростанциях при сжигании древесины, древесных отходов, щепы и соломы. Авторы обнаружили, что выбросы NO_x не имеют прямой зависимости от содержания азота в топливе, а уровень выбросов зависит от таких факторов, как метод сжигания и применяемые методы для снижения выбросов NO_x .

Кевсири и Иннет [38] исследовали сжигание древесных отходов в котлоагрегате со слоевым сжиганием биомассы. При этом авторы использовали нейронные сети для анализа содержания калия в процессе сжигания и прогнозирования отложений в топке.

В [39] рассматривались проблемы при сжигании твердой биомассы, связанные с образованием большого количества золы. В исследовании отмечается, что основной движущей силой образования отложений является выделение калия. Выделение калия и последующие газофазные реакции приводят к образованию KCl , K_2SO_4 и KOH . Эти вещества конденсируются на теплообменных поверхностях котельного агрегата.

В работе [40] обобщались 39 работ по кинетике сжигания биомассы и обобщались методы, использованные в каждой из них. Авторами отмечается, что лигноцеллюлозная биомасса - это сложный материал, в котором последовательно

и параллельно образуется множество компонентов. В заключении авторы приходят к выводу, что термогравиметрический анализ - это ценный и простой инструмент для сравнения и масштабирования результатов исследования реакционной способности биомассы.

В рамках исследования [41] было проанализировано, как загрязняющие компоненты, присутствующие в кородревесном топливе, влияют на состав золы — как уносной, так и донной — в установке с кипящим слоем, эксплуатируемой на шведском предприятии по переработке отходов. Результаты работы показали: зола, образующаяся при сжигании древесных отходов, характеризуется повышенным содержанием различных загрязняющих веществ.

1.4 Повышение энергетической ценности биотоплива с помощью термохимического преобразования биомассы

Одними из главных способов термохимического преобразования биотоплив являются процессы пиролиза и торрефикации. Процесс пиролиза заключается в термическом разложении органических элементов при заданной температуре и отсутствии кислорода. Результатом процесса пиролиза являются твердый остаток – биоуголь, конденсируемая органическая часть и не конденсируемые газы. Биоуголь может использоваться для совместного сжигания с углем или для производства гранулированного топлива в виде пеллет и брикетов, что позволит повысить технико-экономические и экологические показатели работы котлоагрегатов. Торрефикация - это термохимический процесс, осуществляемый в диапазоне температур от 230 до 300°C при отсутствии кислорода. Целью процесса торрефикации является увеличение плотности энергии и уменьшение соотношения кислорода к углероду. Процесс торрефикации позволяет максимально сблизить характеристики биотоплив и энергетических углей. Разная степень термической обработки биомассы приводит к разному выходу и разной теплотворной способности биоугля. Поэтому при проведении торрефикации стараются найти оптимальный режим, обеспечивающий наивысшую теплотворную способность

биоугля при наименьшей потере исходной энергии. Процесс торрефикации способствует удалению воды из топлива [42].

Существует много различных типов газификаторов, от традиционных до инновационных. В случае традиционных, таких как использующих принцип кипящего слоя [43, 44], биомасса периодически подается в реактор при недостаточном количестве воздуха. В зоне обогащенной окислителем идет процесс горения биомассы, при этом выделяющаяся теплота расходуется на термическую подготовку и пиролиз остальной части биомассы. Процесс термического разложения биомассы протекает более 10 мин. В случае инновационных, таких как газификатор увеличенного потока [45], смесь пара и кислорода используется как газифицирующий агент. Исходная биомасса постоянно подается и эффективно смешивается с газифицирующим агентом. Часть биомассы сгорает для поддержания высокой температуры, а большая часть подвергается пиролизу. Время термического разложения обычно составляет менее 20 секунд. Реакции газификации, протекающие в аппаратах данного типа, являются очень сложными, так как процесс горения и пиролиза проходят одновременно.

1.5 Повышение энергетической ценности биотоплива с помощью гранулирования

Гранулирование биомассы является жизненно важным шагом в ее энергетическом применении. Повышение плотности энергии достигается за счет гранулирования, которое также обеспечивает более легкое обращение и более компактное хранение, являющимися важными факторами для экономической логистики и транспортировки. Успешность гранулирования и качество продукта в первую очередь измеряются механической прочностью гранул, выраженной в виде доли образца гранулы, которая выдерживает испытание на переворачивание в неповрежденном виде. Производство гранул из биомассы всегда было затруднено несколькими факторами, включая отсутствие понимания механизма связывания частиц для образования пеллет в стандартных условиях прессования гранул. Это

связано с тем, что при гранулировании биомассы способствующие факторы охватывают несколько молекулярных, микроскопических и даже наноскопических ступеней [46].

Технология создания пеллет включает множество параметров [47, 48, 49, 50]. В [48] авторы изучали физико-механические характеристики топливных пеллет, произведенных из древесины лиственных пород и пришли к выводу, что обработка измельченного древесного сырья (лиственных пород древесины) насыщенным паром позволяет получать топливные пеллеты требуемого качества, а значения механической прочности полученных топливных гранул, сравнимы с достигаемой при использовании древесины хвойных пород. Н. А. Сычева и соавторы в [50] исследовали влияние режима гранулирования (температуры и давления) на прочностные свойства топливных пеллет, полученных из древесины сосны, ольхи черной, ольхи серой и березы и сделали вывод, что увеличение температуры и давления прессования увеличивают прочность пеллет более чем в три раза.

1.6 Сжигание биомассы в кипящем слое

Технология сжигания в псевдоожиженном (кипящем) слое все чаще используется для получения энергии из биомассы и различных отходов [51]. Сжигание в псевдоожиженном слое - это хорошо известная технология производства тепла и электроэнергии, которая используется уже более трех десятилетий [36, 52]. Технология кипящего слоя обладает несколькими преимуществами по сравнению со слоевым и факельным сжиганием: возможность не устанавливать дорогие системы очистки дымовых газов от диоксида серы и оксидов азота [36, 52, 53]. Разные виды кипящего слоя представлены на рисунке 1.1.

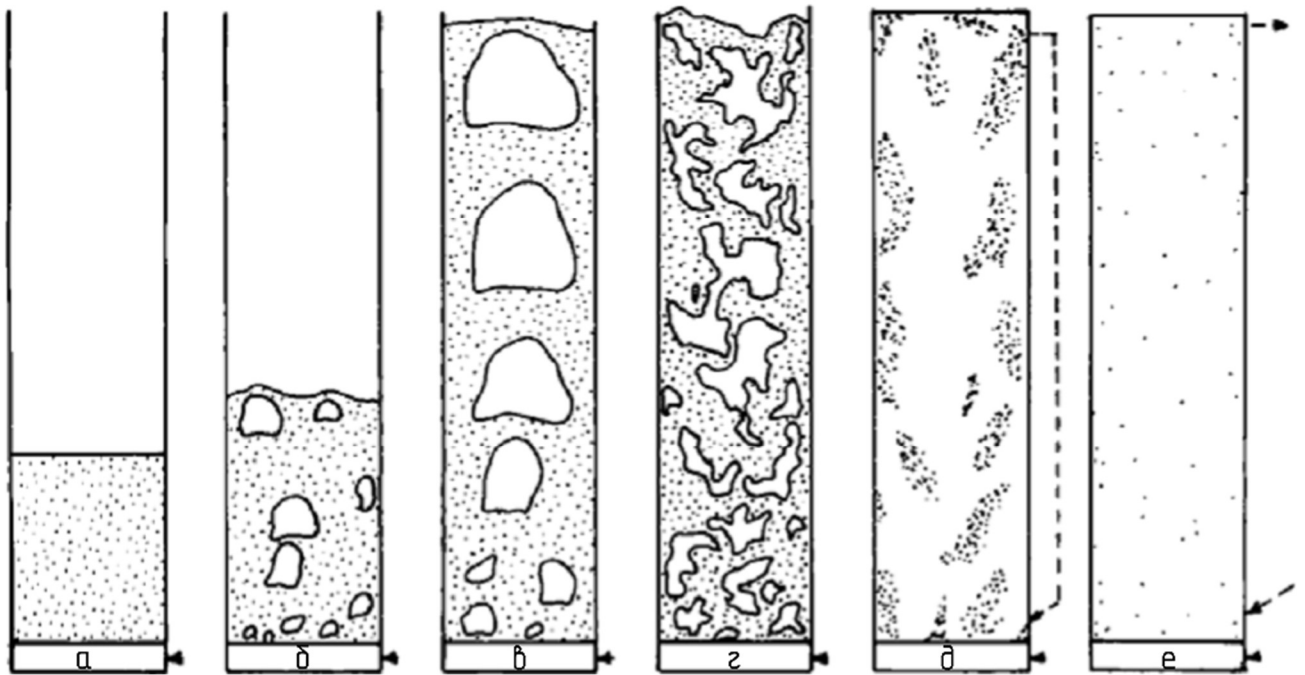


Рисунок 1.1 – Типы кипящего слоя. а – стационарный (не кипящий) слой; б – пузырьковый кипящий слой; в – циркулирующий кипящий слой; г, д – турбулентный кипящий слой; е – режим пневмотранспорта

Технология кипящего или псевдоожиженного слоя также выгодно отличается по сравнению с другими универсальностью в выборе топлива. Котельные установки с кипящим слоем эффективно преобразуют множество видов низкокалорийных отходов и биотоплив в энергию. Одним из наглядных примеров эффективного сжигания вторичных энергоресурсов (кордревесное топливо и торф) является котельный агрегат с циркулирующим кипящим слоем тепловой мощностью 550 МВт установленный в Альхольмене (Финляндия).

Эксперименты по сжиганию RDF топлива в энергоустановках с кипящим слоем проводились в Польше и Финляндии. Эксперименты подтвердили высокую эффективность котлоагрегатов с циркулирующим кипящим слоем для получения энергии из RDF топлива как совместно с различными видами биомассы, так и совместно с углем. [53, 54, 55, 56, 57]. Опыт работы Российских специалистов в области сжигания биомассы в котлоагрегатах с кипящим слоем) для также знает немало успешных примеров. Особенно широко эта технология распространилась в целлюлозно-бумажном производстве. Такое положение дел объясняется двумя

основными обстоятельствами большими объемами некондиционных древесных отходов и необходимостью переработки осадка, образующегося при биологической очистке стоков предприятий [58].

Несмотря на многочисленные преимущества котлов с псевдоожиженным слоем, наиболее существенной проблемой при их эксплуатации является слипание частиц золы с инертным материалом. Агломерация (рисунок 1.2) ухудшает качество разжижения слоя и приводит к его частичной или полной дефлюидизации [59]. Агломерация обусловлена многими факторами [60, 61, 62, 63, 64, 65]. Основной причиной агломерации в псевдоожиженном слое является образование золы с низкой температурой плавления и образование легкоплавких эвтектических щелочных элементов с силикатами [66, 67].

Многие исследования [66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75] сосредоточены на механизме формирования агломератов при горении биомассы в кипящем слое. В работе [75] были предложены два основных способа образования агломерата - агломерация, вызванная расплавом минеральной части топлива при высокой температуре, при этом происходит реакция между компонентами золы, например, топливо, богатое щелочными элементами и кварцем, может образовывать легкоплавкую эвтектику ($K_2O \cdot nSiO_2$) с температурой плавления $764\text{ }^\circ\text{C}$ [73, 74], этот расплав будет действовать как связующее, объединяющее частицы золы. Вторым механизмом образования агломератов в слое является агломерация, вызванная покрытием: на частицах материала слоя, образуется липкое покрытие из-за контакта соединений калия с поверхностью материала псевдоожиженного слоя (например, с кварцевым песком), и при столкновении частицы слоя слипаются, образуя агломераты.



Рисунок 1.2 – Агломерированный материал кипящего слоя

Существуют различные меры для устранения явления агломерации слоя. Одним из них является повышение температуры плавления золы за счет изменения химического состава зольного остатка в слое с использованием альтернативных материалов, таких как оксиды железа [67], оливин и полевой шпат [76]. Использование добавок каолина и доломита в псевдооживленном слое было изучено в [77]. Исследование совместного сжигания разных видов биомассы было опубликовано в [78] и [79]. Другие меры противодействия основаны на идее улучшения качества псевдооживления за счет увеличения отношения скорости газа к минимальной скорости псевдооживления [80] или использования импульсного потока первичного воздуха [81].

Выводы по главе 1

1. В Архангельском энергорайоне очень незначительная доля выработки энергии за счет энергетического использования кородревесного топлива и осадка сточных вод.

2. Котельные установки, использующие вторичные энергоресурсы, играют важную роль в повышении энергоэффективности и снижении экологической нагрузки: они сокращают расход ископаемого топлива и объёмы вредных выбросов, а также способствуют диверсификации топливных ресурсов.

3. Осадок сточных вод может использоваться в энергетике, но требует тщательного контроля выбросов NO_x и SO_2 . Лучшей технологией для сжигания влажного осадка без предварительной подготовки является сжигание в кипящем слое.

4. Кородревесное топливо — перспективный возобновляемый ресурс, однако использование КДТ сопряжено с такими проблемами как образование золы с высоким содержанием калия (KCl , K_2SO_4 , KOH), приводящее к отложениям на поверхностях нагрева.

5. Основные проблемы, возникающие при эксплуатации котлов с кипящим слоем — это агломерация слоя из-за низкой температуры плавления золы (особенно при высоком содержании щелочных элементов).

6. Совершенствование технологий энергетического использования осадка сточных вод и кородревесного топлива требует комплексного подхода, включающего: предварительную обработку топлива (сушку, торрефикацию, гранулирование); оптимизацию процессов сжигания (выбор технологии, контроль выбросов); решение эксплуатационных проблем (агломерация, отложения золы).

ГЛАВА 2. КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД И КОРОДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА

Глава 2 посвящена влиянию осадка сточных вод на энергосистему Архангельской области, а также термическим, элементным и морфологическим исследованиям КДТ и ОСВ с целью увеличения эффективности их энергетического использования в котельных агрегатах с кипящим слоем.

Осадок сточных вод - отход сооружений очистки сточных вод городских и производственных сточных вод. Осадок сточных вод получают на сооружениях очистки промышленных и городских сточных вод. Процесс очистки включает механическую обработку, аэрацию, трёхэтапную биологическую очистку. После биологической очистки избыточный активный ил и осадок поступают в уплотнители, а затем, для обезвоживания — в декантерные центрифуги. Далее осадок утилизируется в котельных агрегатах с кипящим слоем.

Кордревесное топливо образуется в технологическом цикле целлюлозно-бумажного и картонного производств АО Архангельского ЦБК. В технологическом цикле производства целлюлозы образуются лиственное или хвойное кордревесное топливо. В технологическом цикле производства картона образуется одновременно хвойное и лиственное кордревесное топливо.

2.1 Доля осадка сточных вод и кордревесного топлива в энергобалансе Архангельского ЦБК и региона

Осадок сточных вод и кордревесное топливо играют важную роль в энергетической системе Архангельского ЦБК. За 2025 год на предприятии энергетически утилизировано около 130 тыс. тонн влажного осадка сточных вод и около 400 тыс. тонн кордревесного топлива или 9 тыс. т.у.т. и 100 тыс. т.у.т. соответственно. На предприятии основным топливом является каменный уголь. Его среднее годовое потребление за 2020 – 2024 года составляло 550 тыс. т.у.т. в год. Также значительную долю в топливном балансе предприятия занимает возобновляемое топливо – черный щелок с годовым потреблением около 250 тыс.

т.у.т. Годовой расход вспомогательного топлива (мазут М100) составляет 5 тыс. т.у.т. Доля биомассы (кородревесное топливо, осадок и щелок) в энергобалансе предприятия составляет примерно 40 %, доля осадка сточных вод и древесного топлива составляет 0,99% и 11,00%. Доля осадка сточных вод и кородревесного топлива в топливном балансе региона суммарно составляет 4,2%, а в энергобалансе 0,87% от установленной мощности.

Выработка электроэнергии за счет сжигания осадка сточных вод и кородревесного топлива осуществляется на двух теплоэлектростанциях АО Архангельского ЦБК – ТЭС-1 и энерготехнологической ТЭС-3. На ТЭС-1 установлен котельный агрегат Е-83,5-9,8-540 ДФ, работающий в общую магистраль с 5 угольными и 1 газовым котлом (все БКЗ-210-100). Выработка электроэнергии производится 3 паровыми турбинами марки ПТ и двумя противодавленческими турбинами марок ПР и Р. Доля биомассы в выработке электроэнергии на ТЭС-1 составляет примерно 10 МВт. Энерготехнологическая ТЭС-3 вырабатывает электроэнергию и отпускает технологический пар при помощи трех турбин среднего давления типа Р, которые работают от общей паровой магистрали по тепловому графику нагрузки производства. Выработка перегретого пара осуществляется пятью котельными агрегатами – Е-75-3,9-440 ДФТ, КМ75-40М и тремя СРК-770. Доля электроэнергии вырабатываемой за счет сжигания осадка сточных вод и кородревесного топлива составляет около 8 МВт.

2.2 Теплотехнические и элементные характеристики кородревесного топлива и осадка сточных вод

Теплотехнические характеристики исследуемых топлив, полученные в ходе технического анализа, представлены в таблице 2.1. Осадок сточных вод обладает достаточно высокой теплотой сгорания и зольностью, что объясняется его двухкомпонентным составом: минеральными компонентами, уловленными в процессе очистки сточных вод и наличием в его составе большого количества органических компонентов (отработанного биологического ила). Высокая

зольность осадка препятствует его эффективному энергетическому использованию. Выход летучих у осадка сточных вод имеет значение близкое к кородревесному топливу, это значит, что осадок сточных вод является высокореакционным топливом. Содержание летучих веществ и золы в осадке сточных вод согласуются с ранее опубликованными работами [82, 83, 84]. Хвойное кородревесное топливо имеет более низкий энергетический потенциал по сравнению с лиственным КДТ.

Таблица 2.1 – Теплотехнические и элементные характеристики осадка сточных вод и кородревесного топлива.

Образец	W^a , %	V^{daf} , %	A^{daf} , %	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S^{daf} , %	O^{daf} , %	Q_i^a , МДж/кг
ОСВ	5,3	77,9	37,3	35,6	6,1	2,4	1,7	16,9	14,8
КДТ лиственное	5,1	79,5	1,7	51,1	7,8	2,2	0	37,2	18,1
КДТ хвойное	8,1	75,4	2,3	46,6	7,1	2,3	0	41,6	17,3

Влажность осадка в рабочем состоянии составляет 70-77%, а кородревесного топлива 50-60%, что сильно снижает их энергетический потенциал. Топливную смесь такой высокой рабочей влажности целесообразно энергетически утилизировать по технологии кипящего слоя [36]. Самое большое содержание горючих элементов содержится в кородревесном топливе. Органический компонент осадка сточных вод содержит 35,6% углерода, 16,9% кислорода, 2,4% азота и 1,7% серы. Содержание углерода (С) в осадке выше, чем в осадке сточных вод бумажной фабрики, проанализированном в [85]. Содержание серы (S) и азота (N) в осадке выше, чем обычно наблюдается для других видов биомассы [86]. Также они выше, чем у осадка бумажного производства, проанализированного в [85].

2.3 Рентгенофлуоресцентный анализ кородревесного топлива и осадка сточных вод

Для оценки рисков при сжигании осадка сточных вод и кородревесного топлива проведен рентгенофлуоресцентный анализ минеральной части, представленный в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Рентгенофлуоресцентный анализ (в оксидной форме) минеральной части кородревесного топлива и осадка сточных вод, %.

Элемент	ОСВ	КДТ лиственное	КДТ хвойное
Fe ₂ O ₃	8,400	3,466	4,342
K ₂ O	2,789	20,732	14,358
CaO	34,887	33,649	37,655
CuO	0,057	0,131	0,158
SiO ₂	16,227	5,036	5,642
Al ₂ O ₃	22,034	4,938	7,417
Cr ₂ O ₃	0,069	0,098	0,095
MnO	1,182	1,635	2,060
NiO	0,034	0,033	0,032
ZnO	0,448	0,458	0,444
Na ₂ O	8,045	21,321	19,081
MgO	2,926	4,840	5,261
SrO	0,147	0,033	0,032
TiO ₂	0,321	0,229	0,254
Cl	2,272	3,270	3,169
V ₂ O ₅	0,161	0,130	0,128

Минералы, такие как кварц (SiO₂), кальцит (CaCO₃), микроклин (K[AlSi₃O₈]) и алюминаты (Na[Al(OH)₄]), составляют большую часть зольности осадка. Fe²⁺, Ca²⁺, K²⁺, Na²⁺, Mg²⁺ и Al³⁺ входят в число компонентов, способствующих образованию этих минералов. Кроме того, осадок содержит тяжелые металлы,

такие как хром Cr^{2+} , никель Ni^{2+} , медь Cu^{2+} и цинк Zn^{2+} , но такой распространенный загрязнитель как ртуть (Hg^{2+}) [87, 88] не был обнаружен.

Высокое содержание кальция в осадке сточных вод и кородревесном топливе положительно скажется на процессе сжигания, так как сера будет реагировать с кальцием образуя сульфаты. И осадок и кородревесное топливо содержат большое количество соединений щелочных элементов (K и Na), что крайне негативно сказывается на работе котельных агрегатов вызывая агломерацию, шлакование и загрязнение поверхностей нагрева.

Химический состав минеральной части ОСВ и КДТ рассмотрен с помощью показателей прогнозирования осаждения. А именно, отношение основания к кислоте ($R_{b/a}$), общее содержание щелочи (T_A), показатели засорения (F_u) и вязкости при шлакообразовании (S_R), которые были определены по следующим уравнениям [69]:

$$R_{b/a} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3}$$

$$T_A = K_2O + Na_2O$$

$$F_u = R_{b/a}(K_2O + Na_2O)$$

$$S_R = \frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO} 100\%$$

При значении индекса $R_{b/a} < 0,5$ означает низкое, а $R_{b/a} > 1$ - высокое отложение золы на поверхностях, подверженных воздействию продуктов сгорания; значения между 0,5 и 1 соответствуют среднему отложению золы. В случае T_A интервалы составляют: $< 0,3$ низкого, $0,3 \leq T_A \leq 0,4$ среднего и $> 0,4$ высокого осаждения золы. При $F_u < 0,6$ отложение золы низкое, при $0,6 \leq F_u \leq 40$ высокое, а при $F_u > 40$ чрезвычайно высокое. В случае индекса вязкости при шлакообразовании, если $S_R > 78$, отложение золы низкое, при $66,1 \leq S_R \leq 78$ - среднее, а для $S_R < 66,1$ отложение является высоким. Результаты расчетов индексов шлакования представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Показатели прогнозирования осаждения.

Образец	$R_{b/a}$	T_A	F_u	S_R	Тип золы
ОСВ	1,453	10,834	15,712	25,95%	Основная
КДТ лиственное	8,242	42,053	346,477	10,72%	Основная
КДТ хвойное	6,062	33,439	202,574	10,66%	Основная

Анализ индексов шлакования показал, что осадок и древесное топливо характеризуются высокими значениями индексов $R_{b/a}$ и T_A , что указывает на сильную склонность к образованию отложений на поверхностях нагрева при сжигании. При этом значения индекса S_R свидетельствуют о высоком риске шлакования, так как зола ОСВ и КДТ плавится при относительно низких температурах образуя легкоплавкие эвтектики. Показатель засорения F_u у осадка значительно ниже, чем у древесного топлива. Таким образом, сжигание осадка и кородревесного топлива представляет будет приводить к серьезным проблемам из-за интенсивного шлакообразования и засорения золой.

2.4 Термический анализ осадка сточных вод и кородревесного топлива

Для представления о поведении осадка сточных вод и кородревесного топлива при сжигании проведены термогравиметрические исследования в воздушной и инертной (аргон) средах. Как видно из полученной термограммы изменения массы в воздушной среде (рисунок 2.1) процесс выхода влаги у осадка завершается при температуре 160°C, о чем свидетельствует снижение скорости изменения массы (термограмма ДТГ) при уменьшении массы образца до 93%. В инертной среде процесс выхода влаги у осадка заканчивается при такой же температуре.

Температура начала выхода летучих веществ из осадка сточных вод составляет 180 °С в инертной и воздушной средах — этот показатель сопоставим с данными для прочих видов биомассы [89]. Температуру начала выхода летучих соединений фиксировали по резкому изменению кривой убыли массы. Максимальная скорость выхода летучих в воздушной среде при низких скоростях

нагрева максимальная скорость была при 330 °С; при скорости нагрева 10 °С/мин — 338 °С; при максимальной скорости нагрева — 349 °С. В инертной среде (аргон) диапазон максимальной температуры выхода летучих веществ имел узкий диапазон 330–344 °С.

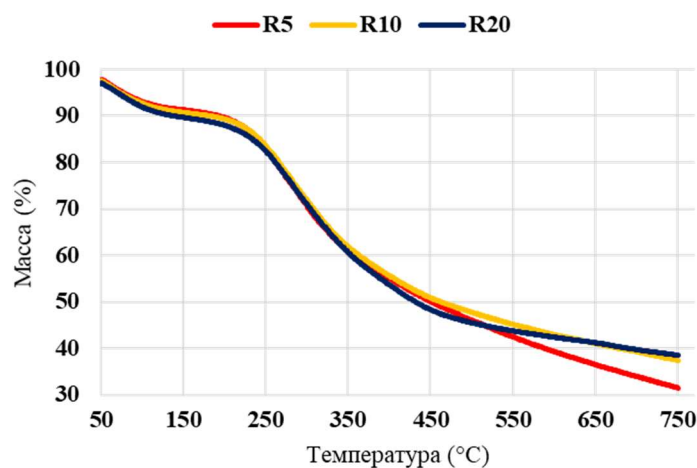


Рисунок 2.1 – Термогравиметрические кривые осадка сточных вод в воздушной среде при скорости нагрева 5, 10, 20 °С/мин., диапазон температур 50–750°С.

Продолжительность максимального выхода летучих веществ зависела от условий нагрева и среды. В воздушной среде при низкой скорости нагрева процесс сохранялся до температуры 480 °С; при увеличении скорости нагрева осадка сточных вод выделение летучих веществ наблюдалось вплоть до 500 °С. В инертной среде выход летучих также продолжался в интервале 480–500 °С. Максимальная скорость убыли массы у осадка сточных вод в инертно среде выше, чем в воздухе. Таким образом, скорость нагрева и характер среды оказывают заметное влияние на температурный диапазон активного выделения летучих компонентов.

Процесс термического разложения осадка завершался даже после достижения 500 °С. При этом отмечалась следующая динамика: после 500 °С скорость изменения массы образца существенно снижалась. Начиная с 550 °С кривая изменения массы была практически линейной, а скорость изменения массы стремилась к нулю. Термическое разложение осадка сопровождалось экзотермическими процессами.

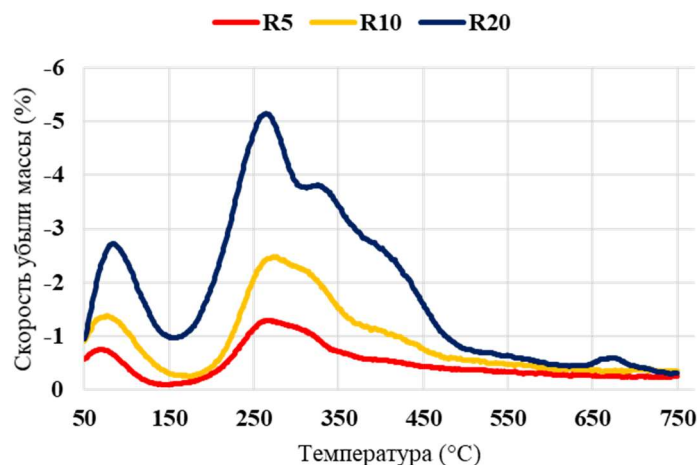


Рисунок 2.2 – Дифференциально-термогравиметрические кривые осадка сточных вод в воздушной среде при скорости нагрева 5, 10, 20 °С/мин., диапазон температур 50–750 °С.

На основании результатов ДТГ при скорости нагрева 20°С/мин видно, что реакция термодеструкции не является одностадийной. Имеются два пика выхода летучих веществ: первичная - выделение летучих при разрушении молекул (при температуре около 260°С), отличающихся низкой термической устойчивостью, а также вторичная - выделение летучих за счет деструкции углерода [90, 91, 92].

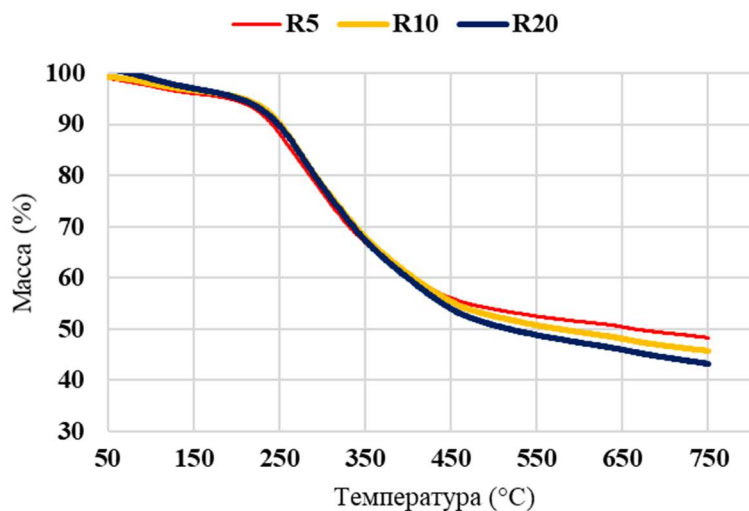


Рисунок 2.3 – Термогравиметрические кривые осадка сточных вод в инертной среде при скорости нагрева 5, 10, 20 °С/мин., диапазон температур 50–750°С.

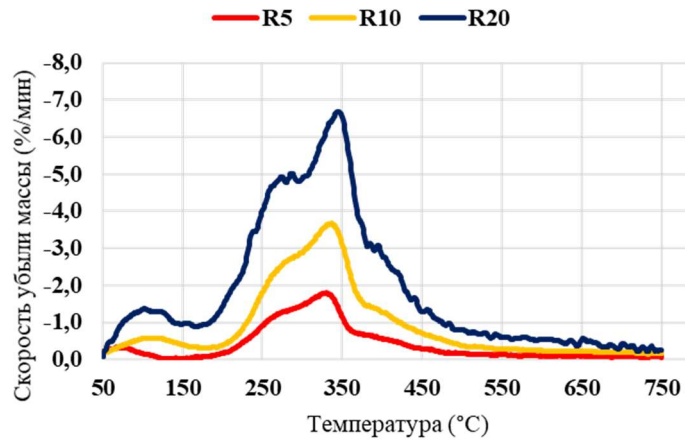


Рисунок 2.4 – Дифференциально-термогравиметрические кривые осадка сточных вод в инертной среде при скорости нагрева 5, 10, 20 °С/мин., диапазон температур 50–750 °С.

На основании анализа термограмм (рисунки 2.5, 2.6) установлено, что процесс сушки кородревесного топлива завершается при достижении температуры 138 °С. Начало выделения летучих веществ фиксируется при 170 °С, а температура, соответствующая максимальной скорости их выхода, составляет 310 °С. Выход летучих веществ продолжается до 425 °С.

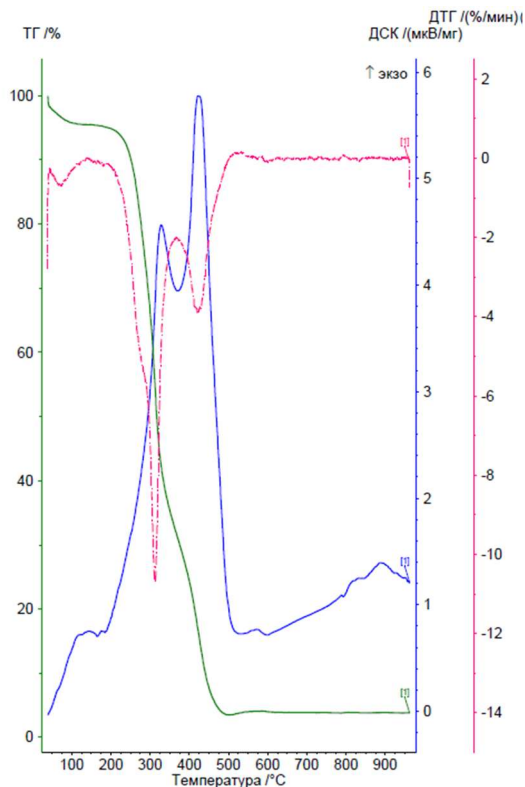


Рисунок 2.5 – Термический анализ кородревесного топлива в воздушной среде при скорости нагрева 20 °С/мин., диапазон температур 50–950 °С.

Процесс термического разложения КДТ не прекращается после 460 °С. При этом после достижения 425 °С она скорость выхода летучих снижается, а при температуре 490 °С кривая убыли массы приобретает линейный характер.

Во всём исследованном температурном диапазоне термическое разложение кородревесного топлива сопровождалось экзотермическими процессами [89, 93, 94, 95, 96, 97, 98].

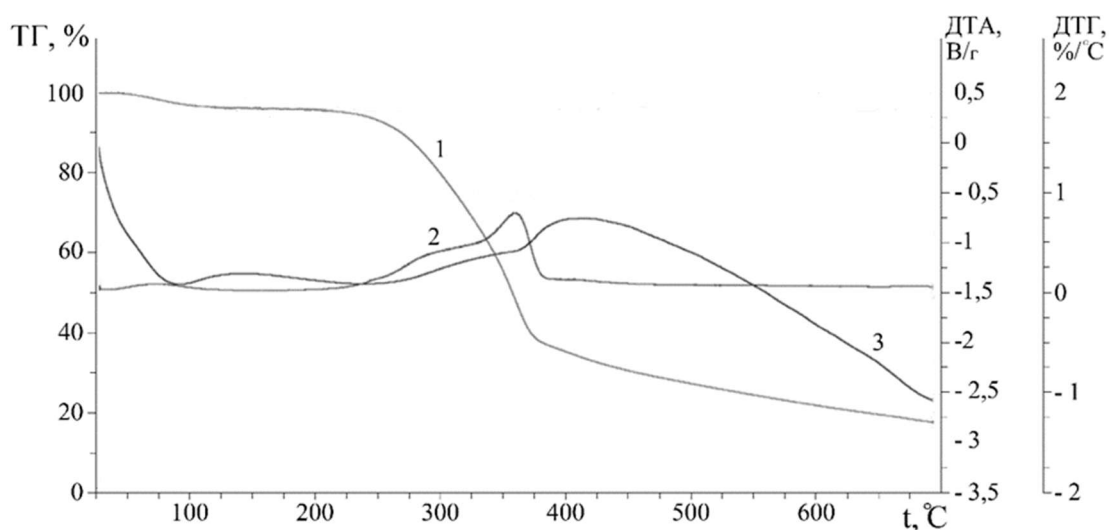


Рисунок 2.6 - Термический анализ кородревесного топлива при скорости нагрева 10 °С/мин., диапазон температур 20–700°С. 1 – ТГ, 2 – ДТГ, 3 – ДТА

Для анализа влияния высокого содержания влаги в осадке на процесс его сжигания проведены два эксперимента:

- Термогравиметрические эксперименты, которые проводились на приборе Q600 TA. Синтетический воздух (80% азота и 20% кислорода) подавался с расходом газа 50 мл/мин.

- Для измерения количества вредных выбросов (СО, СО₂ и общего количества углеводородов) проводилось сжигание осадка в горизонтальной печи, в которой применялись температуры 600, 700, 800 и 900 °С.

В ходе экспериментов по сжиганию непрерывно измерялись тепловые эффекты. Определение температуры и временного интервала эндотермической стадии, соответствующей испарению влаги, представляет большой интерес в случае использования влажного сырья в качестве топлива.

Кривые массы и расхода, полученные для высушенных и увлажненных образцов при пяти скоростях нагрева 5, 10, 20, 50 и 100 °С/мин, представлены на рисунке 2.7. Массы приведены к норме и выражены в процентах, начиная с исходного значения, равного 100%.

При любом содержании влаги профиль кривых массы практически одинаков, независимо от скорости нагрева. Общая стадия испарения происходит приблизительно до температуры 150°С для высушенных и увлажненных на 30 и 40% образцов, рисунки 2.7(а), (б), (д), и 250°С для двух других образцов, рисунки 2.7(ж), (и). Чем выше содержание влаги, тем больше времени требуется для ее удаления. В каждом случае этот этап приводит к потере массы, приблизительно равной содержанию влаги. Для высушенных и увлажненных на 30 и 40% образцов и температурных перепадов 5, 10 и 20°С в минуту, рисунки 2.7(а), (в), (д), затем происходит уменьшение массы в одну или две стадии до температуры 500°С, что соответствует одной или двум стадиям разложения. Затем масса образца остается практически постоянной до 650-700 °С, после чего происходит окончательное снижение массы при температурах 750-800 °С, связанное с горением коксового остатка. Масса остается постоянной при температуре выше 800°С. Для высушенных и увлажненных на 30 и 40% образцов, при скоростях температур 50 и 100°С/мин, рисунки 2.7(ж), (и), общая стадия разложения происходит в более длительном температурном диапазоне (до 600°С). Для значений влажности 50 и 60%, рисунки 2.7(ж), (и), кривые массы имеют форму, которая несколько отличается от формы, наблюдаемой для трех значений с наименьшим содержанием влаги, рисунки 2.7(а), (в), (д), поскольку уменьшение массы происходит более плавно после 300 °С и продолжается до 700 или 750 °С при повышении температуры на 50 °С/мин, рисунок 2.7(ж), и до 800 °С при повышении температуры на 100 °С/мин, рисунки 2.7(и), без каких-либо плато. Стадия испарения влаги в этом случае занимает больше времени и частично или полностью перекрывает стадию удаления влаги.

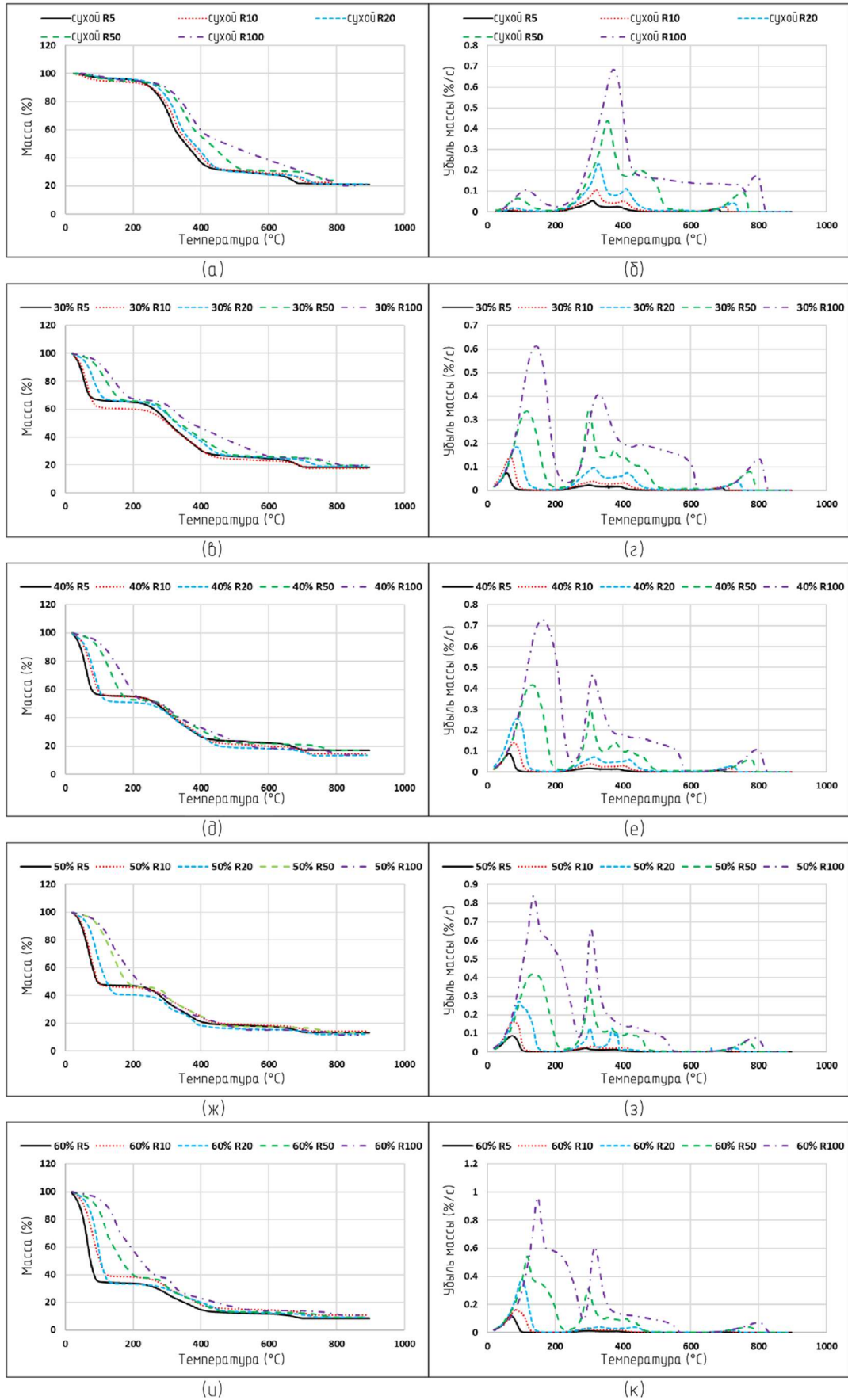


Рисунок 2.7 - Кривые изменения массы и скорости изменения массы. R – скорость нагрева, °C/мин

Первый пик на кривых убыли массы, представленных на рисунке 2.7, связан с испарением влаги. При увеличении содержания влаги и перепада температур этот пик становится больше и наблюдается в диапазоне температур до 350 °С. Для сухих и увлажненных на 30% образцов эта стадия испарения влаги не накладывается на стадии разложения и сжигания биоугля, рисунок 2.7(б), (г). Наложение стадии испарения на стадии разложения и сжигания начинается при влажности 40% и скорости нагрева 100°С/мин, рисунок 2.7(е), и продолжается при показателях влажности - 50 и 60%, а также при перепадах температур 50 и 100°С/мин, рисунок 2.7(з), (к). При увеличении скорости нагрева пик испарения влаги немного смещается в сторону более высоких температур. После пика испарения влаги в большинстве случаев наблюдаются два пика в диапазоне от 200 до 450 °С. Между этими двумя пиками скорость убыли массы не падает до 0. В большинстве случаев это соответствует стадиям выхода летучих веществ, состоящим из трех компонентов, что соответствует лигноцеллюлозному составу осадка, особенно в отношении высокого процентного содержания летучих веществ. Высота и положение каждого пика увеличиваются с увеличением скорости нагрева, что часто наблюдается для различных видов биотоплива. При скорости нагрева 50°С/мин третий пик, наблюдаемый для увлажненных образцов, выглядит как плато, которое происходит между 400 и 500 °С. При скорости нагрева 100 °С/мин за резким пиком испарения следует продолжительное плато. Последний небольшой пик наблюдается после температуры 700 °С, что связано с горением коксового остатка. При увеличении скорости нагрева положение этого пика меняется в сторону высоких температур.

На рисунке 2.8 представлены характеристики различных пиков для рассматриваемых температурных перепадов с точки зрения содержания влаги.

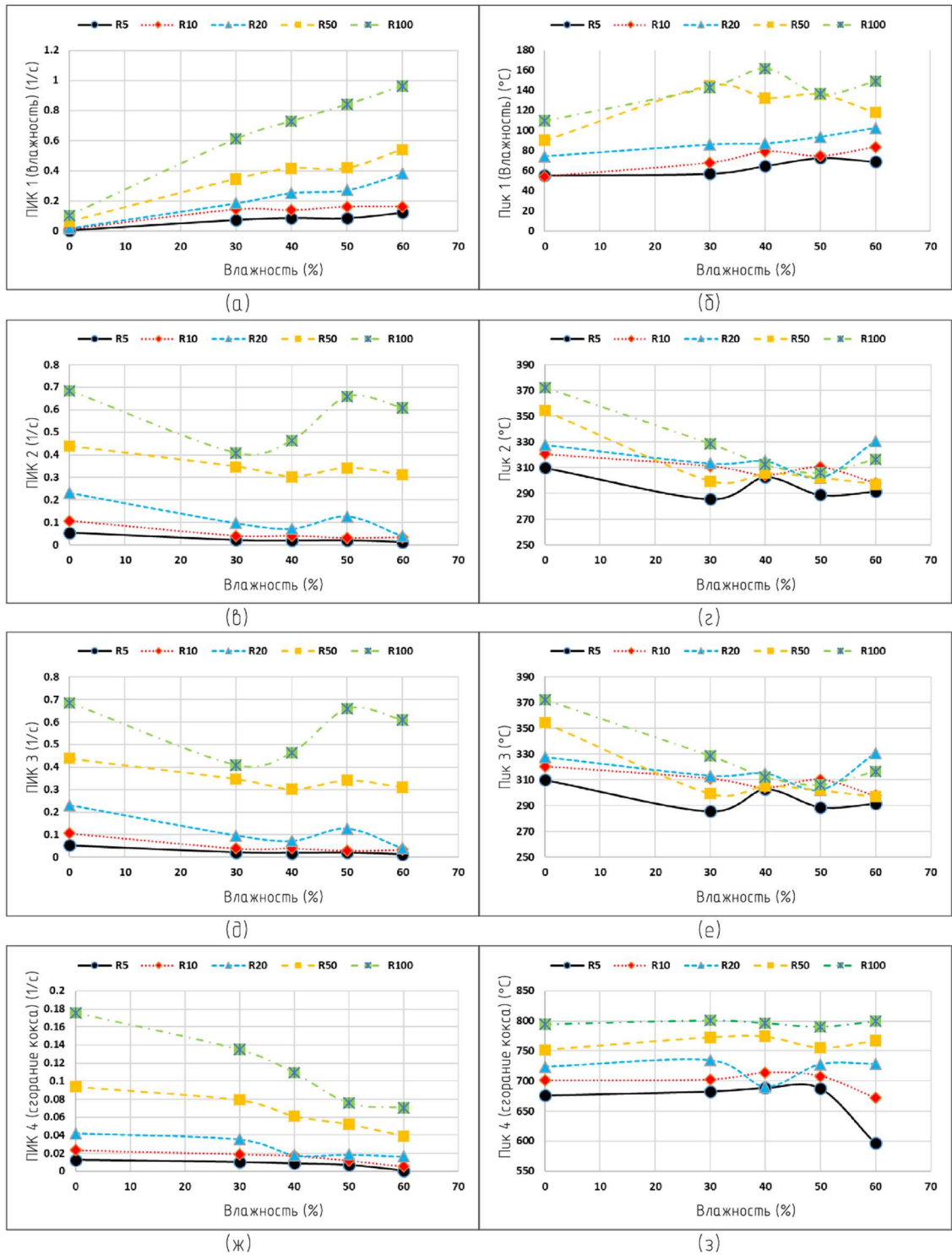


Рисунок 2.8 - Высота и положение (температура) пика 1 (испарение влаги) пика 2, пика 3 и пика 4 (сгорание коксового остатка) для сжигание сухого и увлажненных образцов. R – скорость нагрева, °C/мин

При скоростях нагрева 50 и 100°C/мин на высоту и положение различных пиков большее влияние оказывает содержание влаги. Однако, рисунок 2.8 доказывает, что содержание влаги в осадке не оказывает существенного влияния

на процесс горения. Влажность исходного сырья обычно делится на внешнюю и внутреннюю. Внешняя влага включает механически удерживаемую, капиллярно-конденсируемую и адсорбционную влагу. Внутренняя влага включает коллоидную и гидратную. Внешняя влага химически связана с органическими элементами сырья, в то время как внутренняя влага химически связана с минеральной частью сырья. Внешняя влага может быть удалена механическими средствами и сушкой при нагреве. Коллоидная влага может быть частично удалена при нагреве, в то время как кристаллогидратная влага удаляется при более высоких температурах от 400 до 700 °С. В настоящем исследовании коллоидная влага, безусловно, в значительной степени отсутствует в осадке, который подвергается механической дегидратации. Внешняя влага удаляется в процессе сушки собранного осадка. Кривые на рисунке 2.8 показывают, что добавленная вода удаляется в один этап и при довольно низких температурах, даже если при высоком процентном содержании влаги этот этап испарения влаги занимает больше времени.

На рисунке 2.9 ниже приведены температура и время, при которых заканчивается эндотермическая зона для термогравиметрических экспериментов.

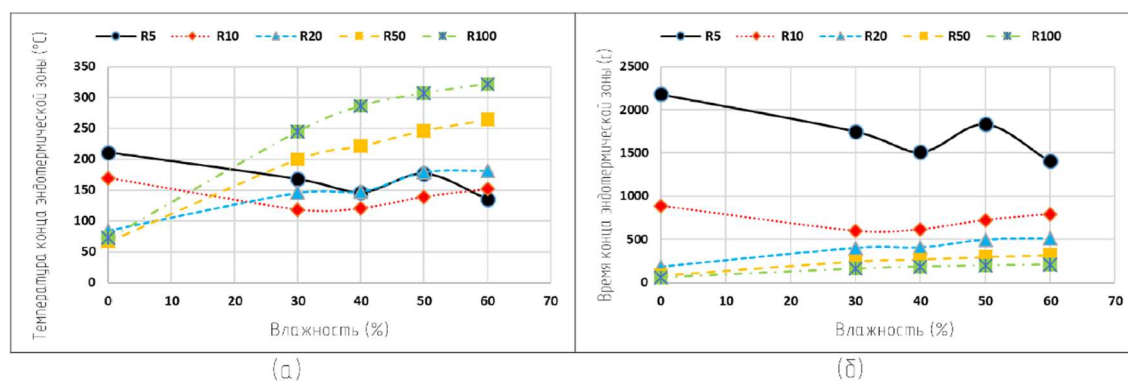


Рисунок 2.9 - Конечная температура и время эндотермической зоны в начале термогравиметрических экспериментов, проведенных на различных образцах. а – конечная температура эндотермической зоны; б – продолжительность эндотермической зоны. R – скорость нагрева, °С/мин

При трех самых низких скоростях нагрева температура и время, при которых заканчивается эндотермическая зона, соответствующая стадии испарения влаги, практически не зависят от её влаги. При двух самых высоких температурных

режимах из-за совмещения стадий сушки и обезвоживания температура окончания эндотермической зоны увеличивается.

На рисунке 2.10 представлены выбросы CO, CO₂ и общего количества углеводородов, происходящие в ходе экспериментов по сжиганию, проведенных при изотермических температурах. Для сравнения между экспериментами, эти выбросы выражены как общее количество выделенных молей CO, CO₂ и общего количества углеводородов на грамм образца.

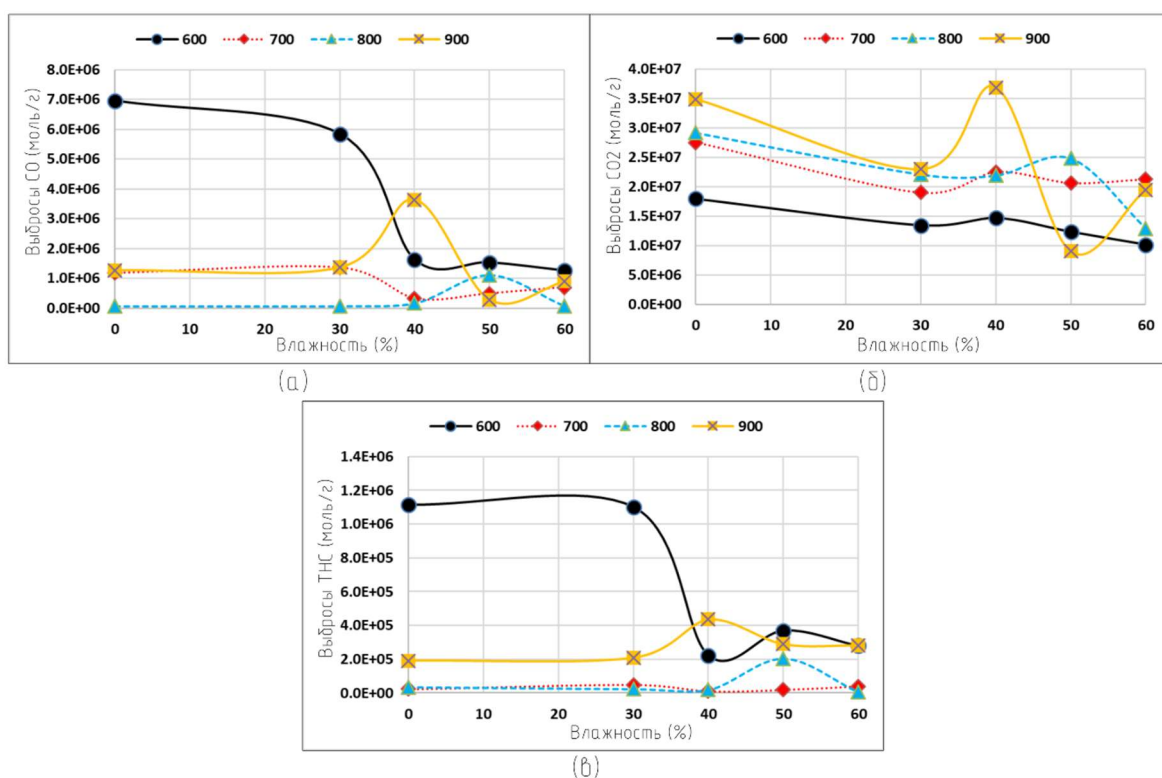


Рисунок 2.10 - Общее количество молей CO, CO₂ и общего количества углеводородов (ТНС) на грамм осадка при различной изотермической температуре. а – Общее количество молей CO; б – Общее количество молей CO₂; в – Общее количество молей углеводородов.

Влияние содержания влаги на выбросы CO, CO₂ и общего количества углеводородов незначительно. Общее количество выделяемых молей CO на грамм образца начинает снижаться при увеличении влажности осадка, а затем стабилизируется на уровне примерно $1,5 \times 10^6$ молей/г, рисунок 2.10(а). Общее количество выделяемых молей CO₂ на грамм исходного образца имеет тенденцию к снижению в зависимости от содержания влаги, но составляет приблизительно от

$3,0 \times 10^6$ до $2,0 \times 10^6$ моль/г, рисунок 2.10(б). Что касается общего количества выбросов углеводородов, за исключением сухого образца, то общее количество выделяемых моль на грамм исходного осадка практически не зависит от содержания влаги и составляет приблизительно от $1,0 \times 10^5$ до $2,0 \times 10^5$ моль/г. В случае сухого образца общее количество выделяемых моль на грамм исходного сырья при содержании влаги более 30% значительно снижается с $1,1 \times 10^6$ моль/г до стабилизации на уровне $3,0 \times 10^5$ моль/г, рисунок 2.10(в).

2.5 Микроскопические исследования осадка сточных вод

Микроскопические исследования (рисунки 2.11, 2.12) показывают, что структура осадка сточных вод - рыхлая, шероховатая с неоднородной пористой структурой, которая представлена аморфными хлопьями и множеством минеральных включений. После сушки осадок у осадка сжимаются волокна. Сканирующая электронная микроскопия высушенного образца осадка (рисунки 2.13, 2.14) показала, что осадок состоит из частиц размером от 0,5 до 350 нм, часть частиц агрегированы. В исходном и высушенном образцах осадка отчетливо видны поры, размер которых составляет от 40 до 70 нм (макропоры) и от 0,5 до 2 нм (микропоры). При сравнении исходного и высушенного осадка видно, что структура высушенного осадка отличается от структуры исходного – при сушке волокна осадка сильно сжимаются, а количество пор увеличивается. Таким образом, осадок сточных вод является наноструктурированным материалом. Его шероховатая поверхность существенно увеличивает площадь для химических взаимодействий. Развитая переходная пористость, объединяющая мезо- и макропоры, обуславливает выраженные адсорбционные свойства осадка [99, 100, 101].

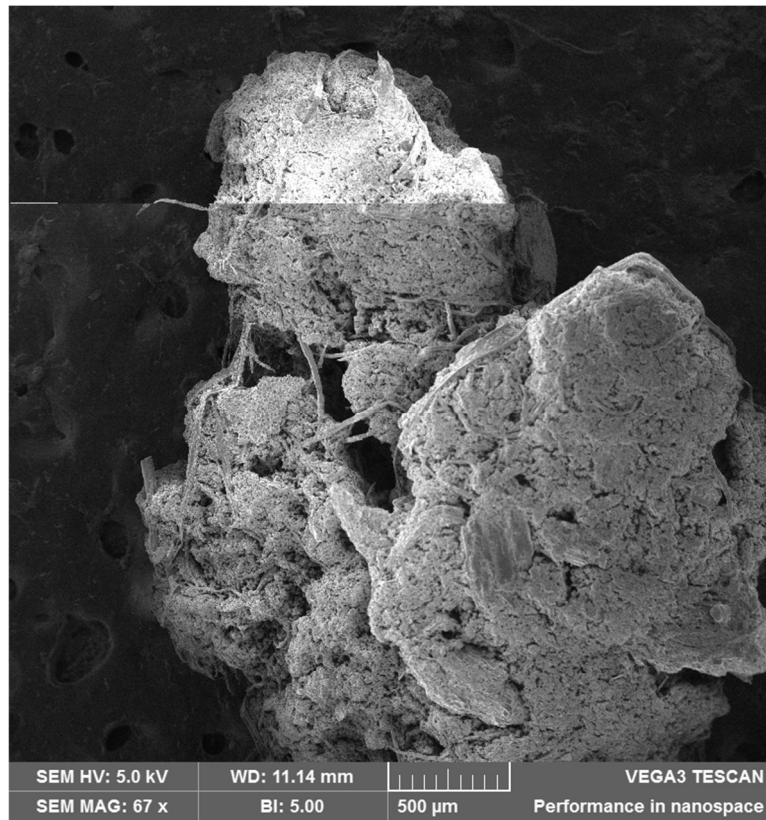


Рисунок 2.11 - Морфология исходного образца осадка сточных вод при 500 нм

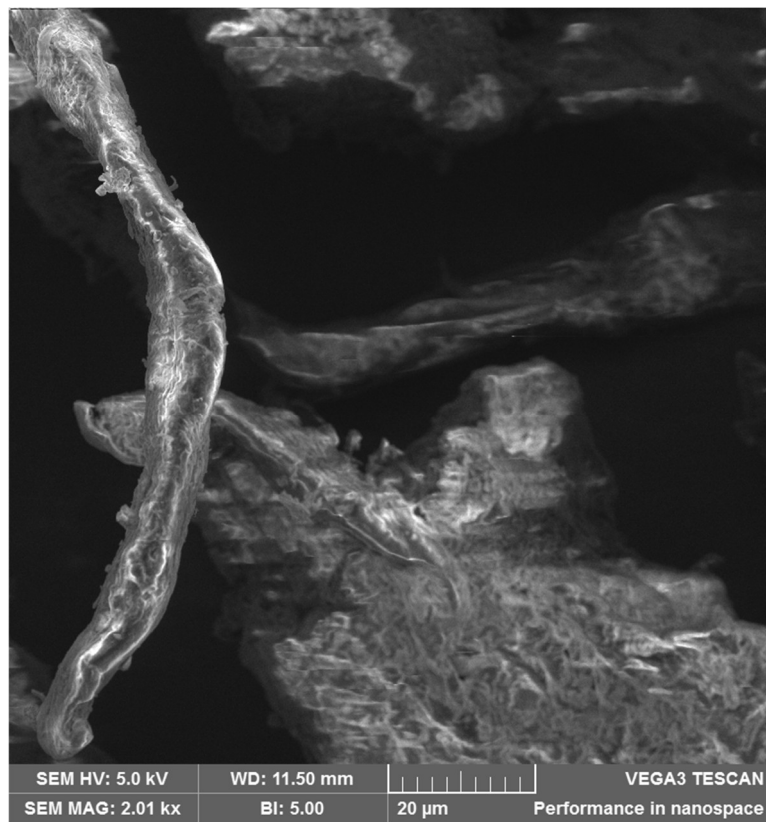


Рисунок 2.12 - Морфология исходного образца осадка сточных вод при 20 нм

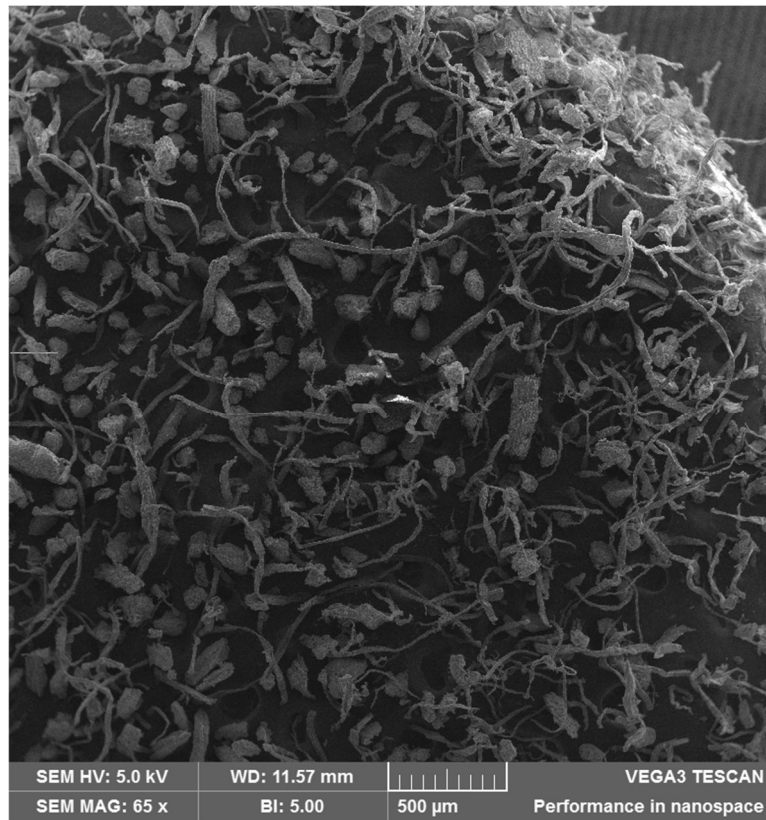


Рисунок 2.13 - Морфология сухого образца осадка сточных вод при 500 нм

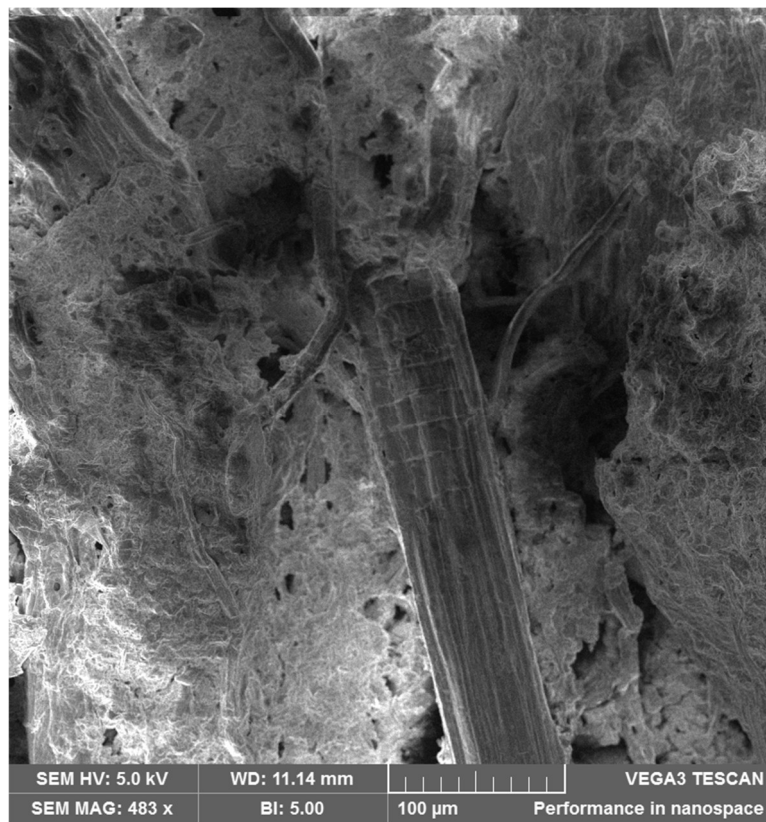


Рисунок 2.14 - Морфология сухого образца осадка сточных вод при 100 нм

2.6 Газохроматографический анализ кородревесного топлива и осадка сточных вод

В результате анализа хроматограмм были получены данные о составе продуктов пиролиза при различных температурах. Основные идентифицированные компоненты можно объединить в восемь групп: гваяцильные и сирингильные фенолы, кетоны, кислоты, ароматические углеводороды, фураны, альдегиды, алкены и алканы [102]. Основные компоненты, выделяющиеся в процессе пиролиза осадка сточных вод и кородревесного топлива, приведены в таблицах 2.4-2.13.

Таблица 2.4 - Пиролиз КДТ при 200 °С

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика,%	Химическая формула
245882	0,88	$C_{15}H_{24}O$
138770	0,50	$C_{15}H_{10}O_2$
149711	0,54	$C_{16}H_{30}O$
86918	0,31	$C_{10}H_{16}$
182848	0,65	$C_{20}H_{32}$
380851	1,36	$C_{30}H_{50}$
26789346	95,76	H_2O

Таблица 2.5 - Пиролиз ОСВ при 200 °С

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
2144185	7,75	CO_2
25422301	91,84	H_2O
82336	0,3	$C_{10}H_{16}$
29617	0,11	C_8H_{12}

Следует отметить, что на хроматограммах процесса пиролиза при температуре 200°С четко прослеживаются 7 основных пиков у кородревесного топлива и 4 пика у осадка сточных вод. Это объясняется тем, что у кородревесного топлива выделяются компоненты разложения гемицеллюлозы с низким временем удержания [103].

Таблица 2.6 - Пиролиз КДТ при 300 °С

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
2807654	8,97	CH ₃ OH
19865123	63,45	H ₂ O
2779229	8,88	C ₂ H ₄ O ₂
2878321	9,19	C ₁₀ H ₁₀ O ₃
1278988	4,09	C ₉ H ₁₀ O ₂
384705	1,23	C ₁₅ H ₂₄ O ₂
183969	0,59	C ₃₀ H ₅₀
397576	1,27	C ₉ H ₁₀ O ₂
92497	0,30	CH ₃ SH
84644	0,27	C ₁₆ H ₃₂
78463	0,25	C ₁₇ H ₃₄ O
87087	0,28	C ₁₈ H ₃₆ O
55422	0,18	C ₁₆ H ₃₂ O

Таблица 2.7 - Пиролиз ОСВ при 300 °С

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
12646657	23,51	CO ₂
482368	0,9	CH ₃ Cl
880926	1,64	CH ₃ CHO
676647	1,26	CH ₃ SH
1308849	2,43	CH ₃ OH
24450673	45,45	H ₂ O
73060	0,14	C ₄ H ₃ O
547983	1,02	CH ₃ COOH
216313	0,4	C ₇ H ₁₆ O
242488	0,45	C ₉ H ₁₀ O
940111	1,75	C ₆ H ₁₂ O ₅

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
107532	0,2	$C_{14}H_{28}O$
948580	1,76	$C_{11}H_{12}O_3$
744063	1,38	$C_{29}H_{48}$
1701406	3,16	$C_{29}H_{48}O$
2035034	3,78	$C_{29}H_{48}$
1966422	3,66	$C_{30}H_{48}O$

При температуре пиролиза 300°C у осадка компоненты начинают активно выделяться после 31 минуты, у кородревесного топлива после 11 минуты. Основные продукты низкотемпературного пиролиза осадка сточных вод - фенолы, спирты и кетоны [102, 104, 105].

Таблица 2.8 - Пиролиз КДТ при 400 °С

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
36603840	23,85	$C_2H_4O_2$
16115564	10,50	H_2O
16611023	10,82	$C_3H_6O_2$
11122402	7,25	C_5H_{12}
9964248	6,50	$C_9H_{10}O_2$
9357453	6,10	$C_7H_8O_2$
7851642	5,12	$C_5H_4O_2$
7011449	4,57	$C_6H_{10}O$
2869067	1,87	$C_{11}H_{14}O_3$
2716271	1,77	$C_6H_8O_3$
2560773	1,67	$C_6H_{12}O$
1927078	1,26	$C_{17}H_{32}$
1885500	1,23	$C_5H_6O_2$
12386301	8,07	$C_5H_6O_2$
984622	0,64	$C_8H_{14}O_2$

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
914585	0,60	$C_9H_{12}O_2$
5756402	3,75	$C_{10}H_{12}O_2$
580144	0,38	$C_9H_{20}O$
418380	0,27	C_8H_8O
1686184	1,10	$C_5H_4O_3$
195308	0,13	$C_{12}H_{20}$

Таблица 2.9 - Пиролиз ОСВ при 400 °С

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
17811104	15,28	CO_2
770196	0,66	C_3H_6
506456	0,43	CH_3CHO
1304727	1,12	CH_3SH
2344302	2,01	CH_3OH
32917568	28,2	H_2O
526397	0,45	C_4H_3O
857072	0,74	CH_3COOH
1163642	1,00	CH_3COOH
1452281	1,25	$C_3H_6O_2$
468631	0,40	C_4H_7N
156153	0,13	C_4H_5N
391943	0,34	C_4H_5N
749527	0,64	C_7H_8
943900	0,81	$C_3H_6O_2$
580398	0,50	$C_4H_3O_2$
1532754	1,32	$C_5H_6O_2$
92990	0,08	$C_6H_{10}O_3$
319228	0,27	$C_5H_5N_2O$

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
348191	0,30	C_6H_5OH
992193	0,85	$C_7H_{12}O$
534310	0,46	$C_6H_8O_2$
669820	0,57	C_6H_5OH
325041	0,28	$C_6H_8O_3$
2167789	1,86	$C_6H_5OCH_3$
511563	0,44	$C_3H_5CH(OH)$
685485	0,59	$C_6H_{10}O_5$
1661769	1,43	C_5H_7NO
2743074	2,35	C_7H_7OH
698023	0,60	$C_8H_{10}O_2$

Результаты газохроматографического анализа при температуре 400°C показали основной выход фенольных соединений из образцов. Основными компонентами гваяцильной группы стали: о-Метоксифенол, 2-Метокси-4-этилфенол, 2-Метокси-4-винилфенол и 2-Метокси-4-(2-пропенил), у осадка сточных вод дополнительно наблюдался выход 2-Метокси-4-метила, 2,6-Диметоксифенола [106, 107].

Таблица 2.10 - Пиролиз КДТ при 500 °С

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
2524162	9,60	$C_7H_8O_2$
1696121	6,45	$C_8H_{10}O_2$
644451	2,45	C_7H_8
17614786	66,99	H_2O
350610	1,33	C_9H_{18}
260816	0,99	C_8H_{16}
239491	0,91	$C_{23}H_{46}$
234371	0,89	$C_6H_{10}O$

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
228084	0,87	$C_{22}H_{42}O_2$
215911	0,82	$C_{18}H_{36}$
194451	0,74	$C_{10}H_{20}$
187798	0,71	$C_{16}H_{34}$
184895	0,70	$C_{15}H_{32}$
176631	0,67	$C_{12}H_{24}$
168304	0,64	$C_{20}H_{38}$
163401	0,62	$C_{21}H_{44}$
145603	0,55	$C_{14}H_{28}$
143456	0,55	$C_{18}H_{38}$
148865	0,57	$C_{16}H_{32}$
137905	0,52	$C_{22}H_{42}$
137905	0,52	$C_{17}H_{36}$
201425	0,77	$C_{10}H_{22}$
155600	0,59	$C_{13}H_{28}$
107899	0,41	$C_{28}H_{58}$

Таблица 2.11 - Пиролиз ОСВ при 500 °С

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
1205475	2,93	C_3H_6
923854	2,24	CH_3OH
21977103	53,34	H_2O
467391	1,13	C_5H_6
197990	0,48	C_5H_8
131207	0,32	C_6H_{14}
310631	0,75	C_6H_{12}
246202	0,60	C_6H_{14}
352875	0,86	C_4H_5O

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
134669	0,33	C ₆ H ₈
75525	0,18	C ₅ H
236847	0,57	C ₆ H ₆
167245	0,41	C ₇ H ₁₄
179676	0,44	C ₇ H ₁₆
1572351	3,82	C ₇ H ₈
139405	0,34	C ₈ H ₁₈
446944	1,09	C ₈ H ₁₀
132238	0,32	C ₈ H ₈
291243	0,71	C ₈ H ₁
120215	0,29	C ₉ H ₂₀
52511	0,13	C ₉ H ₁₂
544142	1,32	C ₆ H ₅ OH
163461	0,40	C ₁₀ H ₂₀
196282	0,48	C ₉ H ₁₂
130847	0,32	C ₁₁ H ₂₄
103773	0,25	C ₉ H ₁₂
77901	0,19	C ₉ H ₈
429997	1,04	C ₆ H ₅ O
750352	1,82	C ₆ H ₅ OH
536631	1,30	C ₆ H ₅ OH
45233	0,11	C ₁₁ H ₂₄

Пиролиз при температуре 500°C характеризуется большим выходом ациклических периодических и непериодических углеводородов – алкенов и алканов, при этом у обоих образцов наблюдался значительный выход 4-Метоксифенола и толуола, содержащегося в сосновой смоле, значительно уменьшался выход кислот, фенольных соединений и спиртов [108, 109].

Таблица 2.12 - Пиролиз КДТ при 600 °С

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
19820068	99,16	H ₂ O
168319	0,84	C ₆ H ₆

Таблица 2.13 - Пиролиз ОСВ при 600 °С

Площадь пика, а.е.м./с	Площадь пика, %	Химическая формула
239090	1,6	CO ₂
181392	1,21	HCN
13658925	91,2	H ₂ O
287611	1,92	C ₆ H ₆
213725	1,43	C ₇ H ₈

Результатом анализа продуктов пиролиза осадка и кородревесного топлива при температуре 600°С стал выход бензола – простейшего ароматического углеводорода. У осадка сточных вод дополнительно наблюдался выход цианистого водорода (синильной кислоты), являющегося крайне ядовитым веществом [110].

Анализ данных, представленных в таблицах 2.4–2.13, позволяет сделать вывод о существенных различиях в составе продуктов пиролиза между образцами осадка сточных вод и кородревесного топлива. Летучие у древесного топлива обладают более высокой теплотой сгорания за счёт фуранов, фенолов, насыщенных углеводородов. Максимальная теплота сгорания летучих у КДТ была при температуре 500 °С – за счет роста доли алканов и алкенов. Теплота сгорания летучих у ОСВ будет ниже, чем у древесного топлива за счет большего количества гетероатомных соединений. Также стоит отметить, что при всех температурах пиролиза выход летучих веществ у осадка сильно сдвигался во времени.

Выводы по главе 2

1. Получены теплотехнические характеристики кородревесного топлива и осадка сточных вод. Результаты показали, что осадок сточных вод обладает высокой зольностью, высокой теплотой сгорания органической части и высокой

реакционной способностью, а лиственное кородревесное топливо обладает более высокой энергетической ценностью, чем хвойное.

2. Получен элементный состав кородревесного топлива и осадка сточных вод. Результаты показали, что осадок сточных вод содержит много кальция и серы. Анализ кородревесного топлива показал высокое содержание щелочных элементов. Расчеты индексов шлакования показали, что зола осадка и кородревесного топлива будет негативно сказываться на работе поверхностей нагрева.

3. Получен механизм термического разложения основных органических компонентов кородревесного топлива и осадка сточных вод. Выявлены температурные диапазоны сушки, выхода летучих и сгорания углерода осадка и кородревесного топлива в инертной и воздушной средах. Максимальная скорость выхода летучих зафиксирована у кородревесного топлива в воздушной среде. Максимальная скорость выхода летучих у осадка была в инертной среде, а температура максимального выхода сдвигается на 50 °С по сравнению с осадком.

4. Проведены морфологические исследования осадка сточных вод. Исследования показали, что исходная структура осадка — рыхлая, пористая, с аморфными хлопьями и кристаллическими включениями. Высушенный осадок обладал развитой пористой структурой, которая обуславливает его высокие адсорбционные свойства.

5. Получены данные по сжиганию осадка сточных вод в горизонтальной печи, показавшие, что при температуре сжигания 600 °С значительно вырастает количество выбросов СО и углеводородов.

6. Получены газовые компоненты, образующиеся в процессе термодеструкции кородревесного топлива и осадка сточных вод. Летучие КДТ имеют более высокую теплоту сгорания благодаря фуранам, фенолам и углеводородам. У осадка теплота сгорания ниже из-за гетероатомных соединений, а выделение летучих сильно смещено во времени.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КОТЛОАГРЕГАТОВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Для увеличения энергетической эффективности использования вторичных энергоресурсов в Архангельском энергорайоне были проведены исследования установок, сжигающих вторичные энергоресурсы – котельных агрегатов с кипящим слоем, установленных на АО Архангельском ЦБК. Исследования проводились на трех котельных установках: Е-83,5-9,8-540 ДФ установленном на ТЭС-1 Архангельского ЦБК, Е-75-3,9-440 ДФТ и КМ75-40М установленных на энерготехнологической станции ТЭС-3 Архангельского ЦБК. На ТЭС-1 котельный агрегат работает совместно с котельными агрегатами, сжигающими каменный уголь и природный газ для получения электроэнергии, пара и горячей воды. На ТЭС-3 котельные агрегаты работают совместно с содорегенерационными котлами для получения пара и электроэнергии. В котельных агрегатах КМ75-40М и Е-75-3,9-440 ДФТ сжигается смесь из лиственного или хвойного кородревесного топлива (75% смеси) с осадком сточных вод (25% смеси). В котельном агрегате Е-83,5-9,8-540 ДФ сжигается смесь из хвойного (55% смеси) и лиственного (30%) кородревесного топлива с осадком сточных вод (25% смеси).

Цель исследований заключалась в том, чтобы:

1. Определить показатели энергоэффективности котельных агрегатов с кипящим слоем при сжигании осадка сточных вод и кородревесного топлива;
2. Оценить надежность и стабильность работы котлов с кипящим слоем в условиях разных теплотехнических характеристик топлива;
3. Проанализировать эксплуатационные параметры котельных агрегатов с кипящим слоем при сжигании осадка сточных вод и кородревесного топлива;
4. Предложить технические мероприятия по увеличению надежности и эффективности работы котельных с кипящим слоем при сжигании осадка сточных вод и кородревесного топлива.

Обследования проводились при установившемся тепловом и

аэродинамическом режиме работы котлов. Параметры работы котлов при исследованиях были постоянными. В течении 4 рабочих смен (2 дня) до начала обследований котельные агрегаты предварительно нагружали до того уровня мощности, на котором планировалось проводить основное испытание. Это позволяло стабилизировать тепловой режим работы оборудования, вывести его на заданные параметры и минимизировать влияние переходных процессов при последующих измерениях. За 3 часа до старта исследований выполнялась плановая обдувка поверхностей нагрева котла. В ходе самих обследований параметры работы котлов фиксировались с использованием штатных стационарных средств измерения: эксплуатационных расходомеров и термопар. Обследования выполнялись согласно требованиям нормативных документов по энергетическим обследованиям [111, 112].

3.1 Теплотехнические показатели кородревесного топлива и осадка сточных вод во время исследования котельных агрегатов

Сжигание отходов целлюлозно-бумажного производства сталкивается с комплексом ограничений. В первую очередь это высокая влажность рабочей массы, которая у КДТ достигает 48,8–53,3 %. Дополнительным осложняющим фактором выступает неоднородность гранулометрического состава, которая ведёт к неравномерному распределению топлива в топочном пространстве. Для кородревесного топлива большое значение играет тип используемой в целлюлозном производстве щепы (хвойная или лиственная), поскольку от него зависят элементарный состав, плотность и исходная влажность материала. В случае осадка сточных вод важен уровень зольности, определяющий как энергетическую ценность топлива, так и влияние его золы при сжигании.

Основные теплотехнические характеристики осадка сточных вод и кородревесного топлива, отобранных в процессе исследований котлов представлены в таблицах 3.1-3.3.

Таблица 3.1 – Характеристики сжигаемого топлива при проведении исследований котлоагрегатов Е-75-3,9-440 ДФТ и КМ75-40

Параметр	КДТ хвойное	КДТ лиственное	ОСВ
Влажность в рабочем состоянии, %	53,7	48,8	71,97
Зольность сухого состояния, %	3,9	1,8	26,06
Низшая теплота сгорания рабочего состояния, кДж/кг	7825	9210	2746

Таблица 3.2 – Характеристики сжигаемого топлива при проведении исследования котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ

Параметр	КДТ лиственные	ОСВ
Влажность топлива в рабочем состоянии, %	53,95	75,97
Зольность сухого состояния, %	1,72	17,98
Низшая теплота сгорания рабочего состояния, кДж/кг	8426	1843

Таблица 3.3 – Характеристики сжигаемого топлива при проведении исследований котлоагрегата Е-83,5-9,8-540 ДФ

Параметр	70% хвойного КДТ + 30% лиственного КДТ	ОСВ
Влажность топлива в рабочем состоянии, %	46,08	70,21
Зольность сухого состояния, %	1,81	21,56
Низшая теплота сгорания рабочего состояния, кДж/кг	9180	2185

Зольность осадка при исследованиях была несколько ниже, чем у осадка в главе 2. Это связано с его двухкомпонентной структурой. Теплота сгорания осадка

в зависимости от исследований также сильно отличалась. Теплотехнические характеристики кородревесного топлива схожи с результатами главы 2.

3.2 Паровой котел Е-75,39-440 ДФТ

Е-75-3,9-440 ДФТ предназначен для получения перегретого пара среднего давления при совместной энергетической утилизации осадка сточных вод в смеси с кородревесным топливом по технологии псевдооживления. Топка ($6,35 \times 5,85 \times 17,95$ м, сечение $37,14 \text{ м}^2$) включает воздухораспределительную решётку «НУВЕХ» и слой кварцевого песка (60 т), состоящий из активной и пассивной зоны. Рабочая температура кипящего слоя — $750\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$ (в эксплуатации поддерживается на уровне $770\text{--}830 \text{ }^\circ\text{C}$); контроль осуществляют четыре двухуровневые термопары.

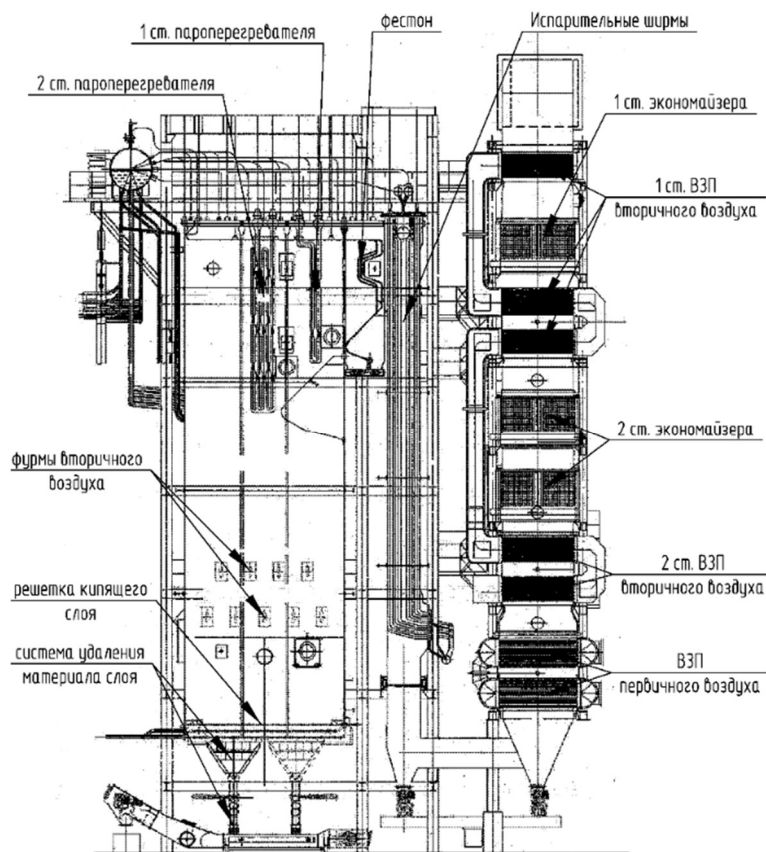


Рисунок 3.1 –Котлоагрегат Е-75-3,9-440 ДФТ

Рабочая высота слоя — $600\text{--}700$ мм; решётка выполнена из водоохлаждаемых труб (шаг $304,8$ мм). Первичный воздух подаётся в топку через воздухораспределительную решётку и сопла. Вторичный и третичный воздух

подаются в надслоевое пространство через регулируемые сопла на боковых стенах топки. Котел введен в эксплуатацию в 2005 году.

Дымовые газы последовательно проходят пароперегреватель и фестон, затем испарительные ширмы во втором газоходе, далее — экономайзер и воздухоподогреватели в конвективном газоходе. Под решёткой кипящего слоя расположены четыре воронки, образующие газоплотную подовую конструкцию; неизолированные воронки оснащены трубами для отвода крупной фракции отработанного материала слоя.

3.2.1 Результаты исследования работы котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании листовенного кородревесного топлива с осадком сточных вод

Целью исследований является определение показателей энергоэффективности (производительности, КПД) котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании осадка сточных вод и листовенного кородревесного топлива, оценка надежности и стабильности его работы, анализ ключевых эксплуатационных параметров котла, а также разработка технических мероприятий по увеличению его надежности и энергоэффективности. В таблице 3.4 представлены результаты исследования котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ.

Таблица 3.4 Результаты обследования котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании листовенного кородревесного топлива и осадка сточных вод

Параметр	Ед. изм.	Значение
Пароводяной тракт:		
Паропроизводительность	т/ч	75
Давление перегретого пара	МПа	3,4
Температура перегретого пара	°С	423
Температура питательной воды	°С	105
Газовоздушный тракт:		

Параметр	Ед. изм.	Значение
Расход первичного воздуха	м ³ /с	11,86
Температура первичного воздуха	°С	273
Расход вторичного воздуха	м ³ /с	20,00
Температура вторичного воздуха	°С	318
Температура воздуха на всас вентилятора первичного воздуха	°С	73
Температура воздуха на всас вентилятора вторичного воздуха	°С	26
Доля дымовых газов рециркуляции	%	10
Доля воздуха на ожигение кипящего слоя	%	0,35
Содержание кислорода на выходе из топки	%	3,91
Разрежение в топке	Па	50
Температура дымовых газов:		
До пароперегревателя 2 ст.	°С	739
До пароперегревателя 1 ст.	°С	619
До испарительных ширм	°С	510
До ВЗП первичного воздуха	°С	395
До 2 ст. ВЗП вторичного воздуха	°С	353
До 2 ст. водяного экономайзера	°С	298
До 1 ст. ВЗП вторичного воздуха	°С	205
До 1 ст. водяного экономайзера	°С	182
До 1 ст. ВЗП вторичного воздуха	°С	175
До электрофилтра	°С	171
После электрофилтра	°С	158
Перепад давления на электрофилтре	Па	240
Объем уходящих дымовых газов	м ³ /с	30,65
Влажность дымовых газов	г/м ³	152

Параметр	Ед. изм.	Значение
Скорость газов	м/с	12,2
Температура кипящего слоя в точках:		
Точка 1	°С	796
Точка 2	°С	797
Точка 3	°С	745
Точка 4	°С	754
Точка 5	°С	723
Точка 6	°С	723
Точка 7	°С	784
Точка 8	°С	778
Потери тепла:		
С уходящими газами	%	13,85
С химическим недожогом	%	0,59
С механическим недожогом	%	0,01
С наружным охлаждением	%	0,80
КПД брутто	%	84,75

При сжигании смеси топлива из осадка сточных вод и листового кородревесного топлива (таблица 3.4) при номинальной паропроизводительности 75 т/ч перегретого пара доля воздуха (без учета дымовых газов рециркуляции), подаваемого на ожижение кипящего слоя, составила 35 % (11,86 м³/с). Такой режим работы кипящего слоя (газификация) является недостаточным для полного сгорания топлива непосредственно в слое. Дожигание продуктов газификации и неполного сгорания достигается за счёт подачи вторичного и третичного воздуха (20,00 м³/с) в надслоевое пространство.

Анализ температурного поля кипящего слоя выявил существенную неравномерность распределения температуры по зонам котла. В частности, в контрольных точках Т. 3, Т. 4, Т. 5 и Т. 6 зафиксированы температуры, которые на 67–74 °С ниже, чем в остальных измерительных точках.

Причины выявленной неоднородности - неравномерное распределение топливной смеси по кипящему слою. Топливо, поступающее из питателей, концентрируется в передней части слоя (точки Т. 1, Т. 2, Т. 7, Т. 8), что приводит к локальному перегреву этих зон и дефициту топлива в задней части. Низкий расход топлива в заднюю часть слоя сильно влияет на основной параметр работы слоя – кипение, так как в задней части слоя будет образовываться меньшее количество продуктов газификации, помогающих эффективному образованию в слое “пузырьков”. Также в процессе эксплуатации новый кварцевый песок добавляется исключительно в левую переднюю часть слоя, практически не попадая в правую заднюю область (точки Т. 5, Т. 6).

Исследование котла показало, что он эффективно утилизирует осадок сточных вод и листовое кородревесное топливо, однако существуют некоторые проблемы. Общий КПД брутто котлоагрегата составил 84,75 % (проектное значение – 86,16%). Снижение КПД от проектного значения обусловлено добавлением в первичный воздух дымовых газов рециркуляции. Для увеличения энергетической эффективности котельного агрегата целесообразно: увеличить количество топлива, доходящего до задней части кипящего слоя (до достижения равномерной температуры по слою), ограничить и автоматизировать использование дымовых газов рециркуляции из-за снижения КПД котельного агрегата.

3.2.2 Результаты исследования работы котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании хвойного кородревесного топлива с осадком сточных вод

Целью исследований является определение показателей энергоэффективности (производительности, КПД) котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании осадка сточных вод и хвойного кородревесного топлива, оценка надежности и стабильности его работы, анализ ключевых эксплуатационных параметров котла, а также разработка технических мероприятий по увеличению его надежности и энергоэффективности.

При исследовании работы котельного агрегата обнаружено, что существенно различаются параметры работы газоздушного тракта и кипящего слоя при работе на разных видах кородревесного топлива (таблица 3.5).

Таблица 3.5 Результаты обследования котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании хвойного кородревесного топлива и осадка сточных вод

Параметр	Ед. изм.	Значение
Пароводяной тракт:		
Паропроизводительность	т/ч	75
Давление перегретого пара	МПа	3,4
Температура перегретого пара	°С	407
Температура питательной воды	°С	105
Газовоздушный тракт:		
Расход первичного воздуха	м ³ /с	17,69
Температура первичного воздуха	°С	256
Расход вторичного воздуха	м ³ /с	20,55
Температура вторичного воздуха	°С	315
Температура воздуха на всас вентилятора первичного воздуха	°С	23
Температура воздуха на всас вентилятора вторичного воздуха	°С	25
Доля дымовых газов рециркуляции	%	0
Доля воздуха на ожижение кипящего слоя	%	0,46
Содержание кислорода на выходе из топки	%	5,10
Разрежение в топке	Па	50
Температура дымовых газов:		
До пароперегревателя 2 ст.	°С	701
До пароперегревателя 1 ст.	°С	598
До испарительных ширм	°С	492

Параметр	Ед. изм.	Значение
До ВЗП первичного воздуха	°С	374
До 2 ст. ВЗП вторичного воздуха	°С	321
До 2 ст. водяного экономайзера	°С	280
До 1 ст. ВЗП вторичного воздуха	°С	197
До 1 ст. водяного экономайзера	°С	179
До 1 ст. ВЗП вторичного воздуха	°С	169
До электрофильтра	°С	163
После электрофильтра	°С	149
Перепад давления на электрофильтра	Па	290
Объем уходящих дымовых газов	м ³ /с	34,70
Влажность дымовых газов	г/м ³	155
Скорость газов	м/с	13,7
Температура кипящего слоя в точках:		
Точка 1	°С	765
Точка 2	°С	763
Точка 3	°С	723
Точка 4	°С	727
Точка 5	°С	704
Точка 6	°С	704
Точка 7	°С	771
Точка 8	°С	751
Потери тепла:		
С уходящими газами	%	14,32
С химическим недожогом	%	0,78
С механическим недожогом	%	0,01
С наружным охлаждением	%	0,82
КПД брутто	%	84,07

При сжигании хвойного древесного топлива отличающегося более высокой зольностью и влажностью происходило снижение температуры кипящего слоя и температур по газовому тракту котла. Это связано с тем, что при увеличении расхода топлива из-за пониженной теплоты сгорания хвойного кородревесного топлива увеличивалась доля первичного воздуха (до 46%) в кипящий слой, отключалось подмешивание дымовых газов рециркуляции в первичный воздух. Избыток воздуха в слое изменялся незначительно – снижение кислорода в слое из-за увеличенного расхода топлива компенсировалось увеличением доли первичного воздуха и содержанием в нем кислорода. При этом увеличение КПД котельного агрегата и снижение температур по котлу происходили из-за отсутствия дымовых газов рециркуляции.

Снижение средней температуры кипящего слоя (реагирующих веществ в кипящем слое) до 738 °С при работе котельного агрегата снизило вероятность образования агломератов минеральной части топлива и частиц материала слоя (кварцевый песок). Однако температура слоя ниже 750 °С чревата ростом выбросов полихлорированных дибензодиоксинов (ПХДД) и полихлорированных дибензофуранов (ПХДФ) [111, 112, 113, 114].

Распределение температурного поля в слое было неравномерным: по фронтальной части кипящего слоя (точки 1,2,7,8) температура была выше на 40-50 °С чем в задней части (точки 3,4,5,6). Это связано с неравномерностью распределения топлива по слою. Температура верхней части слоя в передней части была ниже на 20 °С (в правой части) и на 2 °С (в левой части), чем температура нижней части. Согласно термическим анализам топлива, выполненным в главе 2, процесс сгорания осадка (раздел 2.5) и кородревесного топлива (термограммы на рисунках 2.5 и 2.6) происходит в три этапа. Попадая в верхнюю часть кипящего слоя часть его теплоты тратится на испарение большого количества влаги содержащейся в топливной смеси. Это приводит к снижению температуры верхней части слоя. Далее по мере продвижения топлива в глубь слоя начинается процесс активного выхода летучих кородревесного топлива (рисунок 2.5), их контакта с первичным

воздухом и образование пузырьков газа интенсифицирующих кипение слоя. Активный выход летучих из осадка начинается позже, чем у КДТ (рисунок 2.4), что приводит к тому, что подсушенный осадок за счет высокой реакционной способности (согласно разделу 2.4) резко интенсифицирует кипение в глубине слоя. В самую нижнюю часть кипящего слоя, где содержится наибольшее количество кислорода, преимущественно попадает уже кокс. Это говорит о том, что температуры слоя разнятся как по профилю слоя, так и по его сечению и зависит от равномерности распределения топлива и его термических характеристик.

Общий КПД брутто котлоагрегата при испытании составил 84,07 %. Это значение оказалось ниже, чем при сжигании лиственного кородревесного топлива в смеси с осадком сточных вод. Таким образом, режим сжигания хвойных древесных отходов требует тщательной настройки параметров: расхода первичного и вторичного воздуха для обеспечения приемлемого КПД и поддержания оптимальной температуры слоя для соблюдения экологических нормативов по выбросам.

3.2.3 Результаты комплексного исследования котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании лиственного кородревесного топлива с осадком сточных вод

Целью исследования работы котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ было получение комплексных данных о его работе на смеси из лиственной коры и осадка сточных вод. Рассмотрены основные показатели, характеризующие работу газоздушного, пароводяного трактов и кипящего слоя, а также проблемы, возникающие при длительной эксплуатации котельного агрегата.

Прежде всего, анализ состава осадка (таблица 3.6) показал высокое содержание ряда элементов: кальция, кремния, алюминия, фосфора, а также щелочных металлов — натрия и калия. Эти особенности химического состава

могут влиять на процессы горения и шлакообразования при использовании осадка в качестве компонента топлива.

Испытания проводились в режиме пузырькового кипящего слоя, доля осадка сточных вод в смеси составляла 25 %. По итогам двух испытаний КПД котла был 83,5–84,0 %, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности работы агрегата.

Таблица 3.6 Результаты элементного анализа осадка сточных вод, %.

C	H	N	O	S	Cl	Cu
35,600	6,100	2,400	50,500	0,830	0,200	0,004
Cr	Mn	Ti	Zn	Sr	Al	P
0,002	0,080	0,017	0,031	0,011	0,508	0,245
V	Mg	Si	K	Ca	Na	Fe
0,004	0,154	0,661	0,104	2,170	0,260	0,256

Обследование пароводяного тракта представлено в таблице 3.7. Температура питательной воды была 105 °С. Нагрев воды дымовыми газами в ВЭ 1-й ступени и конденсаторе СН был 24 °С и 21 °С соответственно, после 2-й ступени ВЭ температура повышалась на 55-57 °С. При этом важно отметить, что парообразование в экономайзере отсутствовало, что соответствует проектным характеристикам работы водяного тракта.

После 1-й ступени пароперегревателя температура пара составила 168–173 °С, а после 2-й ступени снизилась до 109–110 °С. Впрыскивающий пароохладитель, размещённый между 1-й и 2-й ступенями пароперегревателя, обеспечил снижение температуры пара на 87–95 °С.

Таблица 3.7 Результаты обследования пароводяного тракта Е-75-3,9-440 ДФТ

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Паропроизводительность	т/ч	60	62
Давление перегретого пара	МПа	3,6	3,6
Температура перегретого пара	°С	420	422

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Расход питательной воды	т/ч	65	66
Температура питательной воды	°С	105	105
Температура питательной воды после конденсатора	°С	118	115
Температура питательной воды после 1 ст. водяного экономайзера	°С	129	126
Температура питательной воды после 2 ст. водяного экономайзера	°С	186	181
Температура насыщенного пара в барабане	°С	232	232
Температура перегретого пара после 1 ст. пароперегревателя	°С	405	400
Температура перегретого пара после пароохладителя	°С	310	313

В таблице 3.8 представлены результаты мониторинга параметров газовоздушного тракта котла.

Доля первичного воздуха находилась в диапазоне 41–45 %. Кипящий слой работал в режиме газификации. Однако были выявлены отклонения параметров газовоздушного от режимных значений. В ходе исследований зафиксировано, что, нагрев вторичного воздуха во втором блоке воздухоподогревателя второй ступени был 10 °С при проектном значении 40 °С. В результате температура вторичного воздуха оказалась на 40 °С ниже регламентированного уровня. В конвективных газоходах наблюдались значительные температурные развёртки. В дальнейшем выявлено, что температура дымовых газов по правой стороне сильно отличалась, а дымосос котельного агрегата был максимально нагружен.

Согласно рассчитанным во 2 главе индексам прогнозирования осаждения (таблица 2.3), зола осадка и кородревесного топлива приводит к сильному шлакованию и загрязнению поверхностей нагрева летучей золой. Во время осмотра котла после исследования подтверждено шлакование правой стороны переходного газохода (между 2-м и 3-м газоходами) и правой воронки под

испарительными ширмами. Причиной послужило явление цементирования золы, спровоцированное повышенной влажностью дымовых газов (из-за высокой влажности топливной смеси), наличием свища на испарительных ширмах, возникшего вследствие эрозионного износа золой осадка. Также зафиксировано интенсивное шлакование конвективных поверхностей нагрева. Это стало причиной того, что водяной экономайзер не нагревал питательную воду до минимально допустимого уровня (190 °С), а воздухоподогреватель не обеспечивал требуемый нагрев первичного и вторичного воздуха, что приводило к снижению температур кипящего слоя и надслоевого пространства.

Таблица 3.8 Результаты обследования газовоздушного тракта Е-75-3,9-440 ДФТ

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Расход первичного воздуха	м ³ /с	15,77	13,39
Температура первичного воздуха	°С	205	213
Расход вторичного воздуха	м ³ /с	18,89	18,89
Температура вторичного воздуха после калорифера	°С	84	83
Температура вторичного воздуха после 1 секции ВЗП 1 ступени	°С	152	152
Температура вторичного воздуха после 2 секции ВЗП 1 ступени	°С	162	164
Температура вторичного воздуха после ВЗП 2 ступени	°С	261	265
Температура воздуха на всас вентилятора первичного воздуха	°С	23	49
Температура воздуха на всас вентилятора вторичного воздуха	°С	18	18
Расход дымовых газов рециркуляции	м ³ /с	0	2,67
Доля воздуха на ожижение кипящего слоя	%	0,45	0,41
Содержание кислорода на выходе из топки	%	8,0	7,8
Разрежение в топке (слева/справа)	Па	-0,4	-0,5

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Разрежение до испарительных ширм (слева/справа)	Па	-0,2	-0,6
Разрежение до ВЗП первичного воздуха (слева/справа)	Па	-10,0	-10,0
Разрежение до 2 ст. водяного экономайзера (слева/справа)	кПа	-2,50/-2,50	-2,50/-2,50
Разрежение до ВЗП вторичного воздуха (слева/справа)	кПа	-2,06/-2,50	-2,00/-2,50
Разрежение до 1 ст. водяного экономайзера (слева/справа)	кПа	-2,50/-2,50	-2,50/-2,50
Разрежение до электрофилтра	кПа	-2,50	-2,50
Разрежение после электрофилтра	кПа	-3,73	-3,76
Температура дымовых газов:			
До пароперегревателя 2 ст. (слева/справа)	°С	650/697	687/719
До пароперегревателя 1 ст. (слева/справа)	°С	451/676	461/695
До испарительных ширм (слева/справа)	°С	651/565	649/579
До ВЗП первичного воздуха (слева/справа)	°С	453/451	460/457
До 2 ст. ВЗП вторичного воздуха (слева/справа)	°С	356/289	361/300
До 2 ст. водяного экономайзера (слева/справа)	°С	316/259	320/270
До 1 ст. ВЗП вторичного воздуха (слева/справа)	°С	240/219	243/223
До 1 ст. водяного экономайзера (слева/справа)	°С	210/189	218/194
До 1 ст. ВЗП вторичного воздуха (слева/справа)	°С	182/126	185/127
До электрофилтра	°С	171	173
После электрофилтра	°С	141	143

Результаты мониторинга параметров кипящего слоя (таблица 3.8). При

обследовании обнаружили, что в задней части котла дренируемые агломераты достигали размеров 200x300 мм (рисунок 3.2).

Мониторинг температурного режима кипящего слоя и визуальный осмотр донной золы показал неравномерность тепловых процессов в кипящем слое. Донная зола с фронта слоя содержала минимальное количество агломератов. В задней части слоя были обнаружены крупные агломераты.

Таблица 3.9 Результаты обследования кипящего слоя Е-75-3,9-440 ДФТ

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Температура кипящего слоя в точках (верхняя/нижняя термопара):			
Передняя левая воронка	°С	829/825	887/883
Задняя левая воронка	°С	806/810	873/877
Задняя правая воронка	°С	761/789	817/857
Передняя правая воронка	°С	804/824	881/884

Так как донная зола с котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ содержала большое количество агломератов, с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии выполнили элементный анализ образца донной золы отобранного в процессе обследования. Результаты элементного анализа представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 Результаты элементного анализа донной золы котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ

SO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	NiO	ZnO	MgO	Rb ₂ O
0,109	0,267	13,7	0,003	0,057	0,734	0,003
Cr ₂ O ₃	MnO	CuO	SrO	N	C	H
0,019	0,23	0,013	0,059	0,1	0,254	0,1
K ₂ O	TiO ₂	BaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
2,08	0,123	0,243	81,1	1,05		



Рисунок 3.2 Агломераты, обнаруженне в донной золе котлоагрегата Е-75-3,9-440
ДФТ

Комплексное исследование котельного агрегата показало, что сжигание осадка сточных вод приводит к заметному отклонению эксплуатационных параметров от расчётных значений. Причины отклонений: высокая влажность и повышенная зольность осадка, а также агломерация кипящего слоя.

3.3 Паровой котел КМ-75-40

КМ-75-40 стационарный, водотрубный, с естественной циркуляцией, с уравновешенной тягой, газоплотный, трехходовой по дымовым газам (рисунок 3.3). Топка, переходный горизонтальный газоход и опускной конвективный газоход составляют основной блок котла. Размеры топки составляют: ширина - 6,4 м, глубина - 5.8 м, высота—14 м. Поперечное сечение топки – 37,12 м².

Топка состоит из воздухораспределительной решетки, слоя активного инертного материала (30 тонн кварцевого песка), пассивного инертного материала (11,1 тонн кварцевого песка) и обмуровки. Температура слоя контролируется с помощью шести термопар, расположенных на одном уровне.

Воздух на охлаждение подаётся через воздухораспределительную решётку, вторичный — через регулируемые воздушные сопла на боковых стенах топки (над уровнем футеровки). Продукты сгорания последовательно проходят первую и вторую ступени пароперегревателя, фестон и конвективный газоход (с воздухоподогревателями первичного и вторичного воздуха и двухступенчатым

экономайзером. Решетка кипящего слоя изготовлена фирмой «Квернер Палпинг» и представляет собой мембранную панель, сваренную из поставочных блоков,

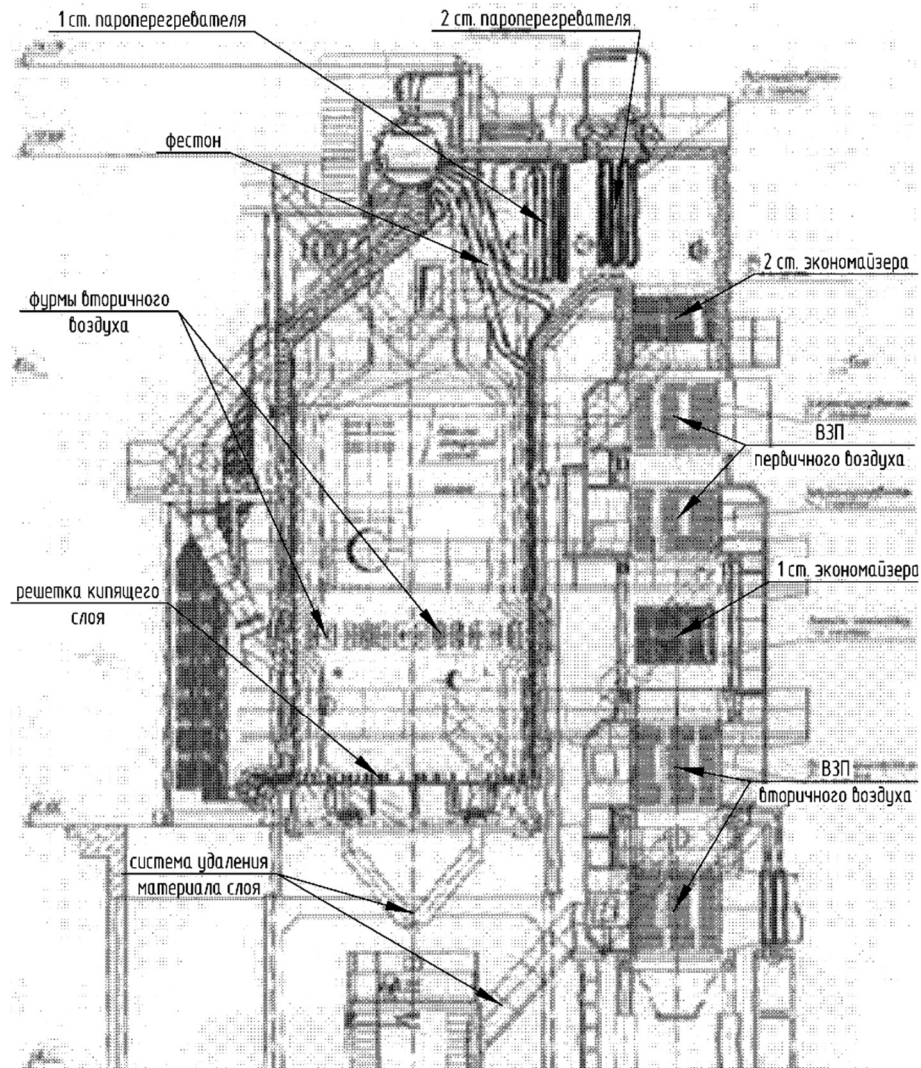


Рисунок 3.3 –Котлоагрегат КМ75-40М

3.3.1 Результаты исследования работы котельного агрегата КМ75-40 при сжигании листового кородревесного топлива с осадком сточных вод

Целью исследования работы котлоагрегата КМ75-40 было получение комплексных данных о его работе на смеси из листовенной коры и осадка сточных вод. Рассмотрены основные показатели, характеризующие работу газовоздушного, пароводяного трактов и кипящего слоя, а также проблемы, возникающие при эксплуатации котельного агрегата.

Таблица 3.11 Результаты обследования котлоагрегата КМ75-40М

Параметр	Ед. изм.	Значение
Паропроизводительность	т/ч	47
Давление перегретого пара	МПа	3,7
Температура перегретого пара после 2 ст.	°С	431
Температура перегретого пара после 1 ст.	°С	440
Температура питательной воды	°С	105
Расход первичного воздуха	м ³ /с	3,72
Температура первичного воздуха	°С	300
Расход вторичного воздуха	м ³ /с	13,05
Температура вторичного воздуха	°С	323
Температура воздуха на всас вентилятора первичного воздуха	°С	65
Температура воздуха на всас вентилятора вторичного воздуха	°С	64
Доля дымовых газов рециркуляции	%	66
Доля воздуха на ожижение кипящего слоя	%	0,22
Содержание кислорода на выходе из топки	%	3,4
Разрежение в топке	Па	40
Температура дымовых газов:		
До пароперегревателя 1 ст.	°С	847
До пароперегревателя 2 ст.	°С	745
До водяного экономайзера 2 ст.	°С	519
До ВЗП первичного воздуха	°С	401
До 1 ст. водяного экономайзера	°С	364
До ВЗП вторичного воздуха	°С	299
До электрофильтра	°С	208
После электрофильтра	°С	199

Параметр	Ед. изм.	Значение
Перепад давления на электрофилтра	Па	20
Объем уходящих дымовых газов	м ³ /с	28,92
Влажность дымовых газов	г/м ³	105
Скорость газов	м/с	11,2
Температура кипящего слоя в точках:		
Точка 1	°С	849
Точка 2	°С	854
Точка 3	°С	830
Точка 4	°С	830
Точка 5	°С	817
Точка 6	°С	817
Потери тепла:		
С уходящими газами	%	17,39
С химическим недожогом	%	1,12
С механическим недожогом	%	0,01
С наружным охлаждением	%	0,84
КПД брутто	%	80,64

Доля воздуха на ожижение кипящего слоя была 22 %. При этом большую часть первичного воздуха (66 %) составляли дымовые газы рециркуляции.

Распределение температуры по зонам кипящего слоя было равномерным: разница между показаниями в отдельных точках не превышала 27–37 °С. Это свидетельствует о качественном распределении топлива по слою. Высокое содержание рециркулируемых дымовых газов в первичном воздухе приводило к снижению концентрации кислорода в кипящем слое. В результате основная часть летучих веществ выгорала уже в надслоевом пространстве, что сопровождалось ростом температуры по газоходам котельного агрегата. При нагрузках значительно ниже проектных температура дымовых газов перед пароперегревателем

поднималась свыше 800 °С. При подготовке к обследованию не удалось обеспечить номинальную нагрузку котельного агрегата из-за повышения температуры наверху топки свыше 1000 °С. Так как топка котельного агрегата в высоту составляет всего 14 метров, выгорание летучих веществ в надслоевом пространстве растягивается. Результаты пиролитической газовой спектроскопии (раздел 2.6) и термогравиметрический анализ (раздел 2.3) показали, что процесс выхода летучих у кородревесного топлива начинается при относительно низких температурах, а летучие обладают высокой теплотой сгорания. Для увеличения степени выгорания летучих и подавления факела в топке увеличивали давления вторичного воздуха в надслоевое пространство путем прикрытия сопел. Увеличение давления и расхода вторичного воздуха с целью его более эффективного смешивания с летучими веществами. Увеличение расхода вторичного воздуха на 7 % и увеличение его давления на 25% позволили снизить температуру на выходе из топки котла на 50 °С, а температуру перегретого пара после 1 ступени пароперегревателя на 30 °С.

Энергетическое обследование котлоагрегата КМ75-40М ст. № 2 подтвердило его способность стабильно сжигать топливную смесь, состоящую из листовенного кородревесного топлива и осадка сточных вод. КПД брутто составил 80,64 %, что ниже проектного значения (83,90 %).

Основной причиной снижения КПД от проектного уровня стала высокая доля рециркуляции дымовых газов. Данная технологическая мера применялась целенаправленно — для регулирования и снижения температуры материала в кипящем слое. Таким образом, энергоэффективность котельного агрегата снижается из-за необходимости снижения температуры слоя и исключения в нем процесса агломерации.

В период исследования было обнаружено большое количество агломератов в донной золе котла.

3.3.2 Результаты исследования работы котельного агрегата КМ75-40 при сжигании хвойного кородревесного топлива с осадком сточных вод

Целью исследования работы котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ было получение комплексных данных о его работе на смеси из хвойного кородревесного топлива и осадка сточных вод. Рассмотрены основные показатели, характеризующие работу газоздушного, пароводяного трактов и кипящего слоя, а также проблемы, возникающие при длительной эксплуатации котельного агрегата.

Таблица 3.12 Результаты обследования котлоагрегата КМ75-40М

Параметр	Ед. изм.	Значение
Паропроизводительность	т/ч	47
Давление перегретого пара	МПа	3,6
Температура перегретого пара после 2 ст.	°С	426
Температура перегретого пара после 1 ст.	°С	440
Температура питательной воды	°С	105
Расход первичного воздуха	м ³ /с	6,05
Температура первичного воздуха	°С	269
Расход вторичного воздуха	м ³ /с	14,16
Температура вторичного воздуха	°С	280
Температура воздуха на всас вентилятора первичного воздуха	°С	65
Температура воздуха на всас вентилятора вторичного воздуха	°С	63
Доля дымовых газов рециркуляции	%	54
Доля воздуха на ожигение кипящего слоя	%	0,30
Содержание кислорода на выходе из топки	%	4,5
Разрежение в топке	Па	35

Параметр	Ед. изм.	Значение
Температура дымовых газов:		
До пароперегревателя 1 ст.	°С	850
До пароперегревателя 2 ст.	°С	705
До водяного экономайзера 2 ст.	°С	477
До ВЗП первичного воздуха	°С	361
До 1 ст. водяного экономайзера	°С	327
До ВЗП вторичного воздуха	°С	257
До электрофильтра	°С	184
После электрофильтра	°С	179
Перепад давления на электрофильтре	Па	120
Объем уходящих дымовых газов	м ³ /с	30,16
Влажность дымовых газов	г/м ³	110
Скорость газов	м/с	12,1
Температура кипящего слоя в точках:		
Точка 1	°С	897
Точка 2	°С	878
Точка 3	°С	889
Точка 4	°С	870
Точка 5	°С	880
Точка 6	°С	891
Потери тепла:		
С уходящими газами	%	16,71
С химическим недожогом	%	1,23
С механическим недожогом	%	0,01
С наружным охлаждением	%	0,85
КПД брутто	%	81,20

Доля воздуха на ожигение кипящего слоя при сжигании осадка сточных вод и хвойного кородревесного топлива составляла 30 %. 54 % объёма первичного воздуха формировалось за счёт рециркуляции дымовых газов, а доля вторичного воздуха была 70 %. С увеличением подачи первичного воздуха (по сравнению с испытанием на лиственный КДТ) возрастала доля теплоты, передаваемой слою в результате выгорания летучих в слое инертного материала. Это, в свою очередь, приводило к повышению температуры слоя.

Энергетическое обследование котлоагрегата КМ75-40М ст. № 2 подтвердило его эффективную работу при сжигании смеси из хвойного кородревесного топлива и осадка сточных вод. Измеренный КПД брутто составил 81,20 %. Отклонение от проектного значения КПД обусловлено применением высокой доли рециркуляции дымовых газов. Данная технологическая мера целенаправленно использовалась для: регулирования температурного режима; снижения температуры материала в кипящем слое. Таким образом, компромисс между термической стабильностью процесса и энергетической эффективностью был сознательно смещён в пользу контроля температуры слоя, что позволило обеспечить безопасную и устойчивую эксплуатацию агрегата при заданных условиях сжигания топлива.

3.4 Паровой котел Е-83,5-9,8-540 ДФ

Е-83,5-9,8-540 ДФ (рисунок 3.4) котельный агрегат высокого давления с пузырьковым кипящий слоем, стационарный, водотрубный, с естественной циркуляцией, трехходовой по движению дымовых газов. Котел имеет три пароперегревателя, фестон, воздухоподогреватели первичного и вторичного воздуха, водяной экономайзер. Очистка дымовых газов на выходе из котла осуществляется в электрофилтре.

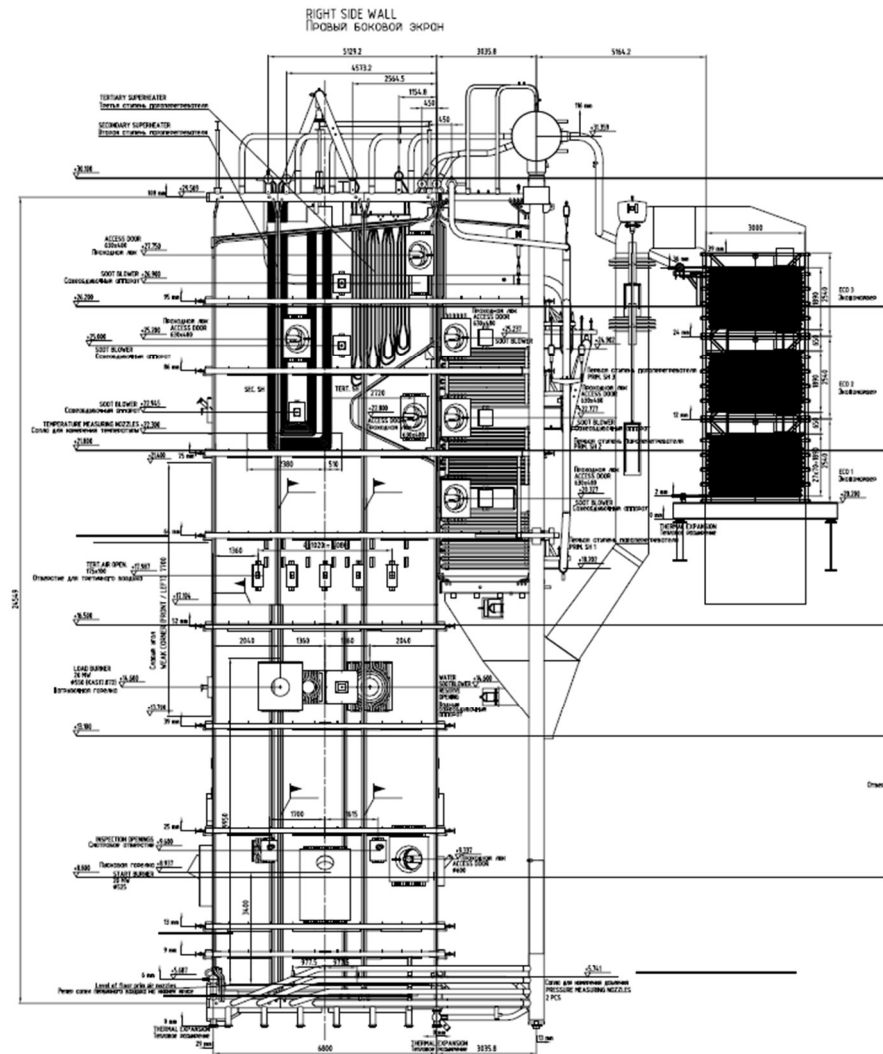


Рисунок 3.4 - Котлоагрегат Е-83,5-9,8-540 ДФ

3.4.1 Результаты исследования работы котельного агрегата Е-83,5-9,8-540 ДФ при сжигании кордревесного топлива с осадком сточных вод

В таблице 3.13 представлены результаты обследования пароводяных трактов котлоагрегатов Е-83,5-9,8-540 ДФ. Температура питательной воды, используемой на Е-83,5-9,8-540 ДФ по режимной карте составляет 215 °С, нагрев питательной воды в экономайзере во время обследования составлял 98 °С и 96 °С, при этом нагрев происходил до температуры насыщения воды при соответствующем давлении, уже в водяном экономайзере происходило частичное парообразование.

Перегрев пара у котлоагрегата Е-83,5-9,8-540 ДФ после 1 ступени пароперегревателя составлял 92 °С, после второй ступени 51-55 °С, после третьей ступени 68-77 °С.

Таблица 3.13 Результаты обследования пароводяного тракта Е-83,5-9,8-540 ДФ

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Паропроизводительность	т/ч	79	73
Давление перегретого пара	МПа	9,84	9,30
Температура перегретого пара	°С	534	525
Расход питательной воды	т/ч	81	75
Температура питательной воды	°С	215	214
Температура питательной воды после водяного экономайзера	°С	313	310
Температура насыщенного пара в барабане	°С	314	310
Температура перегретого пара после 1 ст. пароперегревателя	°С	406	402
Температура перегретого пара после 2 ст. пароперегревателя	°С	457	457

В таблице 3.14 представлены результаты мониторинга параметров газовоздушных трактов котла. Доля воздуха, идущего на ожигание слоя у Е-83,5-9,8-540 ДФ составляла 37-38%. Кипящий слой котла работал в режиме газификации топлива. Данный режим работы снижает образование оксидов азота, образующихся из азотистых соединений топлива.

Температуры воздуха на котлоагрегате Е-83,5-9,8-540 ДФ во время проведения испытаний были близки к номинальным. Однако температура уходящих дымовых газов после воздухоподогревателя была выше номинальной на 24-41 °С, температуры по остальным точкам газового тракта были близки к расчетным. Увеличение температуры уходящих газов связано с увеличением температуры воздуха после калорифера на 37-38 °С (первичный воздух) и на 39 °С (вторичный воздух). Стоит отметить тот факт, что эффективность работы воздухоподогревателя снижается вследствие его сильного загрязнения летучей золой. Также визуально отмечается сильное шлакование экранов топки.

Таблица 3.14 Результаты обследования газозвдушного тракта Е-83,5-9,8-540 ДФ

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Расход первичного воздуха	м ³ /с	11,1	10,9
Давление первичного воздуха	кПа	12,5	12,1
Температура первичного воздуха после ВЗП	°С	233	234
Температура первичного воздуха после калорифера	°С	82	83
Расход вторичного воздуха	м ³ /с	16,04	15,47
Расход третичного воздуха	м ³ /с	3,04	2,14
Температура вторичного воздуха после калорифера	°С	69	69
Температура вторичного воздуха после ВЗП	°С	224	224
Расход дымовых газов рециркуляции	м ³ /с	2,24	2,4
Доля воздуха на ожижение кипящего слоя	%	0,37	0,38
Содержание кислорода на выходе из топки (слева в центре/справа)	%	2,6/4,4/4,1	2,5/3,9/4,4
Разрежение в топке	кПа	-0,2	-0,16
Разрежение после 1 ст. пароперегревателя	кПа	-1,3	-1,22
Разрежение после водяного экономайзера	кПа	-1,47	-1,32
Разрежение после ВЗП	кПа	-2,44	-2,37
Разрежение после электрофильтра	кПа	-2,68	-2,83
Температура дымовых газов:			
После пароперегревателя 3 ст. (слева/справа)	°С	609/587	602/588
После пароперегревателя 1 ст. (слева/справа)	°С	473/474	468/472
После водяного экономайзера	°С	268/267	267/267
После ВЗП (слева/справа)	°С	190/196	189/194

Мониторинг температуры кипящего слоя (таблица 3.15) и визуальный осмотр донной золы котлоагрегата Е-83,5-9,8-540 ДФ показал, что температура в задней

части котла значительно выше, чем у передней. При визуальном осмотре работы кипящего слоя было видно, что задняя левая часть кипящего слоя ожигается хуже.

Таблица 3.15 Результаты обследования кипящего слоя Е-83,5-9,8-540 ДФ

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Температура кипящего слоя в точках:			
Передняя левая воронка	°С	865	848
Передняя правая воронка	°С	854	836
Задняя левая воронка	°С	914	899
Задняя правая воронка	°С	883	893
На высоте +30 мм	°С	619/847	627/844
На высоте +100 мм	°С	748/645	756/658
На высоте +300 мм	°С	869/874	864/855

3.4.2 Результаты комплексного исследования работы котельного агрегата Е-83,5-9,8-540 ДФ при сжигании кородревесного топлива с осадком сточных вод

Целью исследования работы котлоагрегата Е-83,5-9,8-540 ДФ было получение комплексных данных о его работе на смеси из лиственного и хвойного кородревесного топлива и осадка сточных вод. Рассмотрены основные показатели, характеризующие работу газовоздушного, пароводяного трактов и кипящего слоя, проблемы, возникающие при длительной эксплуатации котельного агрегата, а также выбросы вредных веществ при сжигании осадка сточных вод и кородревесного топлива.

Результаты двух исследований приведены в табл. 3.16. В данных опытах расход газов рециркуляции составлял 3,4–5,5 м³/с, температура «кипящего слоя» 819–878 °С, при этом большие значения соответствуют режиму с номинальной паропроизводительностью. Расход третичного воздуха немного превышал расход вторичного. Их объемные соотношения, выраженные в процентах, составляли

31,6/35,5 – опыт №1; 34,8/37,9 – опыт №2. Значения температур первичного и вторичного воздуха соответствовали рекомендуемым значениям.

В процессе промышленно-эксплуатационных испытаний котлоагрегата, проводился отбор проб КДТ и ОСВ, кварцевого песка, донной золы, а также летучей золы, отсепарированной в нижней части третьей конвективной шахты, в электрофильтре (ЭФ), и выбрасываемой через дымовую трубу в атмосферный воздух, в соответствии с [115, 116]. После предварительной подготовки и сокращения исследовался гранулометрический состав КДТ, инертной засыпки, донной золы и шлака, а также летучей золы с помощью ситового метода и анализатора Retzsch AS 200 Control. Для каждой фракции летучей золы, уловленной в ЭФ и выделенной в процессе ситового анализа, определялись содержание горючих веществ. Запыленность продуктов сгорания, выбрасываемых в атмосферу, определяли с применением метода внешней фильтрации [117]. При отборе, измерении и регулировании расхода дымовых газов, использовали аспирационное устройство «ОП-442 ТЦ», фильтродержатель АФА, пылегазоотборную трубку и др. Для частиц летучей золы, выбрасываемых в атмосферный воздух, выполнялись микроскопические исследования с помощью электронного растрового микроскопа Zeiss SIGMA VP с целью определения их структуры, размера, формы и количественного состава. При определении потерь тепла в окружающую среду использовались результаты тепловизионной съемки, выполненной тепловизором «Testo 885-2», позволяющим получить в реальном времени распределение температур на поверхности объекта с точностью $\pm 2\%$.

Таблица 3.16 - Результаты исследования эффективности работы котлоагрегата НУВЕХ фирмы Metso ст. №8 АО АЦБК

Наименование величины	Обознач., размерность	Е-83,5-9,8-540 ДФ	
		Опыт №1	Опыт №2
Паропроизводительность	D, т/ч	81,6	88,1
Рабочее давление перегретого пара	P _{п.п.} , МПа	9,1	8,90

Наименование величины	Обознач., размерность	Е-83,5-9,8-540 ДФ	
		Опыт №1	Опыт №2
Температура пара после 1-й/ 2-й/ 3-й ступеней пароперегревателя	$t_{п.п}, ^\circ\text{C}$	436/471/533	417/455/525
Влажность КДТ/ОСВ/смеси	$W'_i, \%$	50,4/79,09/57 ,21	49,46/79,09/56,5
Зольность КДТ/ОСВ/смеси	$A', \%$	1,09/1,97/1,3	1,09/1,97/1,3
Теплота сгорания КДТ/ОСВ/смеси	$Q'_i, \text{МДж/кг}$	7,97/2,03/6,5 7	8,54/2,03/7,00
Температура первичного воздуха	$t_{пер.в}, ^\circ\text{C}$	243	246
Температура вторичного воздуха	$t_{вт.в}, ^\circ\text{C}$	222	218
Температура КС на высоте 0,3 м от колпачков решетки, слева/справа	$t_{к.с}, ^\circ\text{C}$	819/846	878/877
Воздух, идущий на кипящий слой без учета газов рециркуляции	$q_{к.с}, \%$	32,9	27,3
Температура газов до и после первичного пароперегревателя	$\vartheta_{пп}/\vartheta'_{пп}, ^\circ\text{C}$	610/483	620/490
Температура газов до и после воздухоподогревателя	$\vartheta_{вп}/\vartheta_{ух}, ^\circ\text{C}$	271/191	275/195
Избыток воздуха после воздухоподогревателя	$\alpha_{ух}, -$	1,34	1,32
Потери тепла: с уходящими газами	$q_2, \%$	13,80	13,36
с химнедожогом	$q_3, \%$	0,01	0,01
с мехнедожогом	$q_4, \%$	0,12	0,12
от наружного охлаждения	$q_5, \%$	0,75	0,71
с физическим теплом шлака	$q_6, \%$	0,08	0,08
КПД котла брутто	$\eta_{бр}, \%$	85,24	85,73
Полный расход топливной смеси	$B, \text{т/ч}$	36,82	37,01
Разрежение в топке	$S_{т}, \text{Па}$	260	140

Наименование величины	Обознач., размерность	Е-83,5-9,8-540 ДФ	
		Опыт №1	Опыт №2
Сопротивление электрофильтра	$\Delta S_{эф}$, Па	290	360
Эмиссия NO_x	NO_x , мг/МДж	134	133
Эмиссия CO	CO, мг/МДж	15	14
Эмиссия SO_2	SO_2 , мг/МДж	19	17
Эмиссия HCl	HCl, мг/МДж	1,95	1,87
Эмиссия пыли	Пыль, мг/МДж	10,56	9,32

Для определения элементного состава компонентов топливной смеси, донной золы и шлака, а также летучей золы, уловленной в ЭФ, использовался спектрометр рентгенофлуоресцентный EDX-8000 и анализатор Euro EA-3000. Определение состава продуктов сгорания выполнялось с помощью электрохимического газоанализатора ДАГ-510 с учетом результатов, полученных после запуска стационарной системы контроля выбросов вредных веществ, которой оснащен данный котлоагрегат. Теплотехнические характеристики топливной смеси и ее компонентов определяли согласно ГОСТ Р 54186-2010, ГОСТ Р 54211-2010, ГОСТ Р 54185-2010 и ГОСТ Р 54184-2010. Удельную теплоту сгорания измеряли с помощью калориметрической бомбы ИКА С 2000 Basic Version 2 с жидкостным криотермостатом LOIP FT-216-25 в соответствии с ГОСТ 147-95. Обработка данных проводилась с помощью программно-методического комплекса [118].

Исследование эффективности (КПД и количество выбросов вредных веществ) при нагрузке 0,94–1,00 от номинальной было выполнено при сжигании смеси КДТ и ОСВ. В сжигаемой топливной смеси массовая доля ОСВ составляла около 0,24. В КДТ преобладали отходы обработки хвойных пород древесины (70 %), на лиственные – приходилось 30 %. КДТ имело высокую степень

неоднородности гранулометрического состава (коэффициент полидисперсности $n = 0,789$) и крупнодисперсный состав (коэффициент, характеризующий крупность состава $b = 1,3 \cdot 10^{-4}$; рисунок 3.5). Гранулометрический состав кварцевого песка, подаваемого в КС, был достаточно однородный (рисунок 3.6). Массовая доля частиц с размером $1,0 \leq x < 2,0$ мм составляла 0,85.

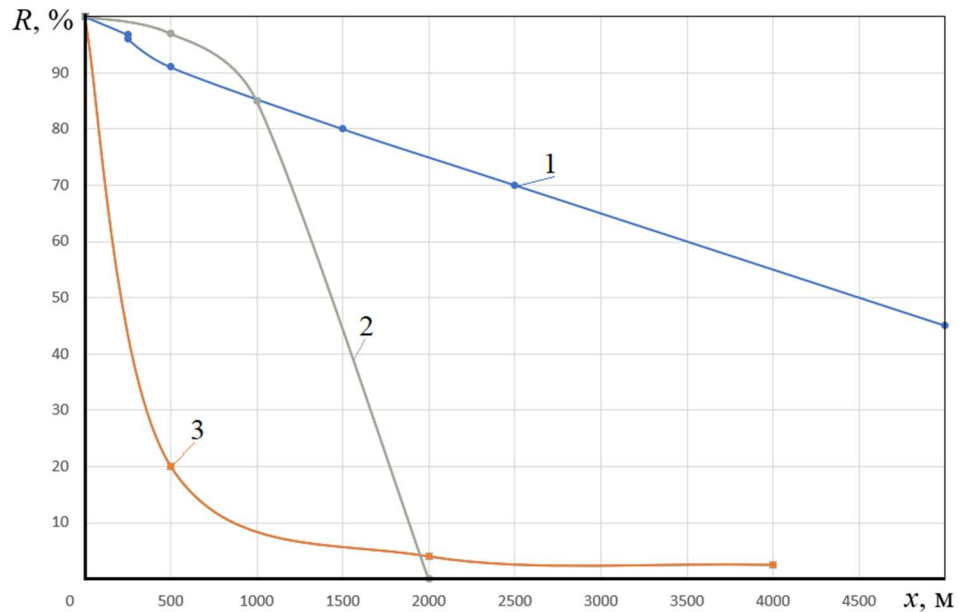


Рисунок 3.5 Интегральные зерновые характеристики: 1 – КДТ; 2 – кварцевый песок; 3 – донная зола

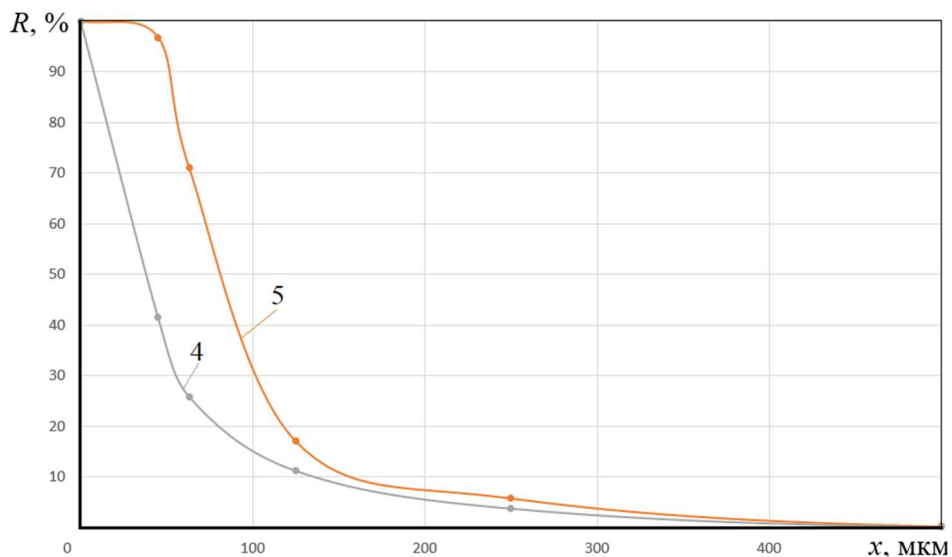


Рисунок 3.6 Интегральные зерновые характеристики: 4 – зола из-под 3-го газохода; 5 – зола из-под ЭФ

Содержание горючих веществ в летучей золе, уловленной в электрофильтре (ЭФ), составило 4,08 %, при этом она имела тонкодисперсный состав ($b = 9,16 \cdot 10^{-4}$; массовая доля частиц с размером менее 125 мкм – 82,92 %), что косвенно свидетельствует о высокой степени очистки в ЭФ. Пофракционное определение содержания горючих веществ показало, что определяющее влияние на потерю тепла с механической неполнотой сгорания оказывает недожог горючих компонент в частицах размером $45 \leq x < 125$ мкм (рисунок 3.8).

Отбор и гранулометрический анализ сепарируемой твердой фазы показал, что результатом данных процессов является повышение однородности твердой фазы. Значения коэффициента полидисперсности при этом изменялись следующим образом: 0,629 – летучая зола после третьего газохода и 1,344 – из-под ЭФ. Летучая зола из третьего газохода имела более высокое содержание горючих веществ (5,8 %).

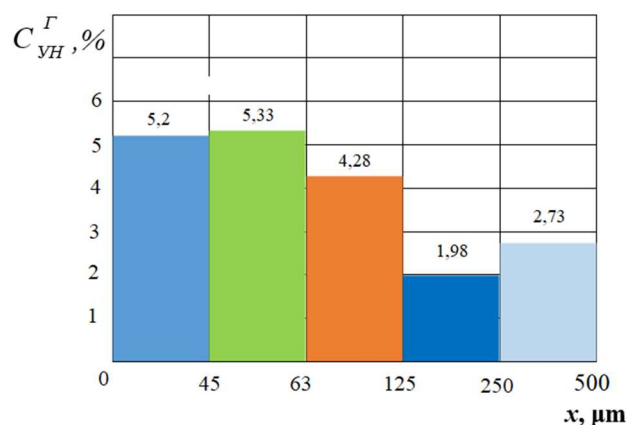


Рисунок 3.7 Пофракционное содержание горючих веществ в летучей золе

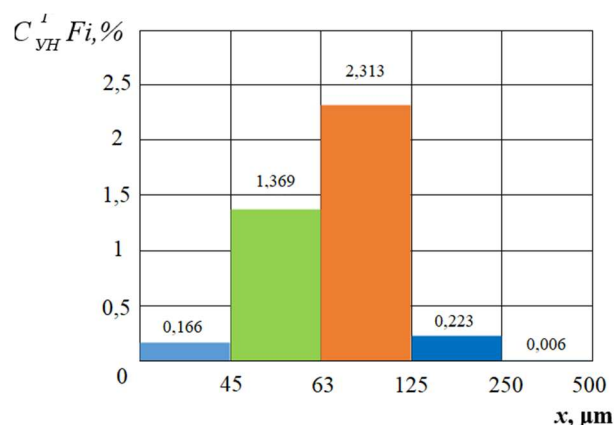


Рисунок 3.8 Содержание горючих в летучей золе с учетом массовых долей различных фракций

Донная зола и шлак, выводимые из разных зон КС через четыре воронки, имели неоднородный гранулометрический состав ($n = 1,396$; $b = 3,9 \cdot 10^{-5}$; рисунок 3.5). Массовая доля частиц с размером $0,25 \leq x < 2,0$ мм составляла 0,933. Среднее содержание горючих веществ в донной золе и шлаке – 1,02 %. Донная зола и шлак транспортируются с помощью скребкового цепного конвейера с водяным охлаждением на устройства просеивания золы, в которых они разделяются на материал, пригодный для возврата в топку ($x < 1,6$ мм), и грубый материал, который отводится с помощью конвейера в контейнер отбракованной топочной золы. Результаты, выполненных анализов, показали, что большая часть донной золы и шлака (рисунок 3.5) может быть повторно использована для компенсации потерь «свежего» кварцевого песка, что поможет снизить эксплуатационные расходы. Количественная оценка отбракованного материала, выведенного из КС, и «свежего», поданного в КС, проводится по изменению давления воздуха под КС, исходя из следующего соотношения 0,1 кПа – 0,5 т материал слоя.

При выполнении промышленно-эксплуатационных испытаний температура воды на входе в экономайзер котла составляла 214–215 °С, а температура и давление перегретого пара были ниже нормативных значений (табл. 3.17), что вызывало необходимость расчета приведенной паропроизводительности [117, 118] для повышения точности определения потери тепла в окружающую среду. При этом дополнительно использовались результаты тепловизионной съемки. Два фрагмента которой приведены на рисунках 3.9, 3.10. Суммарное сопротивление газового тракта котла в исследованном диапазоне нагрузок составило 2,43–2,45 кПа. Результаты проведенных исследований подтвердили, что котлоагрегат обеспечивает полное окисление дурно пахнущих газов и эффективное выгорание горючих компонентов топливной смеси при массовом содержании осадка сточных вод на уровне около 24,0 %; при этом коэффициент полезного действия (КПД) брутто находился в диапазоне 85,24–85,73 %.

Ранее при обследовании данного котла на нагрузках 0,91–0,92 от номинальной были получены близкие результаты [58].

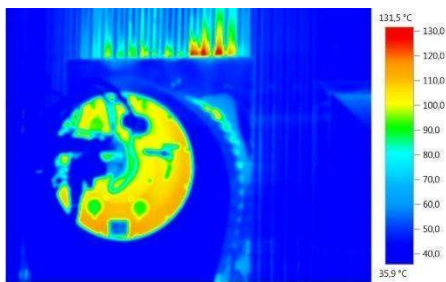


Рисунок 3.9 Термограмма стены топки в зоне растопочной мазутной горелки

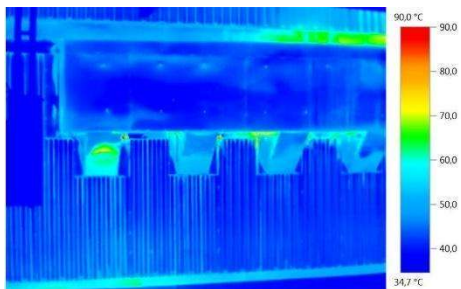


Рисунок 3.10 Термограмма правой стены топки в зоне ввода третичного воздуха

Элементный состав КДТ, ОСВ, средней пробы донной золы и шлака, а также летучей золы, уловленной из-под ЭФ и нижней части 3-го газохода, определенный с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-8000 и анализатора Euro EA-3000 приведен в таблице 3.17. Необходимо отметить, что содержание тяжелых металлов в ОСВ значительно больше чем в КДТ. По мере выгорания горючих веществ происходит повышение концентрации тяжелых металлов и других вредных веществ в летучей золе (таблица 3.17).

Как показано в работах [119, 120], содержание тяжёлых металлов в летучей золе возрастает с уменьшением размера частиц — это объясняется увеличением наружной удельной поверхности мелких частиц, на которой интенсивнее конденсируются и осаждаются летучие соединения тяжёлых металлов; вследствие этого мелкая зола, не уловленная золоуловителями ТЭС, характеризуется более высокой концентрацией токсичных микроэлементов по сравнению со средней по составу золой исходного топлива.

Результаты элементного анализа (таблица 3.17) показали, что основными золообразующими элементами ОСВ являются кальций, кремний и алюминий. Содержание серы в ОСВ – более 0,8 %, что согласуется с данными других работ [121, 122]. Основными золообразующими элементами в КДТ стали кальций, калий и кремний. На процесс сжигания смеси КДТ и ОСВ большое влияние оказывают щелочные компоненты золы (калий и натрий), кальций и сера [123, 124, 125]. Калий, содержащийся в золе ОСВ и КДТ, накапливается в КС и при критической концентрации (более 1,0 %) и температуре свыше 700 °С происходит образование легкоплавких эвтектик, которые способствуют агломерации КС и образованию отложений на поверхностях нагрева котельного агрегата [123, 126]. Высокое содержание кальция способно положительно сказываться на процессе сжигания ОСВ и КДТ в кипящем слое. Так результаты работ [114, 115] показывают, что за счёт реакции оксида кальция с топливной серой происходит снижение выбросов оксидов серы, так как она в первую очередь будет реагировать с оксидом кальция образуя сульфиты. В процессе работы котлоагрегата Е-83.5-9.8-540 ДФ было замечено, что после замены материала слоя выбросы оксидов серы повышались, по мере накопления золы в материале слоя данные выбросы напротив несколько снижались. В донной золе котлоагрегата содержание оксида кальция составило около 19 %, такое высокое содержание обеспечивало практически полное связывание серы (таблица 3.15).

Таблица 3.17 Результаты исследований элементного состава и РФА анализа, составляющих топливной смеси и очаговых остатков, %

Показатели	Название пробы				
	КДТ	ОСВ	Зола из 3-го газохода	Зола из-под ЭФ	Донная зола и шлак
S	0,048	0,882	4,54	4,91	0,198
Al	0,039	0,662	2,12	2,90	1,17
Si	0,134	0,661	2,95	4,35	26,6
K	0,178	0,105	4,85	4,52	2,78

Показатели	Название пробы				
	КДТ	ОСВ	Зола из 3-го газохода	Зола из-под ЭФ	Донная зола и шлак
Cu	0,004	0,004	0,014	0,018	0,010
Mg	0,088	0,151	1,49	2,38	0,920
Ca	0,553	1,07	13,8	19,1	11,24
Ti	0,004	0,017	0,106	0,153	0,070
Cr	н/о	0,002	0,006	0,010	0,010
Mn	0,063	0,120	1,23	1,81	0,341
Fe	0,020	0,308	1,29	1,87	0,404
Ni	н/о	0,002	0,007	0,011	0,002
Zn	0,017	0,027	0,344	0,440	0,219
Sr	0,001	0,005	0,054	0,067	0,039
Ba	н/о	н/о	0,311	0,449	0,206
Br	н/о	0,001	0,010	0,004	н/о
Rb	н/о	0,001	0,016	0,012	0,005
O	43,3	40,8	64,2	54,4	55,5
N	0,993	1,87	0,745	0,488	<0,1
C	46,2	45,8	1,89	2,16	0,305
H	8,35	7,55	<0,1	<0,1	<0,1

Концентрации загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух, имели следующие значения: $\text{NO}_x=218-225$; $\text{CO} = 23-24$; $\text{SO}_2=29-32$; твердые частицы $16.0-16.8$; $\text{HCl} = 3.77-3.95$ мг/нм³ (при концентрации $\text{O}_2=6$ %). Значения эмиссий вредных веществ, поступающих в атмосферу, приведены в таблице 3.16.

Исследования запылённости дымовых газов показали низкие значения эмиссии твёрдых частиц (9,32–10,56 мг/МДж) и сажевых частиц (0,38–0,43 мг/МДж), что обусловлено невысокой зольностью сжигаемой топливной смеси и высокой эффективностью очистки продуктов сгорания в электрофилт্রে (ЭФ); при

этом для измерений применялись два метода — метод внешней фильтрации (по [117]) с аспирационным устройством «ОП-442 ТЦ» и стационарная система контроля выбросов на котлоагрегате, — продемонстрировавшие хорошую сходимость полученных данных.

3.5 Экологические показатели работы котельных агрегатов с кипящим слоем

Для очистки дымовых газов от частиц пыли на котельных агрегатах установлены горизонтальные сухие электрофильтры типа ЭСГ– 1×2 (1 камера, 2 поля).

В таблице 3.18 представлены результаты эффективности очистки дымовых газов электрофильтрами Е-75-3,9-440 ДФТ, КМ75-40М и Е-83,5-9,8-540 ДФ

Таблица 3.18 Результаты эффективности очистки дымовых газов электрофильтрами Е-75-3,9-440 ДФТ, КМ75-40М и Е-83,5-9,8-540 ДФ

К/а	Топливная смесь	Запыленность на входе в электрофильтр	Запыленность на выходе из электрофильтра	Степень очистки
Е-75	Лиственнное КДТ + ОСВ	5,86 г/м ³	0,048 г/м ³	99,14 %
Е-75	Хвойное КДТ + ОСВ	6,37 г/м ³	0,067 г/м ³	98,94 %
КМ-75	Лиственнное КДТ + ОСВ	4,26 г/м ³	0,052 г/м ³	98,65 %
КМ-75	Хвойное КДТ + ОСВ	4,45 г/м ³	0,060 г/м ³	98,58 %
Е-83,5	Лиственнное и хвойное КДТ + ОСВ	6,72 г/м ³	0,016 г/м ³	99,76 %

Наилучшая степень очистки была на котле Е-83,5-9,8-540 ДФ: при концентрации пыли на входе $6,72 \text{ г/м}^3$ на выходе зафиксировано всего $0,016 \text{ г/м}^3$, что соответствует эффективности очистки $99,76 \%$. При сжигании топливной смеси из лиственного кородревесного топлива и осадка сточных вод на Е-75 эффективность очистки несколько выше (на $0,20 \%$) по сравнению с хвойным топливом. На КМ-75 степень очистки отличалась не сильно от типа сжигаемого топлива, это объясняется тем, что более высокая скорость дымовых газов и их объем при сжигании хвойного КДТ, компенсируется более низкой температурой дымовых газов и меньшим содержанием оксида углерода при сжигании лиственного КДТ.

В таблице 3.19 представлены вольтамперные характеристики электрофильтров Е-75-3,9-440 ДФТ и КМ75-40М при работе котлов на разных топливных смесях.

Таблица 3.19 Результаты эффективности очистки дымовых газов электрофильтрами Е-75-3,9-440 ДФТ и КМ75-40М

К/а	Топливная смесь	Вольтамперные характеристики поля А (I/U)	Вольтамперные характеристики поля В (I/U)
Е-75	Лиственное КДТ + ОСВ	55 кВ / 120 мА	58 кВ / 379 мА
Е-75	Хвойное КДТ + ОСВ	54 кВ / 97 мА	56 кВ / 341 мА
КМ-75	Лиственное КДТ + ОСВ	49 кВ / 88 мА	51 кВ / 160 мА
КМ-75	Хвойное КДТ + ОСВ	47 кВ / 73 мА	51 кВ / 155 мА

Анализ вольтамперных характеристик электрофильтров показывает, что при сжигании лиственного кородревесного топлива и осадка сточных вод вольтамперные характеристики увеличиваются.

Также на количество выбросов могут влиять конструктивные особенности котельных агрегатов. Так наличие у котлоагрегатов Е-75-3,9-440 ДФТ и Е-83,5-9,8-540 ДФ трех вертикальных газоходов вызывает появление поворотов газового потока, при совершении которых происходит инерционно-гравитационная сепарация твердых частиц.

3.6 Технические мероприятия, направленные на увеличение энергетической эффективности работы котельных агрегатов с кипящим слоем

По результатам исследования для улучшения энергетической эффективности котлоагрегатов предложены следующие технические мероприятия:

1. Предложено стабилизировать температуру кипящего слоя котлоагрегатов Е-75-3,9-440 ДФТ и КМ75-40М путем автоматизации подачи газов рециркуляции в первичный воздух, а также увеличением равномерности распределения топлива по кипящему слою. В качестве обратной связи для автоматизации подачи ДРГ необходимо использовать среднюю температуры слоя и скорость роста температуры кипящего слоя.

2. Для снижения температуры дымовых газов на выходе из топки предложено увеличение давления вторичного воздуха на КМ75-40М путем прикрытия сопел с целью его более эффективного смешивания с летучими веществами и подавления факела в топке. Данное мероприятие позволит снизить температуру перегрева после 1 ступени, температуру на выходе из топки, повысить максимальную производительность котельной установки.

3. Для решения проблемы цементации золы в конвективных газоходах котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ необходимо снизить скорости ожигания кипящего слоя, это позволит уменьшить количество золы и частиц песка выносимых из слоя в топочное пространство. Для реализации данного мероприятия необходимо решить одну из основных проблем эксплуатации кипящего слоя – проблему агломерации.

4. На котельном агрегате Е-83,5-9,8-540 ДФ предложено увеличить равномерность распределения топлива по слою.

Предложенные мероприятия позволят повысить среднюю нагрузку котельных агрегатов на 10-15 % или 20 тонн перегретого пара среднего давления и 10 тонн перегретого пара высокого давления в час.

Выводы по главе 3

1. Теплотехнические характеристики и элементный состав кородревесного топлива и осадка сточных вод оказывают значительное влияние на процесс горения в кипящем слое.

2. КПД котельных агрегатов с кипящим слоем зависит от количества дымовых газов рециркуляции и вида кородревесного топлива.

3. Эффективность электрофильтра снижается при сжигании топливной смеси с высокой зольностью и низкой теплотой сгорания.

4. При работе котлов с кипящим слоем возникают следующие проблемы: шлакование, загрязнение поверхностей, эрозионный износ, температурная неоднородность слоя, агломерация, дефлюидизация слоя. Основной проблемой, снижающей надежность работы котлов с кипящим слоем, является агломерация.

5. Для повышения эффективности при сжигании кородревесного топлива и осадка сточных вод необходимо контролировать равномерное распределение топливной смеси по слою, регулировать количество свежего кварцевого песка и дренируемого материала слоя, оптимизировать подачу вторичного и третичного воздуха для эффективного дожигания продуктов газификации.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ МАТЕРИАЛА КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Сжигание топливных смесей из биомассы и твердых отходов в псевдоожиженных слоях часто приводит к спеканию частиц золы с инертным материалом слоя. Для предотвращения агломерации материал псевдоожиженного слоя сливают и частично заменяют новым, что приводит к увеличению количества отходов. Кроме того, полная замена материала основания является дорогостоящим мероприятием, поскольку требует затрат на новый материал основания, утилизацию отходов и незапланированный простой котлоагрегата. В главе рассматривается процесс агломерации материала псевдоожиженного слоя котлоагрегата Е-75-3.9-440 ДФТ. Котельный агрегат установлен и эксплуатируется на энерготехнологической ТЭС-3 АО Архангельского ЦБК.

4.1 Работа котельного агрегата

После замены материала кипящего слоя и химической промывки поверхностей нагрева котёл был растоплен и эксплуатировался в ноябре 2024 г. – январе 2025 г. в различных режимах загрузки: с 9 по 14 ноября — со средней нагрузкой по хвойным кородревесным отходам; с 14 по 24 ноября — со средней нагрузкой по лиственным кородревесным отходам; с 24 по 27 ноября — при средней нагрузке на древесину хвойных пород; с 27 ноября по 13 декабря — при высокой нагрузке на древесину лиственных пород; с 13 по 19 декабря — со средней нагрузкой по хвойным кородревесным отходам; с 19 по 27 декабря — со средней нагрузкой по лиственным кородревесным отходам; с 27 по 30 декабря — с низкой нагрузкой по хвойным кородревесным отходам; с 30 декабря по 7 января — с низкой нагрузкой на лиственные кородревесные отходы; с 7 по 10 января — с низкой нагрузкой на хвойные кородревесные отходы; с 10 по 19 января — с низкой нагрузкой на лиственные кородревесные отходы. 19 января 2025 г. котёл остановили для устранения свища на испарительных решётках, удаления шлака с них и замены материала псевдоожиженного слоя; при этом выход на номинальную

паропроизводительность в начале эксплуатации оказался невозможен из-за интенсивного шлакообразования (цементации золы) на испарительных экранах.

4.2 Отбор проб кородревесного топлива и осадка сточных вод

Отбор проб осуществлялся в двух контрольных точках: осадок сточных вод был взят на узле приёма производства биологической очистки, а кородревесное топливо — непосредственно с конвейера, подающего топливную смесь в топливный бункер котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ, до момента их смешивания с осадком сточных вод.

Теплотехнический анализ кородревесного топлива и осадка сточных вод представлен в таблице 4.1 Элементный анализ кородревесного топлива и осадка сточных вод представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.1 Теплотехнические характеристики кородревесного топлива и осадка сточных вод.

Топливо	Влажность рабочей массы	Летучие вещества горючей массы	Зольность на рабочую массу	Низшая теплота сгорания на рабочую массу
КДТ (лиственное)	53,75 %	79,54 %	1,71 %	8326 кДж/кг
КДТ (хвойное)	55,26 %	82,06 %	1,80 %	6793 кДж/кг
Осадок сточных вод	75,71 %	75,65 %	17,77 %	1743 кДж/кг

Исследуемое топливо характеризуется следующими особенностями: высокой влажностью, пониженной теплотворной способностью и значительным выходом летучих веществ. При сравнении теплотворной способности древесного сырья установлено, что хвойное кородревесное топливо уступает лиственному примерно на 20 %, что влечёт существенное увеличение топливного расхода в

периоды его сжигания. Повышенная зольность осадка свидетельствует о доминирующей роли его золы в формировании рабочих параметров кипящего слоя. Таблица 4.2 - Результаты элементного анализа кородревесного топлива и осадка сточных вод, %.

Элемент	Лиственнное КДТ	Хвойное КДТ	Осадок сточных вод
C	51,106	46,606	35,600
H	7,798	7,129	6,100
N	2,213	2,341	2,400
O	37,197	42,137	50,500
S	0,000	0,000	0,830
Cl	0,100	0,100	0,200
Cu	0,003	0,004	0,004
Ti	0,004	0,005	0,017
V	0,001	0,001	0,004
Cr	0,001	0,001	0,002
Mn	0,039	0,050	0,080
Ni	0,001	0,001	0,002
Zn	0,011	0,011	0,031
Sr	0,001	0,001	0,011
Al	0,040	0,062	0,508
P	0,045	0,056	0,245
Fe	0,037	0,048	0,256
Mg	0,089	0,100	0,154
Si	0,072	0,083	0,661
K	0,263	0,188	0,101
Ca	0,736	0,849	2,170
Na	0,242	0,223	0,260

Как показано в таблице 4.2, кальций, калий и натрий являются преобладающими элементами в лиственном и хвойном древесном топливе. Анализ осадка показал повышенное содержание кальция, кремния, алюминия и фосфора. При сравнении кородревесного топлива выявлено: лиственная биомасса характеризуется более высокой концентрацией щелочных элементов (0,505 %), чем хвойная (0,411 %). Примечательно, что в осадке отмечается избыток натрия, однако уровень калия в нём уступает показателям, характерным для древесного сырья.

Донная зола, агломераты (рисунок 4.1) и шлак (рисунок 4.2) из кипящего слоя были отобраны в период дренажа кипящего слоя. Отбор проб для рентгенофлуоресцентного анализа производился каждые две недели начиная с пуска котельного агрегата после замены материала кипящего слоя до следующего останова котла на ремонт с заменой материала слоя. Визуальный осмотр донной золы проводился каждую неделю.



Рисунок 4.1 Донная зола и агломераты



Рисунок 4.2 Шлак

Параметры газовой воздушной среды, температуру и давление кипящего слоя котлоагрегата измеряли с помощью стационарных эксплуатационных измерительных приборов. Данные о расходе донной золы при дренировании и расхода свежего кварцевого песка на восполнение потери материала кипящего слоя

брали из оперативных журналов машиниста котла (данные представлены на рисунке 4.3).

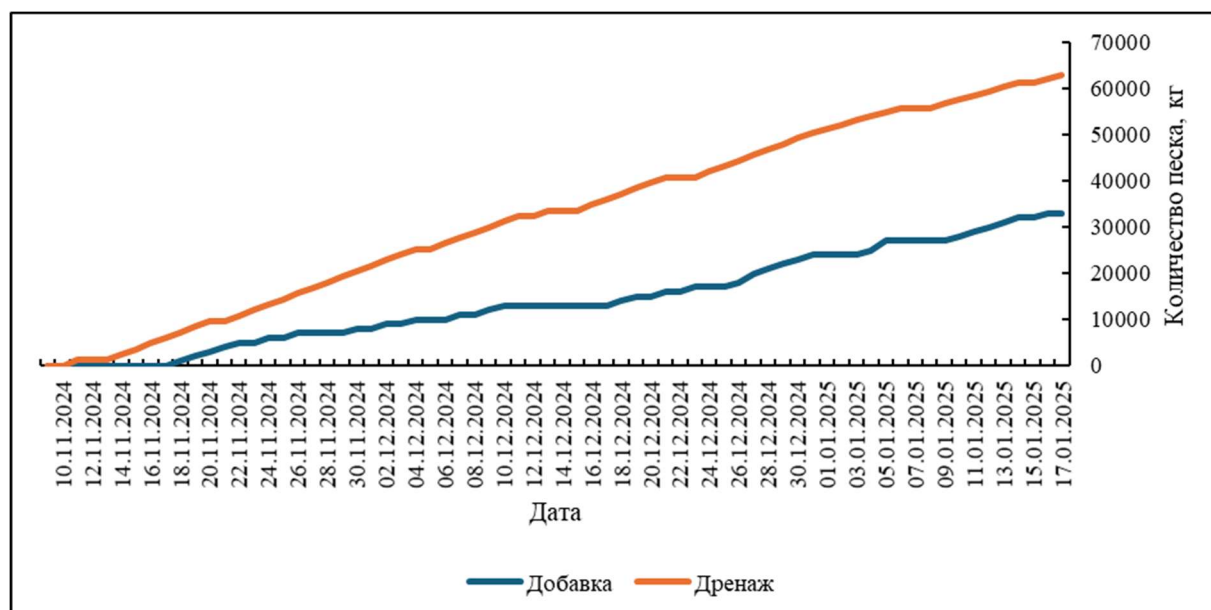


Рисунок 4.3 Расход свежего кварцевого песка и дренаж донной золы

Дренирование материала кипящего слоя и добавка свежего песка производится в соответствии с режимной картой котла. Слив отработанного материала слоя производится поочередно с четырех воронок. Нормальный объем дренирования песка составляет 1200 кг в сутки, добавка свежего кварцевого песка 1000 кг в сутки. При существенных отклонениях параметров работы кипящего слоя дополнительно по усмотрению машиниста котла, начальника смены или административного руководства станции производится дополнительный выборочный слив песка. В начале эксплуатации котлоагрегата с обновленным материалом слоя первые несколько суток работы котла не производится добавка свежего кварцевого песка.

4.3 Визуальный контроль кипящего слоя

Визуальный осмотр отобранной донной золы показал, что при ежедневном дренаже материала слоя в течение первых 20 дней из него сливался свежий кварцевый песок с небольшой примесью золы. Первые агломераты начали появляться с четвертой недели эксплуатации. Размеры первых агломератов составляли более 100x100 мм. Отбор №2 (общий объем осушенного слоя с момента

запуска составил около 23 тонн) показал резкое ухудшение качества материала слоя – его значительное укрупнение и наличие крупного агломерата (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 Агломераты отбора №2

В ходе дальнейшей эксплуатации размер и количество агломератов постепенно увеличивались (рисунки 4.5-4.7). Наиболее крупные агломераты, отобранные при отборе №2, №3 и №4, имели рыхлую структуру. Эти агломераты характеризовались наличием сердцевины из частиц кварцевого песка диаметром менее 0,4 мм и золы, зола и песок неплотно прилегали друг к другу. Однако эти агломераты имели более плотный внешний слой. При механическом повреждении внешнего слоя образцы легко разрушались. Результатом образования самых крупных агломератов была агломерация, вызванная покрытием. На рисунке 4.5 показаны агломераты, состоящие из нескольких крупных частей, соединенных слоем расплавленной золы шириной 2-3 мм.



Рисунок 4.5 Агломераты отбора №3



Рисунок 4.6 Агломераты отбора №4

Крупные агломераты из отбора №5 (рисунок 4.7) имели более пористую структуру с сердцевинкой из расплава светлого цвета. К этой сердцевине прилипла донная зола с размером частиц до 1 мм. Эти агломераты образовались в результате расплавления частиц донной золы с последующим прилипанием новых частиц кварцевого песка.



Рисунок 4.7 Агломераты отбора №5

Последний отбор был проведен после остановки и охлаждения котлоагрегата 19.01.2025 г. Отбор проб донной золы из всех зон слоя во время пятого отбора проб производился внутри топки котельного агрегата. Анализ данного отбора показал,

что содержание оксида кремния в донной золе остается на том же уровне, что и при двух предыдущих отборах. Однако визуально верхняя часть слоя (кипящая часть) содержала гораздо меньше агломератов, чем донная зола, отобранная при дренаже слоя в процессе эксплуатации.

Высота слоя в не кипящем состоянии при останове котла составляла: слева и справа спереди - 700 мм, слева сзади – 800 мм, справа сзади – 720 мм. Основные скопления агломератов наблюдались в задней части котла, особенно с левой стороны (рисунок 4.8), где были обнаружены крупные агломераты размером до 400x300x250 мм. Под слоем песка между левой и правой задними воронками был обнаружен слой твердого агломерата размером 350x350x10 мм.

На рисунке 4.9 показан участок материала кипящего слоя в задней части котельной установки. На поверхности псевдооживленного слоя образовался агломерат, предотвращающий кипение материала.



Рисунок 4.8 Агломераты в левой задней части псевдооживленного слоя



Рисунок 4.9 Агломераты в левой задней части псевдооживленного слоя

4.4 Гранулометрический анализ частиц материала слоя и скорость его псевдооживления

На рисунках 4.10-4.12 показаны изменения размера частиц в материале псевдооживленного слоя.

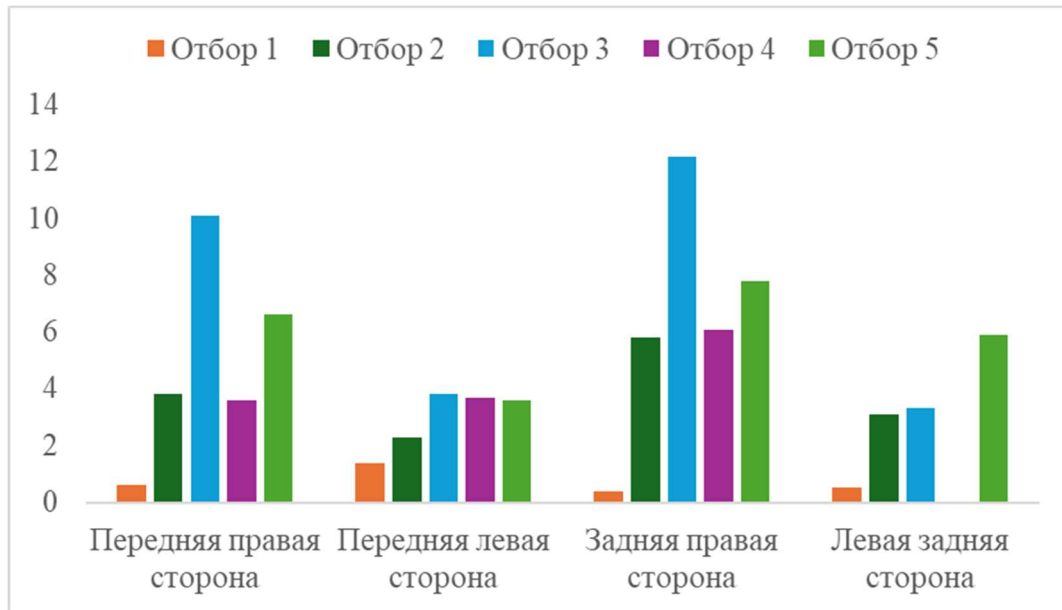


Рисунок 4.10 фракция больше 1.2 м донной золы, %

Размер частиц слоя при заполнении составлял 0,4-1,2 мм. Во время первого отбора (2 недели эксплуатации слоя) во всех точках наблюдалась низкая доля агломерированных частиц. Во время отбора №2 средняя доля агломерированных частиц составляла более 3,5%. Третья выборка характеризовалась большим количеством агломератов на правой стороне псевдооживленного слоя – более 10%. Материал слоя при отборах №4 и №5 содержал меньше агломератов, что связано с увеличением количества добавки нового кварцевого песка в псевдооживленный слой. Доля материала слоя размером до 0,4 мм увеличилась из-за накопления топливной золы и истирания кварцевого песка. Резкое увеличение содержания фракции менее 0,4 мм на левой задней стороне слоя связано с прекращением дренажа слоя с левой задней воронки.

Средний диаметр частиц в материале слоя имел тенденцию к росту, поскольку процессы агломерации частиц преобладали над процессами их истирания. Средний диаметр частиц при засыпке свежего песка составлял 0,796 мм, при первом отборе проб он уже составлял 0,815 мм, а при последнем - 1,196 мм.

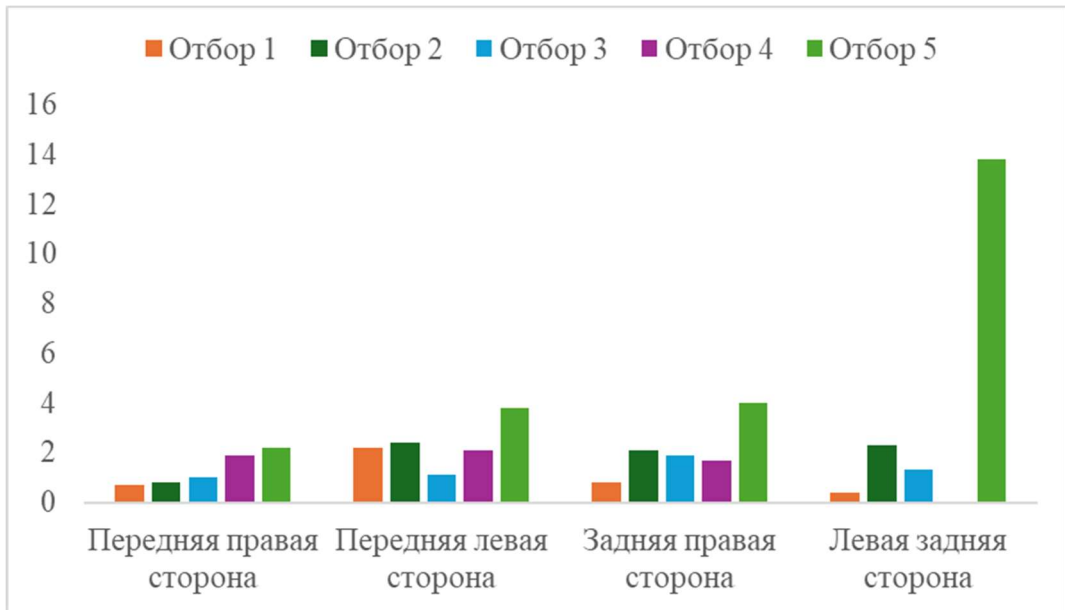


Рисунок 4.12 фракция до 0.4 мм донной золы, %

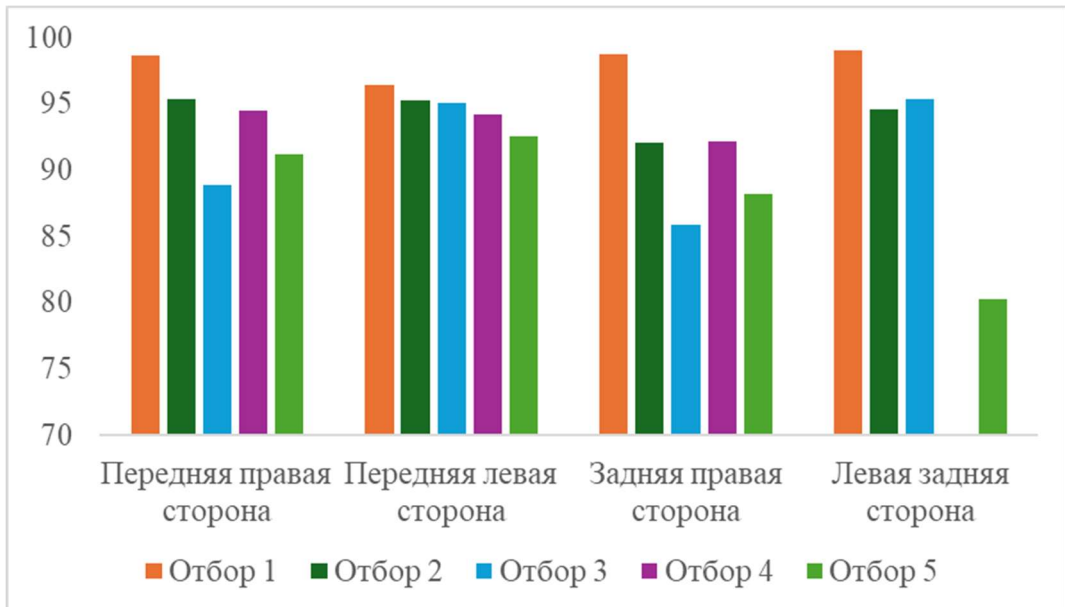


Рисунок 4.11 фракция 0.4 - 1.2 мм донной золы, %

Минимальная скорость псевдоожижения U_{mf} в начале работы котлоагрегата составляла $0,33 \text{ м/с}$, затем, в результате увеличения объема материала псевдоожиженного слоя, она увеличилась и составила: $0,34 \text{ м/с}$ при выборе №1, $0,40 \text{ м/с}$ при выборе №2, $0,52 \text{ м/с}$ при выборе №3, $0,56$ при выборе №4, $0,59$ при выборе №5. Коэффициент псевдоожижения U/U_{mf} снизился с $6,13$ при запуске котла до $3,38$ в последний день эксплуатации. Соотношение U/U_{mf} играет важную роль в работе котла с псевдоожиженным слоем. Слишком высокая скорость ожижения может как вызвать локальную агломерацию, так и ограничить скорость

накопления агломератов в слое, разрушая их при столкновении, в то время как слишком низкая скорость первичного воздуха может привести к снижению качества псевдоожижения в кипящем слое [123, 124].

4.5 Рентгенофлуоресцентный анализ донной золы

Содержание диоксида кремния (рисунок 4.13) в первом сливе песка из передней левой воронки оказалось ниже ожидаемого. Причина — неполное удаление остаточной золы при замене засыпки. Остальные результаты первого отбора показали содержание кварца в диапазоне 81–84%. Зола, удаляемая из задней части котла, содержала больше диоксида кремния, чем зола из передней части печи.

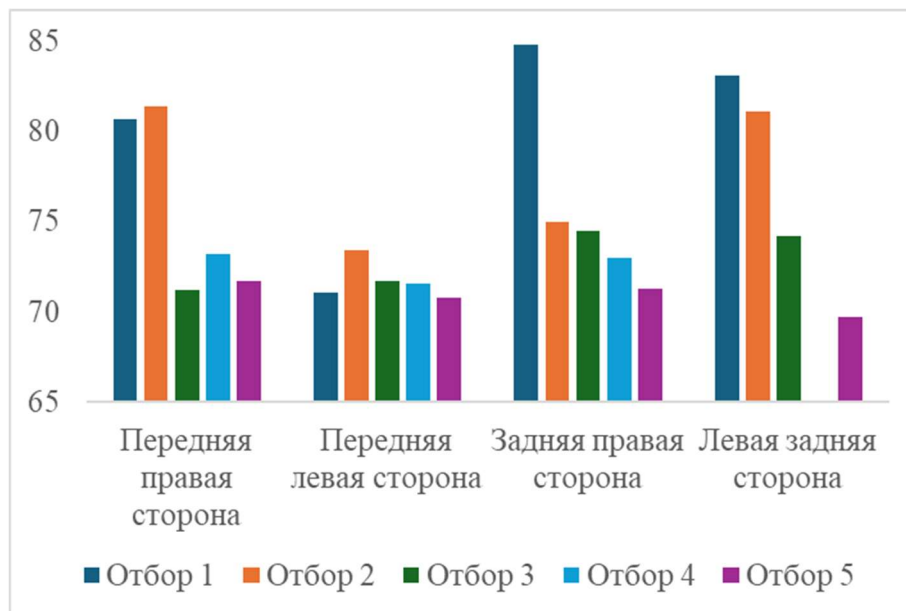


Рисунок 4.13 Содержание SiO_2 в донной золе, %

Рентгенофлуоресцентный анализ донной золы из отбора №2 показал резкое снижение доли кремния (кварцевого песка) на 10% в правой задней воронке, в то время как содержание кварца в слое даже немного увеличилось в передней части котла. При анализе процесса слива материала из передней правой воронки было обнаружено, что температура стенок дренажной трубы ниже, чем у трех других. Это указывает на то, что из этого места было дренировано меньше песка, чем из других воронок. В течение 6-й недели работы котла (отбор № 3) содержание кварца снизилось до 70-75%. В процессе эксплуатации содержание кремния во всем слое уменьшилось. На 8-й неделе эксплуатации донная зола из левой задней воронки

перестала сливаться. Позже было обнаружено, что в задней левой сливной трубе застрял крупный агломерат. При использовании кварцевого песка в качестве материала слоя содержание SiO_2 отражает долю кварцевого песка с небольшой примесью SiO_2 из топливной золы. SiO_2 является основным элементом, участвующим в образовании агломератов, поскольку при наличии щелочных элементов в топливной золе SiO_2 будет взаимодействовать с ними с образованием легкоплавкой эвтектики [75, 76].

Процессы укрупнения донной золы, формирования агломератов и потери флюидизации слоя напрямую коррелируют с концентрацией щелочных металлов (калия и натрия) в золе используемого топлива. Критическим порогом выступает превышение совокупного содержания этих элементов в слое более чем на 1 % [38, 58, 59, 69, 124, 125]. В исследуемой донной золе натрий (Na) обнаружен не был. Содержание калия (K) с момента пуск котла увеличилось по всем точкам в 6 раз (рисунок 4.14).

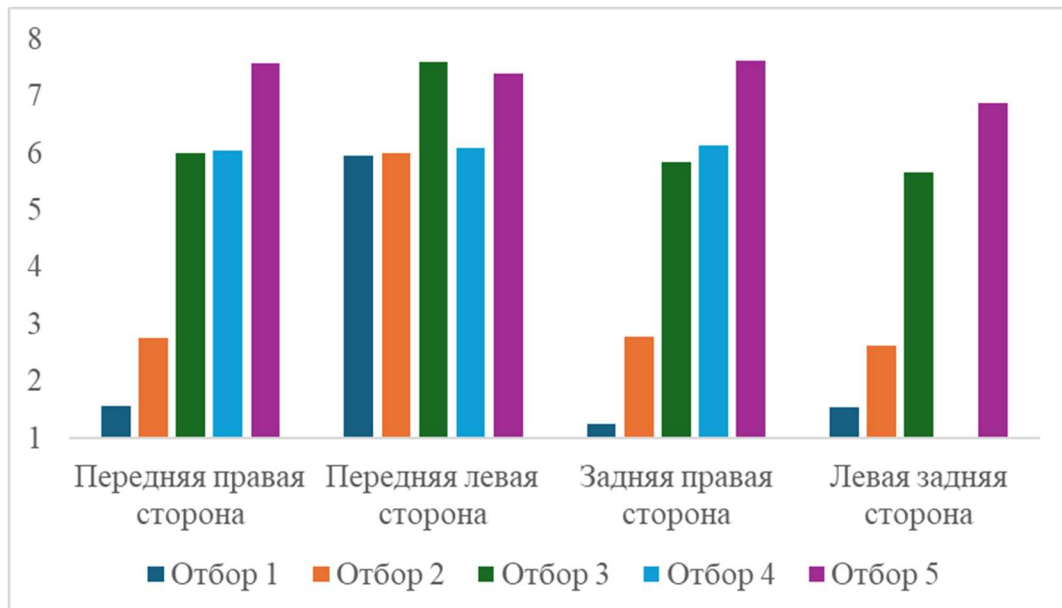


Рисунок 4.14 Содержание K_2O в донной золе, %

Отбор №1 характеризовался довольно низким содержанием калия – около 1 % по трем воронкам. Передняя левая воронка, как указано выше, содержит не дренированную золу с предыдущего слоя. Уже во время второго отбора содержание калия превысило критическое значение концентрации в слое более чем в два раза, что объясняет наличие крупного агломерата. Во время последних трех

отборов концентрация калия в слое превышала критическую более чем в 6 раз, что говорит о необходимости увеличения количества дренажа донной золы, особенно с задних воронок, где в процессе слива песка были обнаружены самые крупные агломераты.

Увеличение доли оксида кальция (рисунок 4.15) указывает на увеличение доли топливной золы в псевдоожигенном слое. В то же время увеличение содержания CaO в слое положительно сказывается на снижении выбросов диоксида серы в атмосферу. Сера связывается с кальцием и выпадает в осадок в виде летучей золы или остается в слое [59]. Содержание CaO (температура плавления 2570 °С) и MgO (температура плавления 2800 °С) повышает температуру спекания золы [126]. Кальций уменьшает процессы агломерации, происходящие в материале слоя, поскольку увеличение содержания кальция в слое повышает его температуру плавления в соответствии с тройной системой K₂O-CaO-SiO₂ [127].

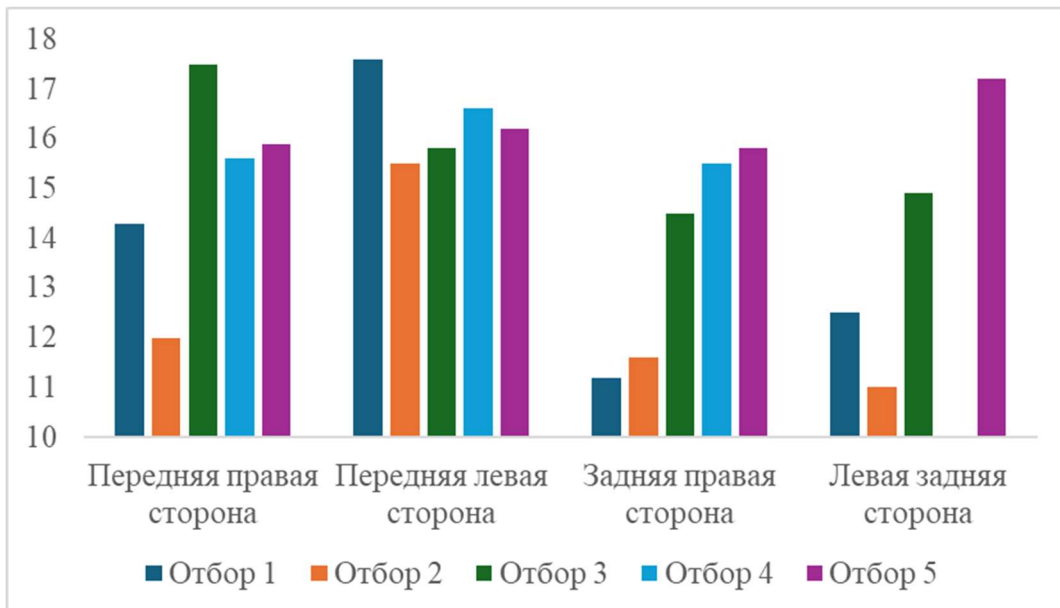


Рисунок 4.15 Содержание CaO в донной золе, %

Известно, что при высоком содержании оксидов железа и алюминия в слое (рисунки 4.17 и 4.18) процесс агломерации замедляется. Температура размягчения щелочных элементов, образующихся в результате реакций с этими оксидами, превышает 1100°С. В золе содержится большое количество Fe₂O₃ (температура плавления 1560 °С) и Al₂O₃ (температура плавления 2050 °С), щелочные

компоненты могут преимущественно вступать в реакцию с ними, не образуя легкоплавких соединений [39, 69]. Добавление алюминия, например, в виде каолина (алюмосиликата) снижает выделение калия в газовую фазу, что приводит к снижению скорости образования легкоплавкой эвтектики [76].

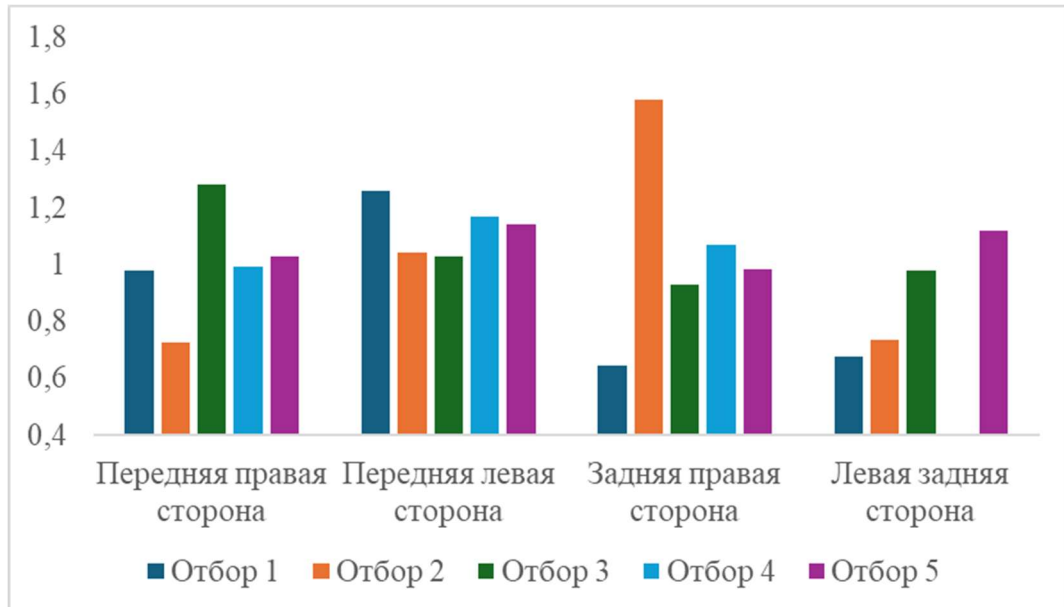


Рисунок 4.16 Содержание MgO в донной золе, %

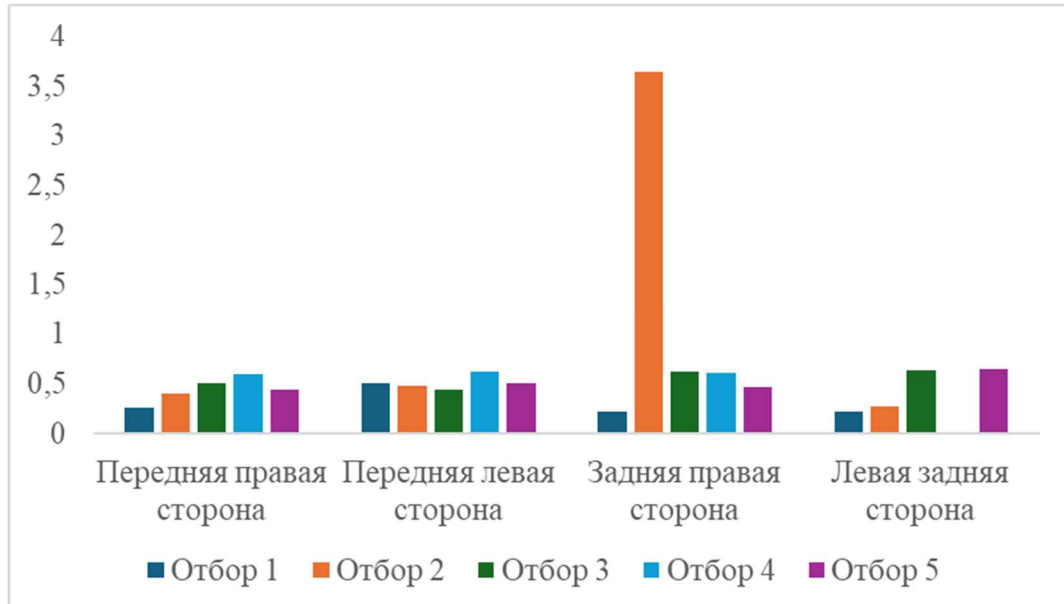
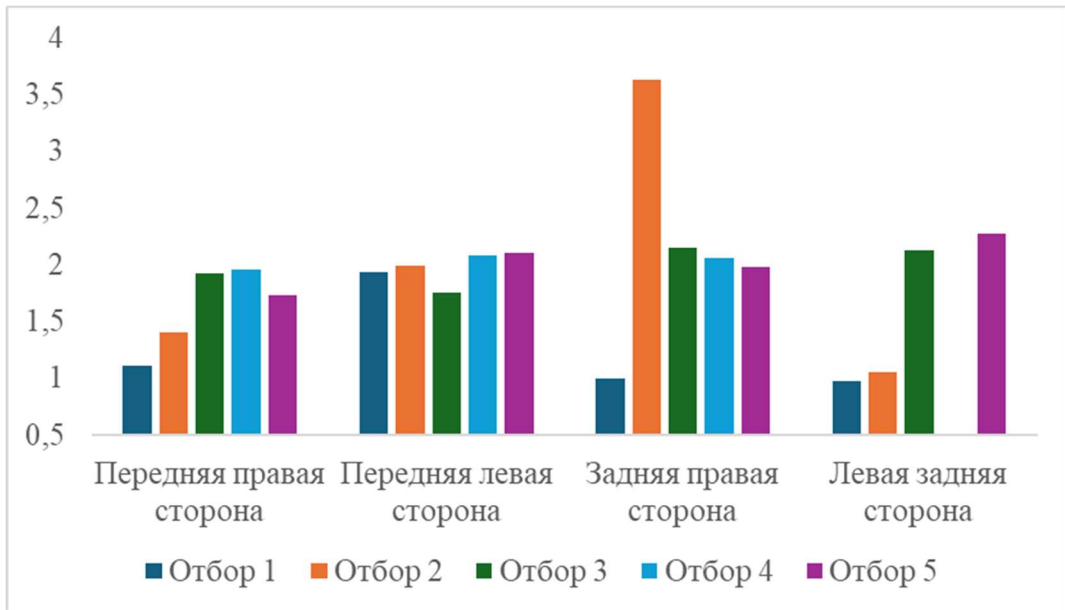
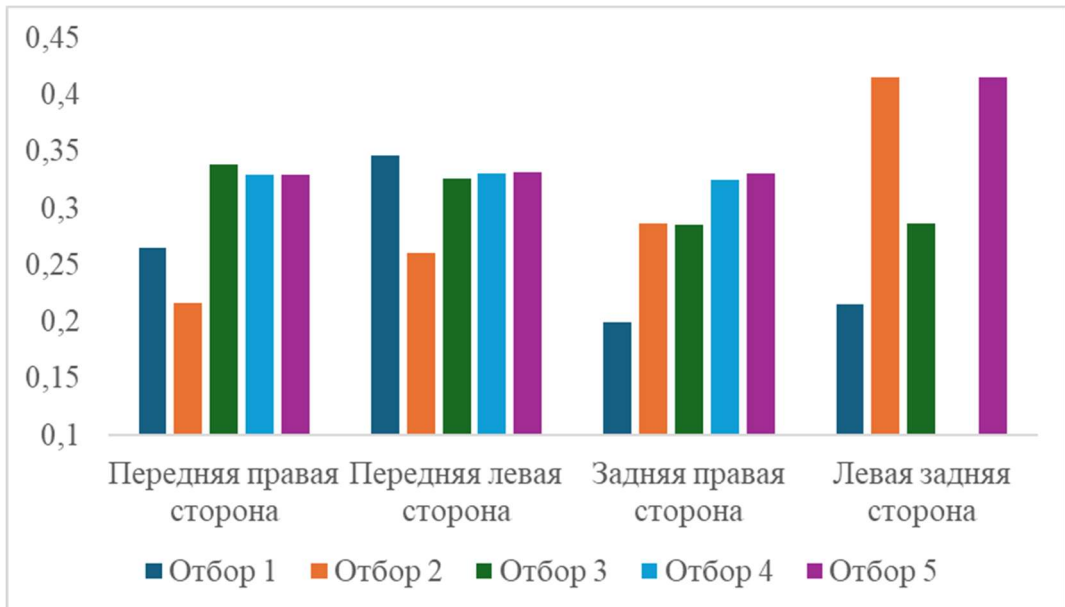


Рисунок 4.17 Содержание Fe₂O₃ в донной золе, %

Рисунок 4.18 Содержание Al_2O_3 в донной золе, %Рисунок 4.19 Содержание MnO в донной золе, %

4.6 РФА агломератов

В таблице 4.3 приведены результаты рентгеновского исследования двух различных агломератов, собранных при отборах №4 и №5. Первый образец (самый крупный на рисунке 4.6) характеризовался плотной однородной структурой с внешней оболочкой, второй образец (небольшой агломерат в левом нижнем углу на рисунке 4.7) отличался тем, что имел сердцевину из расплавленной золы, к которой впоследствии прилипали частицы слоя.

Таблица 4.3 - Результаты рентгенофлуоресцентного анализа различных агломератов, %.

Образец	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	MnO
Крупный агломерат из отбора №4	-	1,21	17,20	1,30	4,27	62,40	6,17	0,62
Небольшой агломерат из отбора №5	0,26	0,66	15,54	0,85	2,71	65,95	6,61	0,34

Состав агломератов имел одинаковое соотношение K₂O/SiO₂, равное 1/10. Мелкий агломерат отличался наличием в его составе фосфора. Фосфор может образовывать фосфаты кальция, и в этом случае легче образуются К-силикаты с низкой температурой плавления. Крупный агломерат имеет более высокое содержание оксидов железа, алюминия, кальция и магния, которые повышают температуру в начале агломерации.

4.7 Параметры работы кипящего слоя

Поддержание оптимальных параметров слоя может снизить вероятность агломерации. Высокая температура может способствовать спеканию частиц. Регулировка потока первичного воздуха может повлиять на перемешивание частиц в слое и предотвратить их накопление. Увеличение расхода может способствовать лучшему распределению тепла и предотвращать образование зон с повышенными температурами [33, 76].

Анализ работы псевдооживленного слоя (рисунки 4.20, 4.21) показывает, что температура верхней части псевдооживленного слоя в трех точках (задняя часть котла и передняя правая часть) выше, чем температура нижнего слоя. Температуры верхней и нижней термопар левой передней части котла имеют примерно одинаковые значения. В процессе эксплуатации зафиксирована значительная температурная неправомерность: в правой задней зоне котла температура была на 30–40 °С ниже среднего значения по слою, тогда как в левой передней зоне

наблюдался максимальный нагрев — превышение над средней температурой составило 40–50 °С. Это указывает на необходимость регулировки рзброса топлива, чтобы равномерно распределить его по псевдоожигенному слою. Это может ускорить процесс агломерации в местах, куда подается меньше топлива, так как в этих частях слоя будет образовываться меньше пузырьков газа. Таким образом, во время работы задняя часть псевдоожигенного слоя котла Е-75-3,9-440 ДФТ имела более низкую температуру, но именно из задней части слоя сливались самые крупные агломераты.

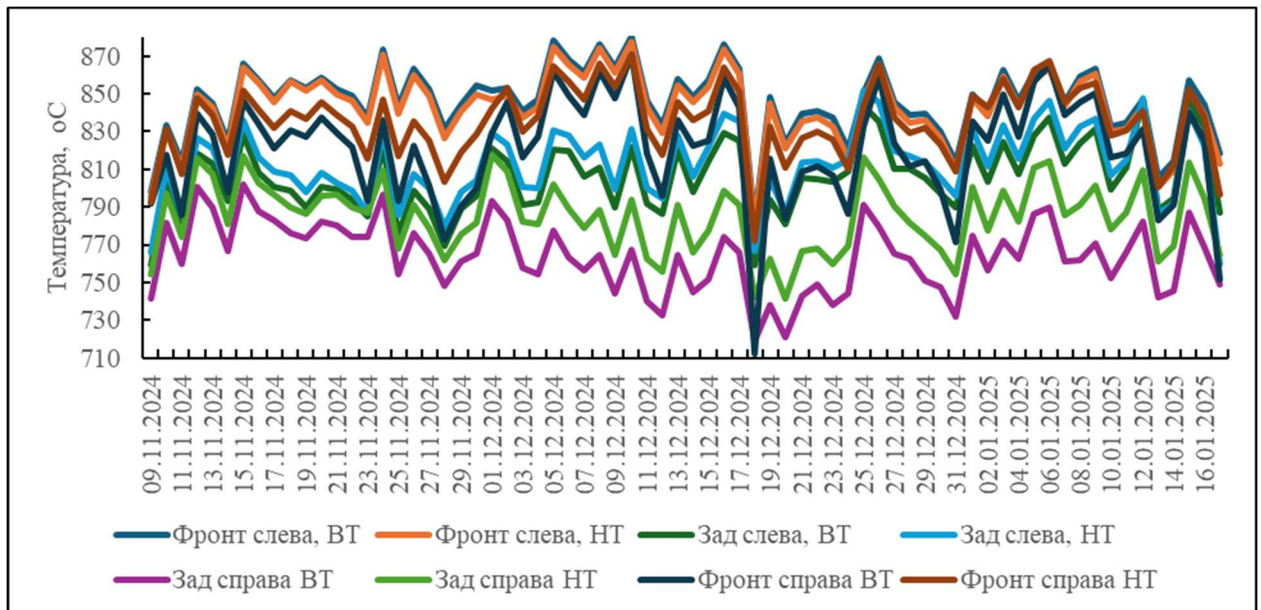


Рисунок 4.20 Температура кипящего слоя в различных точках

VT – верхняя термопара (500 мм); NT – нижняя термопара (300 мм)

Температура псевдоожигенного слоя оказывает существенное влияние на процесс агломерации материала слоя. Чем выше температура, тем выше вероятность образования расплавов различного состава. Рабочая температура слоя во время эксплуатации составляла 754-840°C. При такой температуре легкоплавкая эвтектика калия и кремния действует как адгезив между частицами слоя. Снижение температуры псевдоожигенного слоя является эффективным способом борьбы с агломерацией. Однако снижение температуры обычно достигается за счет уменьшения расхода первичного воздуха, что снижает степень псевдоожигения и может привести к усилению процессов агломерации в материале слоя. Можно увеличить степень псевдоожигения, добавляя рециркулирующие газы к

первичному воздуху. Этот метод позволяет контролируемо снижать температуру псевдооживленного слоя.

Согласно рисунку 4.21, можно отметить, что после нескольких недель работы котла наблюдается четкая взаимосвязь – с уменьшением паропроизводительности температура слоя повышается, с увеличением нагрузки - снижается.



Рисунок 4.21 Паропроизводительность и средняя температура кипящего слоя

Регулирование давления первичного воздуха под псевдооживленным слоем является важным компонентом, характеризующим работу и состояние псевдооживленного слоя. Таким образом, внезапное снижение давления под слоем может указывать на начало дефлюидизации слоя [68].

На рисунке 4.22 показано давление и расход первичного воздуха в камере. Давление в камере составляло 14-15 кПа. В первые дни эксплуатации котлоагрегата наблюдалось незначительное повышение давления под слоем при снижении расхода первичного воздуха, что связано с увеличением общей массы псевдооживленного слоя, поскольку в течение этого периода материал слоя дополнительно не осушался (рисунок 4.23). Таким образом, существует четкая зависимость увеличения/уменьшения давления под псевдооживленным слоем от расхода первичного воздуха. В периоды, когда кварцевый песок не добавлялся, наблюдалась явная тенденция к повышению давления. Это связано с накоплением агломератов в материале слоя.

В процессе эксплуатации котлоагрегата операторы периодически отмечали кратковременное снижение давления под слоем на 1,5-2 кПа. В основном это явление наблюдалось при низкой загрузке котлоагрегата и высокой температуре слоя, что может свидетельствовать о резкой агломерации слоя.



Рисунок 4.22 Расход первичного воздуха и паропроизводительность



Рисунок 4.24 Расход и давление первичного воздуха

4.8 Сравнительный анализ

В литературе было проведено много исследований по изучению процесса агломерации. В работе [66] был изучен процесс агломерации двух материалов слоя

(кварцевого песка и оксида алюминия) в газификаторе, в котором сжигается рисовая солома. В ходе этого исследования было обнаружено, что температура влияет на агломерацию слоя. Повышение температуры в этом эксперименте привело к ускорению агломерации слоя. В работе [59] авторы изучили влияние различных параметров, таких как температура, скорость газа и размер материала слоя, а также использование добавок (CaO и CaCO_3) на процесс псевдоожижения кипящего слоя. Результаты показали, что Na соединяется с кварцевым песком или примесями в кварцевом песке с образованием жидких расплавленных веществ, что приводит к агломерации и дефлюидизации. При добавлении Ca (в виде CaO или CaCO_3) время дефлюидизации увеличивалось. В том же исследовании авторы провели рентгеноструктурный анализ образовавшихся агломератов. Агломераты состояли в основном из кварца. В работе [66] был изучен элементный состав агломератов, который показал, что они состоят в основном из Na , K , P , Mg и Ca . В работе [60] исследовались агломераты, полученные в газификаторе с барботажным псевдоожиженным слоем мощностью 20 кВт, при сжигании древесины хвойных пород из норвежских лесов, а также тимофеевки, люцерны и клевера. Агломераты, полученные в этом исследовании при температурах от 750 до 900°C, аналогичны агломератам, отобранным из котельной установки E-75-3,9-440 (рисунки 4.4-4.7). В [60] При температуре <750° частицы песка агломерируются, образуя довольно рыхлую структуру. Агломерат, образовавшийся при температурах от 800°C до 900°C, подвергся значительному плавлению, в результате чего получилась плотная и компактная структура.

4.9 Исключение агломерации материала слоя с помощью снижения температуры кипящего слоя и увеличения расхода первичного воздуха

Агломерация частиц топливной золы с частицами слоя происходит из-за образования легкоплавких эвтектик при температурах свыше 764 °C. Так как режимная карта котельного агрегата E-75-3,9-440 ДФТ позволяет работать со средней температурой слоя 750 °C были проведены опытно-промышленные

испытания работы кипящего слоя при сниженной температуре. При этом для исключения работы котла со сниженным КПД температуру слоя снижали не снижением количества кислорода в первичном воздухе (за счет добавки газов рециркуляции), а путем снижения высоты кипящего слоя на 100 мм.

Снижение высоты слоя приводит к снижению общей теплоемкости слоя, что снижает инерционность слоя при колебаниях нагрузки, однако эффективно снижает температуру материала слоя путем увеличения доли топлива в слое. Согласно [77] снижение высоты слоя также должно снижать агломерацию.

На рисунках 4.25 и 4.26 представлены данные о средних температурах кипящего слоя в течении трех месяцев эксплуатации котельного агрегата. По сравнению с работой кипящего слоя в разделе 4.8 удалось снизить среднюю температуру слоя на 45 °С. Средний расход первичного воздуха на ожигание кипящего слоя был выше примерно на 40% чем в 4.7 и выдерживался постоянным в пределах 16-16,5 м/с. Падение средней температуры 21 января на графиках связано с остановом котла в горячий резерв при отключении всех потребителей технологического пара.

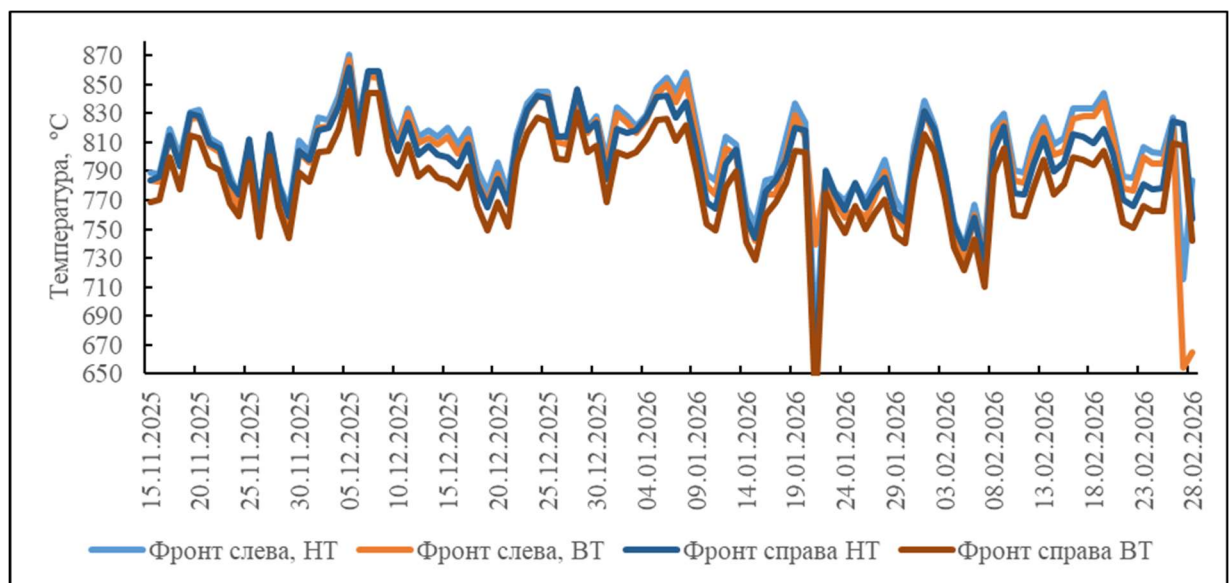


Рисунок 4.25 Температура кипящего слоя в передней части котла

ВТ – верхняя термопара (500 мм); НТ – нижняя термопара (300 мм)

Как видно по графикам (рисунки 4.25 и 4.26) температура в передней и задней части кипящего слоя в начале эксплуатационного цикла отличалась незначительно.

По мере роста концентрации калия в материале слоя и укрупнении частиц слоя росла разница температур и после месяца эксплуатации температуры в задней части котла снизились на 70 °С. С 5 недели эксплуатации с задней части котельного агрегата дренировались небольшие агломераты (размером до 30 мм), с 7 недели с передней части (размером до 20 мм).

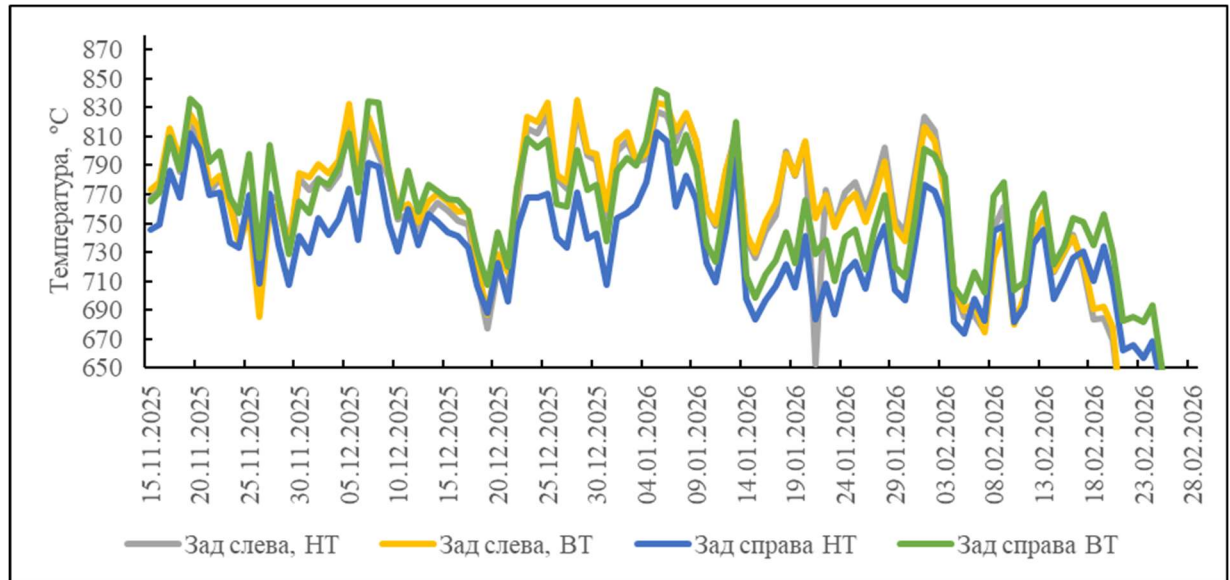


Рисунок 4.26 Температура кипящего слоя в задней части котла

ВТ – верхняя термопара (500 мм); НТ – нижняя термопара (300 мм)

С 11 недели работы кипящего слоя с кипящего слоя уже дренировались крупные агломераты шириной до 200 мм (рисунок 4.27). На 15 недели эксплуатации произошла дефлюидизация задней части кипящего слоя, что можно отчетливо увидеть по снижению температуры на рисунке 4.25.



Рисунок 4.27 Агломераты, отобранные на 11 неделе эксплуатации кипящего слоя

В процессе осмотра кипящего слоя во время его замены было обнаружено множество крупных агломератов в задней части слоя. Большая часть агломератов была образована агломерацией вызванной покрытием. Однако в слое также были обнаружены образцы агломерации вызванной расплавом (рисунок 4.28).

Проведенное испытание показало, что снижение температуры и увеличение расхода воздуха на ожижение являются эффективными способами снижения агломерации кипящего слоя, по сравнению с ОПИ в разделах 4.1-4.7 котел отработал более длительный срок. Однако данный способ имеет несколько проблем в реализации: снижается инерционность котельного агрегата из-за меньшего количества материала слоя и необходимости поддерживать большой расход первичного воздуха, снижается КПД из-за увеличения нагрузки вентилятора первичного воздуха, процесс агломерации резко ускоряется при накоплении калия в слое вплоть до его дефлюидизации. Агломераты, вызванные расплавом, свидетельствуют о том, что даже при высоких скоростях ожижения возможны локальные перегревы кипящего слоя.



Рисунок 4.28 Агломераты, отобранные после останова котельного агрегата

4.10 Микроскопические исследования агломератов

На рисунке 4.29 представлен образец агломерата, отобранный в процессе испытаний котла в разделах 4.1-4.7. На рисунке видно, что агломерированная частица песка состоит из нескольких частей, которые связывает между собой топливная зола.

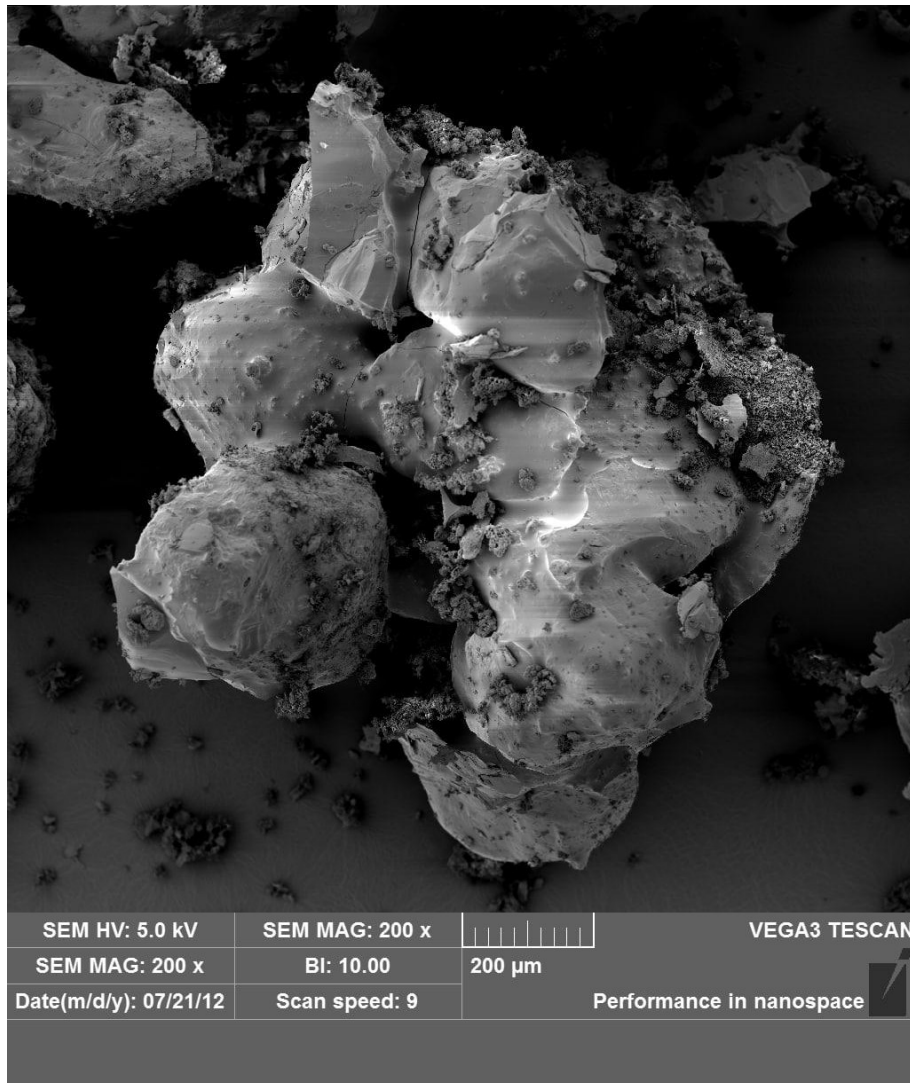


Рисунок 4.29 – СЭМ изображение кварцевого песка, покрытого частицами топливной золы

При увеличении разрешения (рисунок 4.30) можно отчетливо увидеть, что частица кварцевого песка имеет небольшие углубления, в которые попадает и застревает топливная зола. Это можно назвать первой стадией агломерации – укрупнение частиц кварцевого песка. Налипание золы в неровностях кварцевого

песка влияет на ее форму, делая её более округлой, что ухудшает кипение слоя [128], снижая минимальную скорость ожигания.

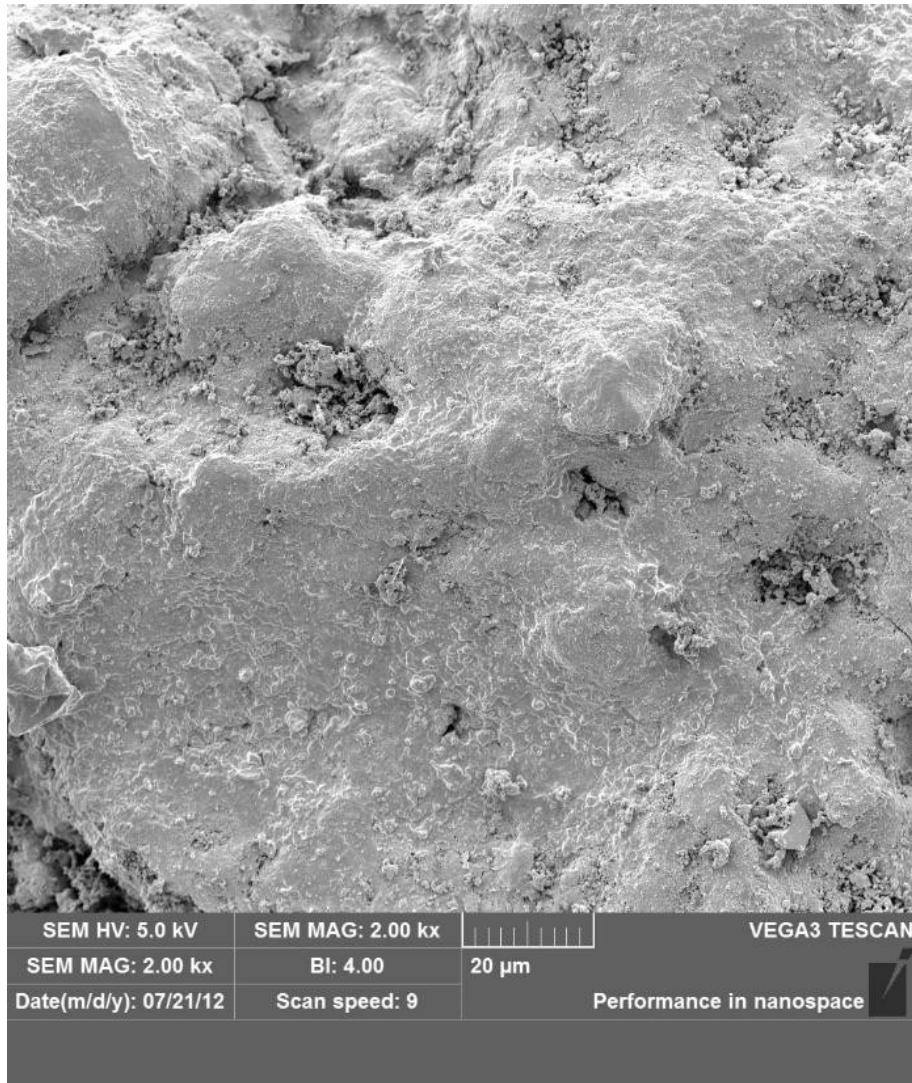


Рисунок 4.30 – СЭМ изображение кварцевого песка с частицами золы на неровностях

Налипшая на кварцевый песок зола состоит преимущественно из калия [60]. Данный слой при столкновении частиц в процессе интенсивного кипения приводит к слипанию песчинок и их постепенному увеличению, что можно назвать второй стадией агломерации. В процессе эксплуатации при увеличении содержания калия в слое увеличивается количество частиц, налипающих на песок, что со временем резко ускоряет их укрупнение вплоть до размера, когда агломерированные частицы не будут ожигаться.

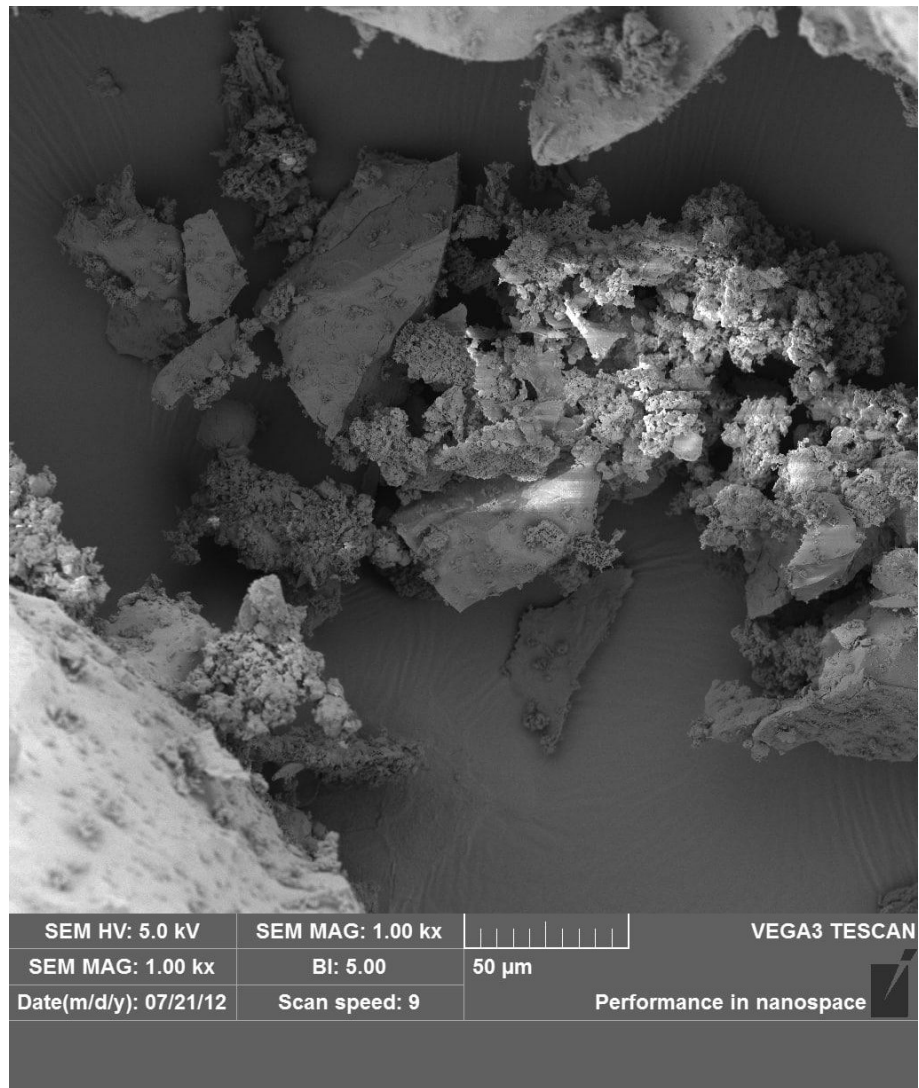


Рисунок 4.31 – СЭМ изображение агломерированных частиц слоя в конце эксплуатационного цикла котла

Рисунок 4.31 показывает агломерированные частицы слоя в конце эксплуатации котла (максимальное содержание калия). Видно, что небольшие частицы песка связаны между собой мостиком из золы. Это связано с двумя явлениями. Первое - ухудшение минимальной скорости псевдоожижения приводит к тому, что частицы золы ударяясь друг о друга с небольшой скоростью прилипают друг к другу. Второе – ухудшение ожижения слоя приводит к тому, что частицы кварцевого песка практически не ударяют топливо, горение которого будет проходить по законам слоевого сжигания.

Можно отметить, что на всех СЭМ изображениях показана агломерация покрытием.

4.11 Материальный баланс оксида калия в кипящем слое

Основной причиной агломерации материала псевдооживленного слоя является высокое содержание калия в слое, что приводит к образованию легкоплавкой эвтектики диоксида калия и кремния [34, 66, 129]. В работе [67] авторы обнаружили, что одним из наиболее эффективных способов борьбы с образованием агломератов в псевдооживленном слое является увеличение скорости дренажа донной золы, поскольку это снижает концентрацию калия в материале слоя и предотвращает образование агломератов, поскольку позволяет быстро удалять скопившиеся частицы и предотвращает их образование. сплавление в крупные агломераты. На ТЭС-3 расход (в соответствии с нормами) свежего песка для засыпки-75-3,9-440 составляет 1000 кг, дренаж - 1200 кг. Чтобы увеличить продолжительность работы псевдооживленного слоя, необходимо увеличить сброс зольного остатка и подачу свежего песка для снижения критической концентрации калия в слое [59].

Чтобы оценить необходимое количество добавки кварцевого песка, мы используем уравнение материального баланса соединений калия. Поскольку добавляемый песок не содержит щелочных соединений, а процент уноса составляет 0,95, то отношение расхода добавляемого материала к расходу золы [59]:

$$G_c/G_a = (S_a - S_{fa})/20S_{cp}, \text{ где}$$

G_c – Добавка нового кварцевого песка в слой.

G_a – Поступление золы (11,500 кг/день при сжигании осадка сточных вод и лиственного кородревесного топлива).

S_a – Содержание калия в топливной золе (9.73%)

S_{fa} – Содержание калия в летучей золе (3.65%)

S_{cp} – Концентрация калия в слое (1%)

Исходя из критической концентрации калия в слое, равной 1%, относительный расход добавляемого песка для котла Е-75-3,9-440 Составит приблизительно 3,5 тонны в день, а расход дренажа - приблизительно 4,0 тонны в

день при сжигании осадка сточных вод и отходов лиственной древесины (максимальное содержание калия). При текущем добавлении нового кварцевого песка в среднем в количестве 470 кг в день (согласно рисунку 5.3) критическая концентрация калия составит 7,44%. В то же время среднее содержание калия в слое в конце эксплуатации (рисунки 4.14) составило 7,36%. Это говорит о том, что можно эффективно контролировать максимальную концентрацию калия в материале псевдоожиженного слоя, зная химический состав биомассы и золы.

4.12 Рекомендации по исключению агломерации материала кипящего слоя с частицами топливной золы

В ходе исследований процесса агломерации материала кипящего слоя с частицами топливной золы котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ было обнаружено:

1. В период начальной эксплуатации котельного агрегата с обновленным кипящим слоем не производится добавка свежего кварцевого песка и дренирование донной золы.
2. Визуальный анализ донной золы и количества содержащихся в ней агломератов показал, что количество и размер агломератов с течением эксплуатации увеличивается.
3. Гранулометрические исследования и рентгенофлуоресцентный анализ донной золы показал, что при росте содержания оксида калия в материале слоя резко растет доля частиц слоя размером свыше 1.2 мм.
4. Расчетная скорость оживания с ростом гранулометрического состава донной золы увеличивается почти в два раза, что говорит о замедлении процесса оживания.
5. Рентгенофлуоресцентный анализ донной золы и агломератов показал резкий рост содержания оксидов калия, которые образуют легкоплавкую эвтектику с материалом слоя (кварцевым песком).

6. Увеличение скорости ожигения и снижение температуры материала слоя во время эксплуатации позволяет увеличить межремонтный период котельного агрегата (время между остановами на замену слоя) на 6 недель. Однако данные режимные мероприятия не могут исключить интенсивную агломерацию кипящего слоя из-за накопления оксидов калия в слое и его локальных перегревов.

Для исключения процесса агломерации материала слоя и частиц топливной золы предложены следующие мероприятия:

1. Дренаж материала кипящего слоя и добавка нового кварцевого песка при начале эксплуатации котельного агрегата с обновленным слоем.

2. Увеличение количества дренируемого материала слоя и увеличение количества добавляемого кварцевого песка для снижения концентрации оксида калия в слое.

3. Контроль гранулометрического состава донной золы, который служит косвенным показателем накопления в слое оксида калия и агломератов.

4. Контроль минимальной скорости ожигения кипящего слоя (по гранулометрическому составу донной золы), увеличение количества подаваемого первичного воздуха с ростом размеров частиц.

5. Снижение температуры кипящего слоя для исключения образования легкоплавких эвтектик.

6. Использование альтернативных материалов кипящего слоя со сниженным содержанием оксида кремния, например, доломит (не содержит SiO_2) оливин (40% SiO_2), диабаз (45-52% SiO_2) или использование добавок.

Использование альтернативных материалов слоя или использование добавок к материалу псевдоожигенного слоя может быть эффективным способом борьбы с агломерацией [59, 76, 77]. Поэтому в работе [59] авторы использовали оксид железа в качестве материала слоя при сжигании биомассы и получили результаты, согласно которым калий, взаимодействуя с оксидами железа, образует неплавкую эвтектику, не образуя агломератов. В работах [76] и [77] авторы снизили скорость агломерации при использовании оливина в качестве материала псевдоожигенного

слоя. В работе [130] в качестве материала псевдоожиженного слоя был успешно использован оксид алюминия. В первые годы эксплуатации котлов с псевдоожиженным слоем в качестве материала слоя на ТЭС-3 Архангельского целлюлозно-бумажного комбината использовался диабаз (с высоким содержанием алюминия), при использовании которого процессы агломерации практически не наблюдались.

4.13 Техничко-экономическая оценка технических решений, направленных на исключение агломерации в материале кипящего слоя

В разделе проведена технико-экономическая оценка предложенных технических мероприятий, направленных на увеличение надежности работы котельных агрегатов с кипящим слоем сжигающих осадок сточных вод и кородревесное топливо. Реализация данных мер повысит надёжность и экономическую эффективность работы котельных агрегатов, а также снизит экологическую нагрузку за счёт увеличения доли альтернативных топлив в топливном балансе.

В таблице 4.4 представлены затраты на технические мероприятия.

Таблица 4.4 – Затраты на технические мероприятия по увеличению надежности работы котельных агрегатов с кипящим слоем

Мероприятия	Затраты
Увеличение объема дренируемого и нового материала слоя (кварцевого песка)	5 тыс руб/день на 1 котельный агрегат
Замена материала слоя на оливиновый песок	2 тыс. руб/день на 1 котельный агрегате

Мероприятия	Затраты
Замена материала слоя на альтернативные наполнители на доломит	4 тыс. руб/день на 1 котельный агрегат

Для повышения длительности эксплуатационного периода материала кипящего слоя котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ, КМ75-40 и Е-83,5-9,8-540 ДФ предложено увеличить расход кварцевого песка на Е-75-3,9-440 ДФТ и Е-83,5-9,8-540 ДФ до 1,5 тонн в день, на КМ75-40М до 1 тонны в день. Это позволит в несколько раз снизить процесс агломерации материала слоя котлов снизив время их простоя и затраты на растопку с помощью мазута.

Простой котлоагрегатов при останове на замену материала кипящего слоя составляет 48 часов, цена тонны кварцевого песка составляет 10 тыс. рублей. В год, 6 дней простоя котлоагрегата и замена слоя на Е-75-3,9-440 ДФТ обходится АО АЦБК в 5709 тыс. рублей, 4 дня простоя и замена слоя на КМ75-40М 2829 тыс. рублей, 4 дня простоя котельного агрегата и замена слоя на Е-83,5-9,8-540 ДФ в 4190 тыс. руб.

Для снижения расхода материала кипящего слоя котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ, Е-83,5-9,8-540 ДФ, КМ75-40 предложено производить только частичный слив материала кипящего слоя в период его замены. В среднем за год котлоагрегат Е-75-3,9-440 ДФТ останавливается для замены только материала кипящего слоя 3 раза, при текущем и среднем ремонте материал слоя также меняется – в среднем 2 раза в год. Активная масса кипящего слоя котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ составляет ~37 тонн кварцевого песка, пассивной части – 23 тонн кварцевого песка. Соответственно при 5 заменах слоя экономия кварцевого песка составит 115 тонн. Экономия на одном кварцевом песке при 1 замене материала кипящего слоя составляет 230 тыс. рублей, при 5 заменах – 1150 тыс. рублей. Замена песка на котлоагрегате Е-83,5-9,8-540 ДФ производится 3 раза в год. Экономия песка на Е-83,5-9,8-540 ДФ в год при массе пассивной части кипящего

слоя 35 тонн составит 700 тыс. рублей. Останов котлоагрегата КМ75-40М только на замену песка производится 2 раза в год, еще 2 раза слой обновляется во время ремонта. Экономия песка при массе пассивной части кипящего слоя 11 тонн составит 440 тыс. рублей. Общий экономический эффект от мероприятия – 2290 тыс. рублей.

В среднем за год мероприятия по исключению процесса агломерации кипящего слоя при сжигании осадка сточных вод и кородревесного топлива позволят сэкономить 1200 т.у.т. в год, а также увеличить выработку электроэнергии за счет сжигания альтернативных топлив на 1500 МВт·ч в год. За счет увеличения средней нагрузки котельных агрегатов при отсутствии процессов агломерации удастся достигнуть экономии в 2000 т.у.т в год и увеличить выработку электроэнергии за счет альтернативных топлив на 2500 МВт·ч в год.

Выводы по главе 4

1. Агломерация в псевдооживленном слое возникает из-за спекания частиц золы с инертным материалом. Это ведёт к росту эксплуатационных затрат (покупка нового песка, утилизация отходов, незапланированные остановки котла). Ключевые факторы агломерации – это высокое содержание щелочных элементов (K, Na) в золе топлива. При концентрации K_2O свыше 1 % резко возрастает образование легкоплавкой эвтектики K_2O-SiO_2 , вызывающей спекание.

2. Температура слоя (754–840 °С) способствует плавлению зольных компонентов и формированию агломератов. Минимальная скорость псевдооживления (U_{mf}) увеличилась с 0,33 м/с до 0,59 м/с, а коэффициент псевдооживления (U/U_{mf}) снизился с 6,13 до 3,38, указывая на ухудшение гидродинамики слоя.

3. Калий (K_2O) — главный катализатор агломерации. Его концентрация в слое выросла в 6 раз за период эксплуатации, превысив критический порог (1 %). Кальций (CaO) и магний (MgO) повышают температуру плавления золы, замедляя агломерацию. Увеличение CaO также снижает выбросы SO_2 за счёт связывания

серы. Оксиды железа (Fe_2O_3) и алюминия (Al_2O_3) тормозят спекание, образуя высокотемпературные соединения с щелочами.

4. Дренаж и добавка песка — текущий режим (1000 кг свежего песка и 1200 кг дренажа в сутки) недостаточен для контроля концентрации K_2O . Расчёты показывают, что для поддержания $\text{K}_2\text{O} \leq 1\%$ требуется: добавка песка — $\sim 3,5$ т/сутки, дренаж — $\sim 4,0$ т/сутки.

5. Крупные агломераты имеют плотную оболочку и рыхлую сердцевину из расплава золы и песка. В составе преобладают SiO_2 (62–66 %), K_2O (6,2–6,6 %), CaO (15,5–17,2 %), что подтверждает роль K-Si-Ca взаимодействий.

6. Режимные мероприятия могут служить эффективным способом снижения агломерации, однако имеют ряд существенных недостатков и не исключают процесс агломерации при накоплении калия в материале слоя.

7. Для долгосрочной эксплуатации котлов с кипящим слоем необходимо внедрить систему непрерывного контроля концентрации K_2O в слое, оптимизировать график дренажа и добавки песка на основе реального состава топлива, провести испытания альтернативных инертных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен термический анализ, получены теплотехнические характеристики и элементный состав кородревесного топлива и осадка сточных вод.

2. Получен механизм термического разложения основных органических компонентов кородревесного топлива и осадка сточных вод (гемицеллюлоз, целлюлозы, лигнина). Исследованы газовые компоненты, выделяющиеся в процессе термодеструкции кородревесного топлива и осадка сточных вод.

3. Исследована энергетическая эффективность работы трех котельных агрегатов с кипящим слоем – Е-75-3,9-440 ДФТ, КМ75-40М и Е-83,5-9,8-540 ДФ энергетически утилизирующих осадок сточных вод в смеси с кородревесным топливом.

4. Выполнены экспериментальные исследования эмиссий вредных веществ, а также твердых частиц при сжигании осадка сточных вод с кородревесным топливом в котельном агрегате с кипящим слоем Е-83,5-9,8-540 ДФ.

5. Исследование процесса агломерации кипящего слоя показало, что из-за укрупнения донной золы ухудшается гидродинамика кипящего слоя, что приводит к снижению нагрузки котельного агрегата. Концентрация оксида калия в материале слоя в период эксплуатации превышает критический порог в 6 раз, что резко интенсифицирует процесс агломерации снижая надежность работы кипящего слоя.

6. Разработаны технические мероприятия по снижению агломерации кипящего слоя котлоагрегатов сжигающих кородревесное топливо и осадок сточных вод, позволяющие увеличить период их бесперебойной работы.

7. Предложенные технические мероприятия по увеличению надежности и энергоэффективности котельных агрегатов с кипящим слоем позволят сэкономить ~3200 т.у.т. в год, а также увеличить выработку электроэнергии за счет сжигания альтернативных топлив на 4000 МВт·ч в год.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации

Перспективами дальнейшей разработки темы диссертационной работы являются:

1. Исследование работы котельных агрегатов с кипящим слоем при сжигании вторичных энергоресурсов Архангельской области: опилок, пеллет из опилок, торфа и торфяных гранул.
2. Исследование работы котельных агрегатов с кипящим слоем при использовании альтернативных материалов слоя.
3. Исследование процесса агломерации кипящего слоя промышленных котельных агрегатов при сжигании различных вторичных энергоресурсов Архангельской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российская Федерация. Правительство. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 12.04.2025 г. № 908-р // ИПС «Законодательство России» : офиц. сайт Информационно-правовой системы «Законодательство России». — Москва, 2025. — Электронный ресурс.
2. ИСО 50001:2018. Системы энергоменеджмента. Требования. — Введ. 2018-08-21. — Москва, 2018. — 30 с.
3. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон : принят Гос. думой 11 ноября 2011 г., одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 г. : ред., действующая с 16.01.2019 г. — М. : Проспект, 2019. — 52 с.
4. Указ Президента РФ от 13 мая 2019 г. № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации».
5. Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года (утв. Президентом РФ от 30 апреля 2012 г.).
6. Кавешников, Н. Ю. Стратегия ЕС в области климата и энергетики / Н. Ю. Кавешников // Современная Европа. — 2015. — № 1(61). — С. 93–103. — URL: [dx.doi.org/10.15211/soveurope1201593103](https://doi.org/10.15211/soveurope1201593103).
7. Беликова, С. С. Восток и Запад: глобальные вызовы на пути достижения углеродной нейтральности / С. С. Беликова, А. В. Беликов // Управление. — 2022. — Т. 10, № 2. — С. 5–13. — DOI: 10.26425/2309-3633-2022-1 gef 10-2-5-13.
8. Бобылев, С. Н. Приоритеты низкоуглеродного развития для Китая / С. Н. Бобылев, А. В. Барабошкина, Джу Сюан // Государственное управление. Электронный вестник. — 2020. — № 82. — С. 114–139. — DOI: 10.24411/20701381-2020-10095.
9. Бояркина, А. В. Экологическое направление во внешнеполитической стратегии КНР / А. В. Бояркина // Вестник РУДН. Серия: Международные

отношения. — 2021. — Т. 21, №2. — С. 325–337. — DOI: 10.22363/2313-0660-2021-212-325-337.

10. Веселова, Д. Н. Климатическая политика Российской Федерации: законодательные и институциональные аспекты / Д. Н. Веселова // Научный журнал «ДискурсПи». — 2021. — Т. 18, №3. — С. 96–111. — DOI: 10.17506/18179568_2021_18_3_96.

11. Галимзянова, А. К. Климатическая дипломатия Китая и Германии / А. К. Галимзянова // Восточный альманах. — 2021. — № 5. — С. 14–29.

12. Ковалев, Ю. Ю. Страны БРИКС в международной климатической политике / Ю. Ю. Ковалев, О. С. Поршнева // Вестник Российского университета дружбы народов. — 2021. — Т. 21, №1. — С. 64–78. — DOI: 10.22363/2313-06602021-21-1-64-78.

13. Hidayat, H. Oil palm biomass ash removal for boiler fuel optimization: A case study / H. Hidayat, Fausiah, A. Anam, Destian Sudono, E. F. Noor, I. Ghofar, A. Rosjidi, M. Harmadi, R. Islam Nuswantoro, D. B. Aminuddin, Sitorus R. S., D. Rosadi, M. Saleh, Hariana, T. B. Priambodo, Iman, Umiati, Hadiyanto // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. — 2024. — Vol. 11. — Art. № 101049. — DOI: 10.1016/j.cscee.2024.101049.

14. Teoh, R. H. A review on hydrothermal treatments for solid, liquid and gaseous fuel production from biomass / R. H. Teoh, A. S. Mahajan, S. R. Moharir, N. Abdul Manaf, S. Shi, S. Thangalazhy-Gopakumar // Energy Nexus. — 2024. — Vol. 14. — Art. № 100301. — DOI: 10.1016/j.nexus.2024.100301.

15. Sajid, J. Energetic, economic, and greenhouse gas emissions assessment of biomass and solar photovoltaic systems for an industrial facility / J. Sajid, M. B. Sajid, M. M. Ahmad, M. Kamran, R. Ayub, N. Ahmed, M. Mahmood, A. Abbas // Energy Reports. — 2022. — Vol. 8. — P. 12503–12521. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.041>

16. Gani, A. Proximate and ultimate analysis of corncob biomass waste as raw material for biocoke fuel production / A. Gani, Adisalamun, D. M. R. Arkan,

Suhendrayatna, M. Reza, Erdiwansyah, Saiful, H. Desvita // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. — 2023. — Vol. 8. — Art. № 100525. — DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100525.

17. Xiao, B. Improving sewage sludge dewaterability via heterogeneous activation of persulfate by Fe–Al layered double hydroxide: Role of generated $\text{SO}_4^{\cdot-}$ / B. Xiao, X. Chen, K. Zhang, T. Zheng, C. Bian, J. Liu, L. Li, J. Liu // Journal of Environmental Management. — 2023. — Vol. 342. — Art. № 118194. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118194.

18. Liu, H. Energy, environment and economy assessment of sewage sludge incineration technologies in China / H. Liu, H. Qiao, S. Liu, G. Wei, H. Zhao, K. Li, F. Weng // Energy. — 2023. — Vol. 264. — Art. № 126294. — DOI: 10.1016/j.energy.2022.126294.

19. Zhou, B. Advances in biomass torrefaction: Mechanisms, process optimization, and environmental impacts / B. Zhou, W. Wu, X. Li, R. Dai, Z. Wang // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. — 2023. — Vol. 93. — Art. № 101040. — DOI: 10.1080/10643389.2023.2292972.

20. Nguyen, V. K. Catalytic co-pyrolysis of plastic and biomass for production of high-quality bio-oil: A review on process parameters and catalysts / V. K. Nguyen, D. Kumar Chaudhary, R. Hari Dahal, N. Hoang Trinh, J. Kim, S. W. Chang, Y. Hong, D. Duc La, X. C. Nguyen, H. Hao Ngo, W. J. Chung, D. D. Nguyen // Fuel. — 2021. — Vol. 285. — Art. № 119105. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119105.

21. Geng, H. Enhanced anaerobic digestion of food waste via pretreatment with ultrasound and alkali: Methane yield and microbial community analysis / H. Geng, Y. Xu, X. Dai, D. Yang // Science of the Total Environment. — 2023. — Vol. 218. — Art. № 169313. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169313.

22. D'Imporzano, G. Composting of organic waste in biowaste-dedicated plants: Process optimization and greenhouse gas emissions reduction / G. D'Imporzano, F. Adani // Science of the Total Environment. — 2023. — Art. № 167025. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167025.

23. Chen, Z. Techno-economic analysis and life cycle assessment of integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) systems with carbon capture and storage / Z. Chen, Y. Hou, M. Liu, G. Zhang, K. Zhang, D. Zhang, L. Yang, Y. Kong, X. Du // *Applied Energy*. — 2022. — Art. № 120093. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120093.
24. Ronda, A. Waste-to-energy via gasification: A techno-economic assessment of small-scale systems for decentralized energy production / A. Ronda, P. Haro, A. Gómez-Barea // *Waste Management*. — 2023. — P. 52–62. — DOI: 10.1016/j.wasman.2023.01.025.
25. Huang, C. Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries: A review of leaching techniques and process optimization / C. Huang, B. A. Mohamed, L. Y. Li // *Resources, Conservation and Recycling*. — 2022. — P. 3143–3165. — DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106273.
26. Wang, S. Hydrogen production from steam reforming of biomass tar over Ni-based catalysts: A review on catalyst design and reaction mechanisms / S. Wang, Z. Shi, Y. Jin, I. N. Zaini, Y. Li, C. Tang, W. Mu, Y. Wen, J. Jiang, P. G. Jönsson, W. Yang // *Energy Conversion and Management*. — 2022. — Vol. 10. — Art. № 115613. — DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115613.
27. Jadlovec, M. Pollutants production, energy recovery and environmental impact of sewage sludge co-incineration with biomass pellets / M. Jadlovec, J. Výtisk, S. Honus, V. Pospišilík, N. Bassel // *Environmental Technology & Innovation*. — 2023. — Vol. 32. — Art. № 103400. — DOI: 10.1016/j.eti.2023.103400.
28. Strandberg, A. Morphology and phosphate distribution in bottom ash particles from fixed-bed co-combustion of sewage sludge and two agricultural residues / A. Strandberg, M. Thyrel, J. Falk, M. Öhman, N. Skoglund // *Waste Management*. — 2024. — Vol. 177. — P. 56–65. — DOI: 10.1016/j.wasman.2024.01.040.
29. Wang, G. In-situ oxygen measurement by a YSZ oxygen sensor during sewage sludge combustion / G. Wang, H. Chen // *International Journal of Electrochemical Science*. — 2020. — Vol. 15, № 8. — P. 8055–8069. — DOI: 10.20964/2020.08.45.

30. Kalak, T. Efficient use of circulating fluidized bed combustion fly ash and slag generated as a result of sewage sludge incineration to remove cadmium ions / T. Kalak // *Desalination and Water Treatment*. — 2022. — Vol. 264. — P. 72–90. — DOI: 10.5004/dwt.2022.28575.

31. Bień, J. D. Study of chemical and physical properties of ash derived from oxy-combustion of sewage sludge and coal blend / J. D. Bień, B. Bień // *Desalination and Water Treatment*. — 2018. — Vol. 117. — P. 221–228. — DOI: 10.5004/dwt.2018.22459.

32. Karlsson, S. Reducing high-temperature corrosion on high-alloyed stainless steel superheaters by co-combustion of municipal sewage sludge in a fluidised bed boiler / S. Karlsson, L.-E. Åmand, J. Liske // *Fuel*. — 2015. — Vol. 139. — P. 482–493. — DOI: 10.1016/j.fuel.2014.09.007.

33. Hannl, T. K. Bubbling fluidized bed co-combustion and co-gasification of sewage sludge with agricultural residues with a focus on the fate of phosphorus / T. K. Hannl, N. Skoglund, J. Priščák, M. Öhman, M. Kuba // *Fuel*. — 2024. — Vol. 357. — Art. № 129822. — DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129822.

34. Kim, J.-W. Bubbling fluidized bed biomass gasification using a two-stage process at 600 °C: A way to avoid bed agglomeration / J.-W. Kim, Y.-S. Jeong, J.-S. Kim // *Energy*. — 2022. — Vol. 250. — Art. № 123882.

35. Симонов А. Д., Языков Н. А., Трачук А. В., Яковлев В. А. СЖИГАНИЕ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ КАТАЛИЗАТОРА // АЭЭ. 2010. №6.

36. ИТС 9-2020 «Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами» (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2020 г. №2181).

37. Roeder, G. J. Measurements of NO_x emissions from biomass combustion in small to large-scale power plants / G. J. Roeder, J. Haimerl, Y. Chen, M. Gaderer, S. Fendt, H. Spliethoff // *Fuel*. — 2025. — Vol. 397. — Art. № 135801. — DOI: 10.1016/j.fuel.2025.135801.

38. Kaewsiri, U. Optimizing biomass combustion and mitigating potassium induced slag formation with deep learning / U. Kaewsiri, S. Innet // *Fuel*. — 2025. — Vol. 401. — Art. № 135843. — DOI: 10.1016/j.fuel.2025.135843.

39. Mörtenkötter, H. Potassium release and mitigation by additives in different biomass combustion systems / H. Mörtenkötter, F. Kerscher, M. Schönsteiner, S. DeYoung, S. Fendt, H. Spliethoff // *Fuel*. — 2024. — Vol. 369. — Art. № 131800. — DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131800.

40. Senneca, O. Kinetics of combustion of lignocellulosic biomass: recent research and critical issues / O. Senneca, F. Cerciello // *Fuel*. — 2023. — Vol. 347. — Art. № 128310. — DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128310.

41. Pettersson, M. Recycling of ash from co-incineration of waste wood and forest fuels: An overlooked challenge in a circular bioenergy system / M. Pettersson, L. Björnsson, P. Börjesson // *Biomass and Bioenergy*. — 2020. — Vol. 142. — Art. № 105713. — DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105713.

42. Duan, Y. Effect of hydrothermal process on the pyrolysis of oily sludge: Characterization and analysis of pyrolysis products / Y. Duan, Y. Ning, N. Gao, C. Quan, P. Grammelis, P. Boutikos // *Fuel*. — 2023. — Vol. 338.

43. Kirsanovs, V. Investigation of Biomass Gasification Process with Torrefaction Using Equilibrium Model / V. Kirsanovs, A. Zandeckis // *Energy Procedia*. — 2015. — Vol. 72. — P. 329–336. — DOI: 10.1016/j.egypro.2015.06.048.

44. Ogi, T. Gasification of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) bark in an entrained gasifier / T. Ogi, M. Nakanashi // *Renewable Energy*. — 2006. — P. 1050–1054.

45. Braga, R. M. Characterization and comparative study of pyrolysis kinetics of the rice husk and the elephant grass / R. M. Braga // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. — 2013. — Vol. 11. — DOI: 10.1007/s10973-013-3503.

46. Гревцев, Н. В. Геоэкологические и технологические аспекты комплексного использования торфяных ресурсов Урала / Н. В. Гревцев, А. Г. Шампаров, А. А. Бастриков, И. Н. Гревцева // *Горный*

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2012. — № 4. — С. 351–356.

47. Дубоделова, Е. В. Особенности технологии топливных пеллет из древесины лиственных пород / Е. В. Дубоделова, Н. А. Сычёва, И. А. Хмызов, Т. А. Снопкова, Т. В. Соловьёва // Труды БГТУ. Серия 2: Химия, технология органических веществ и биотехнология. — 2012. — № 4. — С. 166–168.

48. Зотова, Е. В. Аналитическое исследование параметров, определяющих технологию производства древесных пеллет / Е. В. Зотова, А. О. Сафонов, А. Д. Платонов // Лесотехнический журнал. — 2014. — № 1(13). — С. 127–132.

49. Gilvari, H. Quality Parameters Relevant for Densification of Bio-Materials: Measuring Methods and Affecting Factors — A Review / H. Gilvari, W. de Jong, D. L. Schott // Biomass and Bioenergy. — 2019. — Vol. 120. — P. 117–134. — DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.013.

50. Сычёва, Н. А. Влияние режима гранулирования и состава топливных пеллет на их прочностные свойства / Н. А. Сычёва, И. А. Хмызов, Т. В. Соловьёва // Лесной вестник / Forestry Bulletin. — 2016. — № 20(3). — С. 72–79.

51. Alabdralameer, H. Big problem, little answer: Overcoming bed agglomeration and reactor slagging during the gasification of barley straw under continuous operation / H. Alabdralameer, T. Pikkarainen, M. Taylor, V. Skoulou // Sustainable Energy & Fuels. — 2020. — Vol. 4. — Art. № 376472.

52. Basu, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. 2nd ed. — UK: Academic Press, 2013.

53. Chaivatamaset, P. Bed particle agglomeration and defluidization in the rubber wood and coir-fired fluidized beds / P. Chaivatamaset, S. Tia, W. Methaviriyasilp, W. Pumiampran // Waste and Biomass Valorization. — 2019. — Vol. 10. — Art. № 345770.

54. Leffler, T. Monitoring of bed material in a biomass fluidized bed boiler using an electronic tongue / T. Leffler, M. Eriksson, B. Leckner, F. Lind, F. Winqvist, P. Knutsson // Fuel. — 2023. — Vol. 340. — Art. № 127598. — DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127598.

55. Mlonka-Mędrala, A. Composition and properties of fly ash collected from a multifuel fluidized bed boiler co-firing refuse derived fuel (RDF) and hard coal / A. Mlonka-Mędrala, T. Dziok, A. Magdziarz, W. Nowak // *Energy*. — 2021. — Vol. 234. — Art. № 121229. — DOI: 10.1016/j.energy.2021.121229.

56. Zhang, L. A review on multi-solids fluidized beds / L. Zhang, Z. Fu, J. Li, R. Wang, X. Bi // *Powder Technology*. — 2 Newton. — Vol. 414.

57. Stenberg, V. Evaluation of bed-to-tube heat transfer in a fluidized bed heat exchanger in a 75 MWth CFB boiler for municipal solid waste fuels / V. Stenberg, M. Rydén, F. Lind // *Fuel*. — 2023. — Vol. 339. — DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127375.

58. Lyubov, V. Efficiency of burning sediments of waste water in a boiling layer / V. Lyubov, A. Vladimirov, P. Koroleva // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — Vol. 1683. — Art. № 022037. — DOI: 10.1088/1742-6596/1683/2/022037.

59. Ryabov, G. A. Agglomeration during combustion and gasification of fuels in a fluidized bed / G. A. Ryabov, D. S. Litun // *Thermal Engineering*. — 2019. — № 9. — P. 42–59.

60. Furuvik, N. C. I. S. Experimental study and SEM-EDS analysis of agglomerates from gasification of biomass in fluidized beds / N. C. I. S. Furuvik, L. Wang, R. Jaiswal, R. Thapa, M. S. Eikeland, B. M. E. Moldestad // *Energy*. — 2022. — Vol. 252. — Art. № 124034.

61. Royo, J. Chemical study of bottom ash sintering in combustion of pelletized residual agricultural biomass / J. Royo, P. Canalís, D. Quintana // *Fuel*. — 2022. — Vol. 310. — Art. № 122145.

62. Capela, M. N. Characterization of ashes produced from different biomass fuels used in combustion systems in a pulp and paper industry towards its recycling / M. N. Capela, D. M. Tobaldi, M. P. Seabra, L. A. C. Tarelho, J. A. Labrincha // *Biomass and Bioenergy*. — 2022. — Vol. 166. — Art. № 106598.

63. Nascimento, R. F. Agglomeration in fluidized bed: Bibliometric analysis, a review, and future perspectives / R. F. Nascimento, M. F. Ávila, O. P. Taranto, L. E. Kurozawa // *Powder Technology*. — 2022. — Vol. 406. — Art. № 117597.

64. Thy, P. Bed agglomeration in fluidized combustor fueled by wood and rice straw blends / P. Thy, B. M. Jenkins, R. B. Williams, C. E. Lesher, R. R. Bakker // *Fuel Processing Technology*. — 2010. — Vol. 91, № 11. — P. 1464–1485. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.05.024.

65. Liu, Z.-S. Impact of CaO and CaCO₃ addition on agglomeration/defluidization and heavy metal emission during waste combustion in fluidized-bed / Z.-S. Liu, T.-H. Peng, C.-L. Lin // *Fuel Processing Technology*. — 2014. — Vol. 118. — P. 171–179. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2013.09.001.

66. Nisamaneenate, J. Mitigating bed agglomeration in a fluidized bed gasifier operating on rice straw / J. Nisamaneenate, D. Atong, A. Seemen, V. Sricharoenchaikul // *Energy Reports*. — 2020. — Vol. 6. — P. 275–285. — DOI: 10.1016/j.egy.2020.08.050.

67. Рябов, Г. А. Исследование влияния различных факторов на изменение концентрации щелочных элементов, вызывающих агломерацию слоя / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев, О. А. Смирнова, Д. С. Литун // *Теплоэнергетика*. — 2021. — № 1. — С. 85–94. — DOI: 10.1134/S004036362101017.

68. Zhao, L. Application of pulse flow to a fluidized bed for combustion and gasification of wheat straw — A possible way to mitigate agglomeration / L. Zhao, W. Lin, K. Dam-Johansen, H. Wu // *Fuel*. — 2025. — Vol. 379. — Art. № 132955. — DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132955.

69. Терехин, А. П. Влияние химического состава биомассы на процесс агломерации в псевдоожиженном слое котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ / А. П. Терехин, П. А. Марьяндышев, В. К. Любов // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. — 2024. — № 1. — С. 20-27. — DOI 10.17588/2072-2672.2024.1.020-027.

70. Pandey, D. S. Transformation of inorganic matter in poultry litter during fluidised bed gasification / D. S. Pandey, E. Yazhenskikh, M. Müller, M. Ziegner, A. Trubetskaya, J. J. Leahy, M. Kwapinska // *Fuel Processing Technology*. — 2021. — Vol. 221. — Art. № 106918. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106918.

71. Gogolev, I. Investigation of biomass alkali release in a dual circulating fluidized bed chemical looping combustion system / I. Gogolev, T. Pikkarainen, J. Kauppinen, C. Linderholm, B.-M. Steenari, A. Lyngfelt // *Fuel*. — 2021. — Vol. 297. — Art. № 120743. — DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120743.

72. Kuba, M. A review on bed material particle layer formation and its positive influence on the performance of thermo-chemical biomass conversion in fluidized beds / M. Kuba, N. Skoglund, M. Öhman, H. Hofbauer // *Fuel*. — 2021. — Vol. 291. — Art. № 120214. — DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120214.

73. Anicic, B. Agglomeration mechanism in biomass fluidized bed combustion — Reaction between potassium carbonate and silica sand / B. Anicic, W. Lin, K. Dam-Johansen, H. Wu // *Fuel Processing Technology*. — 2018. — Vol. 173. — P. 182–190. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2017.10.005.

74. Narayan, V. Defluidization in fluidized bed gasifiers using high-alkali content fuels / V. Narayan, P. A. Jensen, U. B. Henriksen, P. Glarborg, W. Lin, R. G. Nielsen // *Biomass and Bioenergy*. — 2016. — Vol. 91. — P. 160–174. — DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.05.009.

75. Djerf, T. Solids backmixing and entrainment in the splash zone of large-scale fluidized bed boilers / T. Djerf, D. Pallarès, F. Johnsson // *Powder Technology*. — 2022. — Vol. 404. — Art. № 117471. — DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117471.

76. Bozaghian Bäckman, M. Bed material performance of quartz, natural K-feldspar, and olivine in bubbling fluidized bed combustion of barley straw / M. Bozaghian Bäckman, A. Rebling, M. Kuba, S. H. Larsson, N. Skoglund // *Fuel*. — 2024. — Vol. 364. — Art. № 130788. — DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130788.

77. Morris, J. D. The use of kaolin and dolomite bed additives as an agglomeration mitigation method for wheat straw and miscanthus biomass fuels in a pilot-scale fluidized bed combustor / J. D. Morris, S. S. Daood, W. Nimmo // *Renewable Energy*. — 2022. — Vol. 196. — P. 749–762.

78. Huotari, J. PCDD/F Emissions from Co-Combustion of RDF with Peat, Wood Waste, and Coal in FBC Boilers / J. Huotari, R. Vesterinen // *Hazardous Waste and Hazardous Materials*. — 1996. — January. — P. 1–10. — DOI: 10.1089/hwm.1996.13.1.
79. Lin, W. Agglomeration in bio-fuel fired fluidized bed combustors / W. Lin, K. Dam-Johansen, F. Frandsen // *Chemical Engineering Journal*. — 2003. — Vol. 96, № 1. — P. 171–185. — DOI: 10.1016/j.cej.2003.08.008.
80. Mlonka-Mędrala, A. Composition and properties of fly ash collected from a multifuel fluidized bed boiler co-firing refuse derived fuel (RDF) and hard coal / A. Mlonka-Mędrala, T. Dziok, A. Magdziarz, W. Nowak // *Energy*. — 2021. — Vol. 234. — Art. № 121229. — DOI: 10.1016/j.energy.2021.121229.
81. Zhao, L. Application of pulse flow to a fluidized bed for combustion and gasification of wheat straw — A possible way to mitigate agglomeration / L. Zhao, W. Lin, K. Dam-Johansen, H. Wu // *Fuel*. — 2025. — Vol. 379. — Art. № 132955. — DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132955.
82. Hei, L. Assessment of heavy metal contamination in soil and plants around a coal-fired power plant using ecological risk indices / L. Hei, P. Jin, X. Zhu, W. Ye, Y. Yang // *Procedia Environmental Sciences*. — 2016. — Vol. 31. — P. 232–240.
83. Terekhin, A. P. Investigation of the Morphology, Composition, and Structure of Dehydrated Sewage Sludge of a Pulp and Paper Enterprise / A. P. Terekhin, P. A. Maryandyshev, A. Brillard // *Solid Fuel Chemistry*. — 2024. — Vol. 58, No. 6. — P. 459–464. — DOI 10.3103/S0361521924700368.
84. Yaras, A. Pyrolysis of lignocellulosic biomass in a conical spouted bed reactor: Product distribution and char characterization / A. Yaras, B. Demirel, F. Akkurt, H. Arslanoglu // *Biomass Conversion and Biorefinery*. — 2021. — Vol. 13. — P. 2007–2016.
85. Yu, Y. H. Catalytic steam gasification of biomass for hydrogen production: Effect of alkali and alkaline earth metal catalysts / Y. H. Yu, S. D. Kim, J. M. Lee, K. H. Lee // *Energy*. — 2002. — Vol. 27. — P. 457–469.

86. Nyashanu, P. N. Evaluation of biogas production from municipal solid waste and cow dung: Kinetic modelling and process optimization / P. N. Nyashanu, F. S. Shafodino, L. M. Mwapagha // *Scientific African*. — 2023. — Vol. 20, № 6. — Art. № e01735.

87. Jat Baloch, M. Y. Advanced oxidation processes for treatment of landfill leachate: A review on recent developments and future prospects / M. Y. Jat Baloch, W. Zhang, T. Sultana, M. Akram, B. A. al. Shoumik, Md. Z. Khan, M. A. Farooq // *Environmental Technology & Innovation*. — 2023. — Vol. 32. — Art. № 103266.

88. Tarpani, R. R. Z. Life cycle assessment of biochar production from agricultural residues: Environmental impacts and carbon footprint / R. R. Z. Tarpani, C. Alfonsin, A. Hospido, A. Azapagic // *Journal of Environmental Management*. — 2020. — Vol. 260. — Art. № 109643.

59. Nguyen, V.-T. Sewage and textile sludge thermal degradation kinetic study using multistep approach / V.-T. Nguyen, K.-Y. Chiang // *Thermochimica Acta*. — 2021. — Vol. 698. — April. — Art. № 178871. — DOI: 10.1016/j.tca.2021.178871.

90. Maryandyshev, P. A. Thermochemical conversion of peat in a fluidized bed: Kinetics and product composition / P. A. Maryandyshev, A. A. Chernov, V. K. Lyubov // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*. — 2016. — № 6. — P. 15.

91. Kim, H. Co-gasification of coal and biomass in a fluidized bed: Synergistic effects, gas composition, and tar evolution / H. Kim, S. Yu, M. Kim, C. Ryu // *Energy*. — 2022. — Vol. 254. — Art. № 124446.

92. Deng, R. Pyrolysis behaviors of thermally-thick sewage sludge particle with high moisture content: An experimental and modelling study / R. Deng, L. Wang, R. Zhang, Y. Luo // *Fuel*. — 2021. — Vol. 305. — Art. № 121442.

93. Maryandyshev, P. A. Effect of Moisture on the Characteristics of Co-Incineration of Pulp and Paper Sludge and Municipal Waste / P. A. Maryandyshev, A. Brillard, A. P. Terekhin // *Solid Fuel Chemistry*. — 2025. — Vol. 59, No. 4. — P. 311-318. — DOI 10.3103/S0361521925700211.

94. Deng, R. Pyrolysis behaviors of thermally-thick sewage sludge particle with high moisture content: An experimental and modelling study / R. Deng, L. Wang, R. Zhang, Y. Luo // *Fuel*. — 2021. — Vol. 305. — December. — Art. № 121442. — DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121442.

95. Pradhan, P. Production and Quality Analysis of Biofuel Pellets from Canadian Forest and Agricultural Biomass / P. Pradhan, O. Mohan, V. Kurian, A. Kumar // *Biomass and Bioenergy*. — 2025. — Vol. 194. — Art. № 107697. — DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.107697.

96. Yaqoob, A. A. Thermal Degradation and Kinetics Stability Studies of Oil Palm (*Elaeis Guineensis*) Biomass-Derived Lignin Nanoparticle and its Application as an Emulsifying Agent / A. A. Yaqoob, S. H. Sekeri, M. B. H. Othman, M. N. M. Ibrahim, Z. H. Feizi // *Arabian Journal of Chemistry*. — 2021. — Vol. 14. — Iss. 6. — Art. № 103182. — DOI: 10.1016/j.arabjc.2021.103182.

97. Balogun, A. O. Physico-Chemical Characterization, Thermal Decomposition and Kinetic Modeling of *Digitaria sanguinalis* under Nitrogen and Air Environments / A. O. Balogun, A. A. Adeleke, P. P. Ikubanni, S. O. Adegoke, A. M. Alayat, A. G. McDonald // *Case Studies in Thermal Engineering*. — 2021. — Vol. 26. — Art. № 101138. — DOI: 10.1016/j.csite.2021.101138.

98. Терехин А.П. Термическое разложение пеллет из смеси торфа и кородревесных отходов / А. П. Терехин, П. А. Марьяндышев, И. И. Голованова, А. А. Громов // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. — 2025. — № 3(405). — С. 145-154. — DOI 10.37482/0536-1036-2025-3-145-154.

99. Dong, Y. The Leachate Release and Microstructure of the Sewage Sludge under the Anaerobic Fermentation / Y. Dong, H. Lu, J. Li, Ch. Wang // *Journal of Chemistry*. — 2015. — Vol. 2015. — DOI 10.1155/2015/901021

100. Kurosaki, F. Microstructure of wood charcoal prepared by flash heating / F. Kurosaki, K. Ishimaru, T. Hata // *Carbon*. — 2003. — Vol. 41. — P. 3057–3062.

101. Fu, P. Evolution of char structure during steam gasification of the chars produced from rapid pyrolysis of rice husk / P. Fu, S. Hu, J. Xiang // *Bioresource Technology*. — 2012. — Vol. 114. — P. 691–697.

102. Термический анализ древесных отходов и осадка сточных вод, сжигаемых в кипящем слое на ТЭС-3 АО “Архангельский ЦБК” / А. П. Терехин, А. Брийард, П. А. Марьяндышев [и др.] // *Электрические станции*. — 2025. — № 2(1123). — С. 2-11. — DOI 10.71841/EP.elst.2025.1123.2.01.

103. Werner, K. Thermal decomposition of hemicelluloses / K. Werner, L. Pommer, M. Broström // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. — 2014. — Vol. 110. — November. — P. 130–137. — DOI: 10.1016/j.jaap.2014.08.013.

104. Merdun, H. Effects of biological pre-digestion of sewage sludge processed by fast pyrolysis on bio-oil yield and biochar toxicity / H. Merdun, Z. Boubacar Laougé, Y. V. Sezgin, A. S. Çılgın // *Waste Management*. — 2023. — Vol. 157. — February. — P. 149–158. — DOI: 10.1016/j.wasman.2022.12.016.

105. Yang, X. In-situ and ex-situ catalytic pyrolysis of cellulose to produce furans over red mud-supported transition metal catalysts / X. Yang, J. Zhang, J. Zheng, Z. Liu, J. Liu, S. Li, Y. Ye, W. Xie, J. Fan, H. Lan, D. Wang, Z. Zheng // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. — 2023. — Vol. 169. — January. — Art. 105830. — DOI: 10.1016/j.jaap.2022.105830.

106. Ghodke, P. K. Pyrolysis of sewage sludge for sustainable biofuels and value-added biochar production / P. K. Ghodke, A. K. Sharma, J. K. Pandey, W.-H. Chen, A. Patel, V. Ashokkumar // *Journal of Environmental Management*. — 2021. — Vol. 298. — November. — Art. 113450. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.

107. Modak, S. Generation and characterization of bio-oil obtained from the slow pyrolysis of cooked food waste at various temperatures / S. Modak, P. Katiyar, S. Yadav, S. Jain, B. Gole, D. Talukdar // *Waste Management*. — 2023. — Vol. 158. — March. — P. 23–36. — DOI: 10.1016/j.wasman.2023.01.002.

108. Mali, A. R. Polycyclic aromatic hydrocarbons production from the supercritical pyrolysis of n-decane, ethylcyclohexane, and n-decane / ethylcyclohexane

blends / A. R. Mali, K. Vutukuru, M. J. Wornat // *Proceedings of the Combustion Institute*. — 2023. — Vol. 39. — P. 1019–1028. — DOI: 10.1016/j.proci.2022.08.110.

109. Kasmuri, N. H. Process system engineering aspect of bio-alcohol fuel production from biomass via pyrolysis: An overview / N. H. Kasmuri, S. K. Kamarudin, S. R. S. Abdullah, H. A. Hasan, A. Md. Som // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2017. — Vol. 79. — November. — P. 914–923. — DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.182.

110. Gangwar, P. Density functional studies on the conversion of hydrogen cyanide to vinyl isocyanide using carbon-supported platinum catalysts / P. Gangwar, M. Tiwari, A. Narwal, C. N. Ramachandran // *Computational and Theoretical Chemistry*. — 2021. — Vol. 1205. — Art. № 113442. — DOI: 10.1016/j.comptc.2021.113442.

111. Terekhin, A. P. Efficiency of Power Application of Pulp and Paper Production Waste in E-75-3.9-440 DFT and KM-75-40M Fluidized Bed Boilers / A. P. Terekhin, P. A. Maryandyshev, A. Briard // *Power Technology and Engineering*. — 2025. — Vol. 58, No. 5. — P. 816-823. — DOI 10.1007/s10749-025-01887-2.

112. Терехин, А. П. Проблемы энергетического использования осадка сточных вод в котлоагрегате с кипящим слоем E-75-3,9-440 ДФТ / А. П. Терехин, П. А. Марьяндышев // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. — 2025. — Т. 27, № 5. — С. 106-117. — DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-5-106-117. — EDN QZPTNU.

113. Yu, K. Release and migration characteristics of sodium and potassium in high alkali coal under oxy-fuel fluidized bed combustion condition / K. Yu, X. Chen, T. Cai, J. Ma, D. Liu, C. Liang // *Fuel*. — 2020. — Vol. 262. — Art. № 116413. — DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116413.

114. Szydełko, A. Effects of calcium, sodium and potassium on ash fusion temperatures of solid recovered fuels (SRF) / A. Szydełko, W. Ferens, W. Rybak // *Waste Management*. — 2022. — Vol. 150. — August. — P. 161–173. — DOI: 10.1016/j.wasman.2022.06.032.

115. Trembovlya, V. I. Heat Engineering Tests of Boiler Installations / V. I. Trembovlya, E. D. Finger, A. A. Avdeeva. — Moscow : Energoatomizdat, 1961. — 416 p.
116. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987.
117. Lyubov, V. K. Increasing of Biofuels Usage Efficiency / V. K. Lyubov, S. V. Lyubova. — Arkhangelsk : Northern (Arctic) Federal University Press, 2017. — 533 p.
118. Тепловой расчёт котлов (Нормативный метод) / КТИ, НПО ЦКТИ. — Санкт-Петербург : НПО ЦКТИ, 1998.
119. Крылов, Д. А. Микроэлементы в топливе и золошлаковых отходах угольных электростанций / Д. А. Крылов // Энергетик. — 2012. — № 11. — С. 36.
120. Любов, В. К. Влияние технологии сжигания угля на эффективность работы котлов / В. К. Любов // Химия твёрдого топлива. — 2020. — № 5. — С. 10–18. — DOI: 10.31857/S0023117720050060.
121. Franke, E. Experimental investigations of thermochemical phosphorus release behavior from sewage sludge under inert and reducing conditions / E. Franke, S. Shalnev, J. Jahn, T. Pietschner, M. Gräbner // Journal of Cleaner Production. — 2025. — Vol. 493. — Art. № 144687. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.144687.
122. Rocha, F. Heavy metal(loid)s and nutrients in sewage sludge in Portugal — Suitability for use in agricultural soils and assessment of potential risks / F. Rocha, N. Ratola, V. Homem // Science of The Total Environment. — 2025. — Vol. 964. — Art. № 178595. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178595.139.
123. Gao, W. Experimental and numerical investigation on effect of fluidization degree and temperature on bed agglomeration during bioslurry fast pyrolysis in a fluidized bed / W. Gao, H. Chen, Y. Liao, Y. Wu, H. Zhu, H. Zhang, J. Weng, X. Guo, X. Hu, X. Lin, Karnowo, S. Zhang // Fuel Processing Technology. — 2025. — Vol. 273. — Art. 108229 — DOI: 10.1016/j.fuproc.2025.108229.

124. Lin, W. Agglomeration in bio-fuel fired fluidized bed combustors / W. Lin, K. Dam-Johansen, F. Frandsen // *Chemical Engineering Journal*. — 2003. — Vol. 96, № 1. — P. 171–185. — DOI: 10.1016/j.cej.2003.08.008.

125. Störner, F. Potassium interactions with copper slag and magnetite fines in chemical-looping processes / F. Störner, I. Staničić, P. Knutsson, T. Mattisson, M. Rydén // *Fuel Processing Technology*. — 2025. — Vol. 270. — Art. 108192. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2025.108192.

126. Iqbal, Y. Biomass composition and ash melting behaviour of selected miscanthus genotypes in Southern Germany / Y. Iqbal, I. Lewandowski // *Fuel*. — 2016. — Vol. 180. — P. 606–612. — DOI: 10.1016/j.fuel.2016.04.073.

127. He, C. Viscosity determination of the biomass slag in the SiO₂-CaO-K₂O system based on the bond distribution / C. He, F. Fan, J. Guo, M. Yuan, Y. Qin, Y. Wei, J. Yan // *Fuel*. — 2024. — Vol. 356. — Art. 129642. — DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129642.

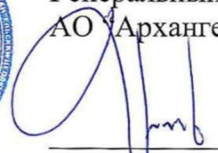
128. Баскаков, А. П. Расчет аппаратов кипящего слоя / А. П. Баскаков, Б. П. Лукачевский, И. П. Мухленов и др. — Ленинград: Химия, 1986. — 352 с.

129. Moradian, F. Thermodynamic equilibrium prediction of bed agglomeration tendency in dual fluidized-bed gasification of forest residues / F. Moradian, P. A. Tchoffor, K. O. Davidsson, A. Pettersson, R. Backman // *Fuel Processing Technology*. — 2016. — Vol. 154. — P. 82–90.

130. Olofsson, G. Bed Agglomeration Problems in Fluidized-Bed Biomass Combustion / G. Olofsson, Z. Ye, I. Bjerle, A. Andersson // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2002. — Vol. 41. — P. 2888–2894. — DOI: 10.1021/ie010274a.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – АКТ ВНЕДРЕНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО "Архангельский ЦБК"

 Крылов Д.А.

22. декабря . 2025 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы, выполненной в рамках диссертационной работы "Совершенствование энергетического использования древесного биотоплива, гидролизного лигнина, торфа и осадка сточных вод", научным сотрудником, аспирантом кафедры Теплоэнергетики и теплотехники ФГАОУ ВО "Северный (Арктический) Федеральный Университет им. М.В. Ломоносова"
Терехиным Алексеем Павловичем

Одними из важнейших целей Энергетической стратегии России на период до 2050 года является переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, рациональному природопользованию, энергетической эффективности и безопасности, диверсификации используемых видов топлива. Доктрина энергетической безопасности России ставит задачу развития инфраструктуры и объектов ТЭК Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) и использование в энергетике местных ресурсов и возобновляемых источников энергии. Стратегия экологической безопасности РФ также утверждает о важности эффективного использования природных ресурсов и повышения уровня утилизации отходов производства и потребления при этом отмечая одним из вызовов сокращение запасов природных ресурсов.

Целью диссертационной работы является увеличение эффективности энергетического использования вторичных энергоресурсов Архангельской области - древесных отходов, гидролизного лигнина, торфа и осадка сточных вод.

Объектами исследования являются котельные агрегаты с кипящим слоем – Е-75-3,9-440 ДФТ, Е-83,5-9,8-540 ДФ и КМ75-40М. Котельные агрегаты установлены на ТЭС-1 и ТЭС-3 АО "Архангельского ЦБК" и энергетически утилизируют осадок сточных вод в смеси с древесными отходами.

Практическая значимость работы определяется разработкой технических решений по повышению эффективности работы котельных агрегатов с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ, Е-83,5-9,8-540 ДФ и КМ75-40М.

В работе предложены практические рекомендации по организации совместного сжигания осадка сточных вод и древесных отходов, предложены технические решения по сокращению агломерации материала кипящего слоя. Предложено техническое мероприятие по сокращению расхода кварцевого песка при замене материала только активной (кипящей) части слоя.

Результаты диссертационной работы используются на Архангельском ЦБК при эксплуатации котельных агрегатов с кипящим слоем. Комбинат заинтересован в продолжении исследований процесса ведения непрерывного контроля концентрации К2О в материале кипящего слоя.

Заведующий кафедрой ТиТ,
доктор технических наук, профессор



Марьяндышев П.А.

Начальник производства целлюлозы
АО «Архангельский ЦБК»



Мосеев В.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – АКТ ВНЕДРЕНИЯ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
Высшего образования

«Северный (Арктический) федеральный университет им М.В. Ломоносова»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности

А.М. Тамицкий

«29» декабря 2025 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы Терехина Алексей Павловича в образовательную деятельность САФУ имени М.В. Ломоносова

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Терехина Алексея Павловича «Совершенствование технологии энергетического использования вторичных энергоресурсов и торфа» на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в учебный процесс на кафедре теплоэнергетики и теплотехники высшей школы энергетике, нефти и газа Северного (Арктического) Федерального Университета имени М.В. Ломоносова.

Научные результаты и выводы, полученные при исследовании процесса сжигания биотоплива в кипящем слое, используются в учебном процессе при чтении лекций по дисциплинам «Биоэнергетика», «Котельные установки и парогенераторы», «Методы снижения вредных выбросов», «Ремонт и эксплуатация основного энергооборудования», «Надежность основного и вспомогательного теплоэнергетического оборудования» и «Эксплуатация теплоэнергетического оборудования» для студентов направления подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника».

Исполняющий обязанности заведующего
кафедрой теплоэнергетики и теплотехники,
доктор технических наук

Марьяндышев П.А.