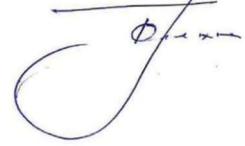


На правах рукописи



Терехин Алексей Павлович

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

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Архангельск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» на кафедре «Теплоэнергетика и теплотехника».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Марьяндышев Павел Андреевич

Официальные оппоненты: **Стрижак Павел Александрович**, доктор физико-математических наук, лаборатория тепломассопереноса ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», заведующий лабораторией, профессор.

Ковальногов Владислав Николаевич, доктор технических наук, кафедра тепловой и топливной энергетики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой, профессор.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет», г. Череповец**

Защита состоится «06» октября 2026 года в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская дом 51, ауд. Д-224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенными печатью организации, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на официальном сайте КГЭУ <http://www.kgeu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зиганшин Ш.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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. 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.

Одни из наиболее энергоёмких отраслей Архангельского энергорайона - целлюлозно-бумажные и картонные производства, энергообеспечение которых до сих пор преимущественно зависит от ископаемых видов топлива – каменного угля, мазута и природного газа.

Сократить долю ископаемых топлив, повысить надежность энергосистемы за счет диверсификации топлив, возможно за счёт использования вторичных энергоресурсов — например, заменой части ископаемого топлива в энергобалансе побочными продуктами производства – осадком сточных вод и кородревесным топливом

Повышение энергоэффективности Архангельской области путем увеличения надежности работы котлоагрегатов с кипящим слоем сжигающих осадок сточных вод и кородревесное является актуальной задачей. Ее решение повысит надежность энергосистемы области, увеличит энергоэффективность котельных агрегатов с кипящим слоем, что позволит сократить долю ископаемого топлива в энергобалансе региона и увеличить выработку электроэнергии за счет сжигания альтернативных топлив.

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 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.

Целью работы является повышение эффективности энергетической системы Архангельской области путем увеличения надежности работы котельных агрегатов с кипящим слоем сжигающих осадок сточных вод и кородревесное топливо.

Объект исследования: котельные агрегаты с кипящим слоем, сжигающие осадок сточных вод и кородревесное топливо.

Для достижения этой цели поставлены следующие **задачи:**

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.

Соответствие диссертации паспорту специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы» по направлениям исследований: пункту 3 «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии, водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок»; пункту 4 «Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов и входящих в них энергетических установок; пункту 6 «Теоретический анализ, экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование, проектирование

энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов, функционирующих на основе преобразования возобновляемых видов энергии (энергии водных потоков, солнечной энергии, энергии ветра, энергии биомассы, энергии тепла земли и других видов возобновляемой энергии) с целью исследования и оптимизации их параметров, режимов работы, экономии ископаемых видов топлива и решения проблем экологического и социально-экономического характера».

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 и практическая значимость работы. Теплотехнический анализ позволил определить энергетический потенциал кородревесного топлива и осадка сточных вод, а результаты анализа химического состава минеральной части — выявить проблемы при их энергетическом использовании; термогравиметрические и микроскопические исследования позволили оценить реакционную способность и её влияние на горение в кипящем слое, а газохроматографический анализ — выявить летучие вещества, выделяющиеся при различных температурах пиролиза. Практическая значимость работы заключается в разработке технических мероприятий по повышению эффективности и надёжности работы котельных агрегатов с пузырьковым кипящим слоем, а также в экспериментальном подтверждении метода расчёта концентрации оксида калия в материале кипящего слоя.

Методология и методы исследования. Образцы топлива подготавливались с помощью мельницы РМ 200 фирмы Retsch и ситового анализатора Retsch 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 кородревесного 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; 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 5 работ. В журналах первого квартиля (К1) ВАК опубликованы 3 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).

Личный вклад автора состоит в подготовке литературного обзора, разработке программ и проведении промышленных испытаний котельных агрегатов, проведении теоретического анализа, натурных экспериментов,

апробации результатов и подготовке публикаций по тематике научного исследования.

Объем и структура работы Общий смысл и логика исследования определили структуру и содержание диссертационной работы. Она состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы исследования, проведен анализ степени разработанности темы, определены объект и предмет исследования, цели исследования, сформулированы задачи и методы их решения, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор научной литературы по современному состоянию исследований энергетического использования осадка сточных вод и кородревесного топлива. Рассматривается влияние энергетического использования этих видов топлива на энергосистему Архангельской области, а также технологии повышения энергетической ценности осадка сточных вод и кородревесного топлива и проблемы, связанные со сжиганием биомассы в котельных агрегатах с кипящим слоем. В результате обзора и анализа существующих исследований установлено:

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 . Одной из лучших доступных технологий 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).

Во второй главе исследовано влияние осадка сточных вод на энергосистему Архангельской области. Проведены термические, элементные и морфологические исследования кородревесного топлива и осадка сточных вод с целью увеличения эффективности их энергетического использования в котельных агрегатах с кипящим слоем.

Результаты теплотехнического и элементного анализа (таблица 1) показали, что 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.

Таблица 1 – Теплотехнические характеристики

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. 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.

Для оценки рисков при сжигании осадка сточных вод и кородревесного топлива проведен рентгенофлуоресцентный анализ минеральной части. РФА анализ минеральной части КДТ и ОСВ (таблица 2) показал, что осадок и кородревесное топливо содержат большое количество соединений щелочных элементов (К и Na), что крайне негативно сказывается на работе котельных агрегатов вызывая агломерацию, шлакование и загрязнение поверхностей нагрева. Высокое содержание кальция в осадке сточных вод и кородревесном топливе положительно скажется на процессе сжигания, так как сера будет реагировать с кальцием образуя сульфаты.

Таблица 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

Для представления о поведении осадка сточных вод и кородревесного топлива при сжигании проведены термогравиметрические исследования в воздушной и инертной (аргон) средах.

Температура начала выхода летучих веществ из осадка сточных вод составляет 180 °С в инертной и воздушной средах. 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. Максимальная скорость убыли массы у осадка сточных вод в инертно среде выше, чем в воздухе. Реакция термодеструкции не является одностадийной. Имеются два пика выхода летучих веществ: первичная - выделение летучих при разрушении молекул, отличающихся низкой термической устойчивостью, а также вторичная - выделение летучих за счет деструкции углерода. Полученные данные по сжиганию осадка сточных вод в горизонтальной печи, показали, что при температуре сжигания 600 °С значительно вырастает количество выбросов СО и углеводородов.

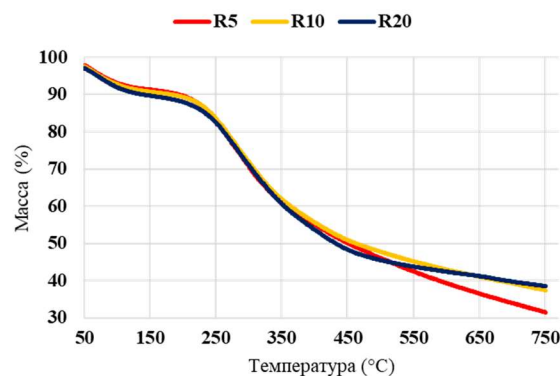


Рисунок 1 – Термогравиметрические кривые осадка сточных вод в воздушной среде при скорости нагрева 5, 10, 20 °С/мин., диапазон температур 50–750 °С.

Начало выделения летучих веществ у кородревесного топлива фиксируется при 170 °С, а температура, соответствующая максимальной скорости их выхода, составляет 310 °С. Выход летучих веществ продолжается до 425 °С. Процесс термического разложения КДТ не прекращается после 460 °С. При этом после достижения 425 °С скорость выхода летучих снижается, а при температуре 490 °С кривая убыли массы приобретает линейный характер.

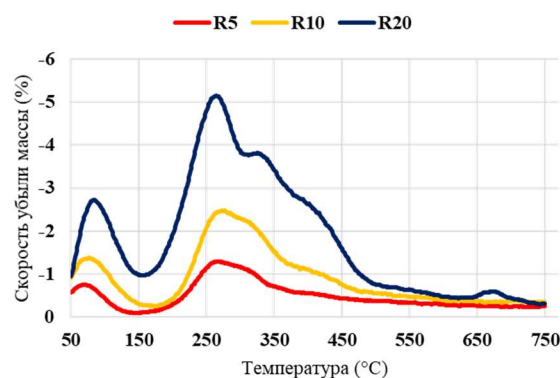


Рисунок 2 – Дифференциально-термогравиметрические кривые осадка сточных вод в воздушной среде при скорости нагрева 5, 10, 20 °С/мин., диапазон температур 50–750 °С.

Микроскопические исследования (рисунок 3) показали, что осадок сточных вод – это высокорреакционный наноструктурированный материал с рыхлой, шероховатой структурой, состоящей из частиц 0,5–350 нм (включая агрегированные), с порами 0,5–2 нм (микропоры) и 40–70 нм (макропоры). Шероховатая поверхность осадка существенно увеличивает площадь для химических взаимодействий.

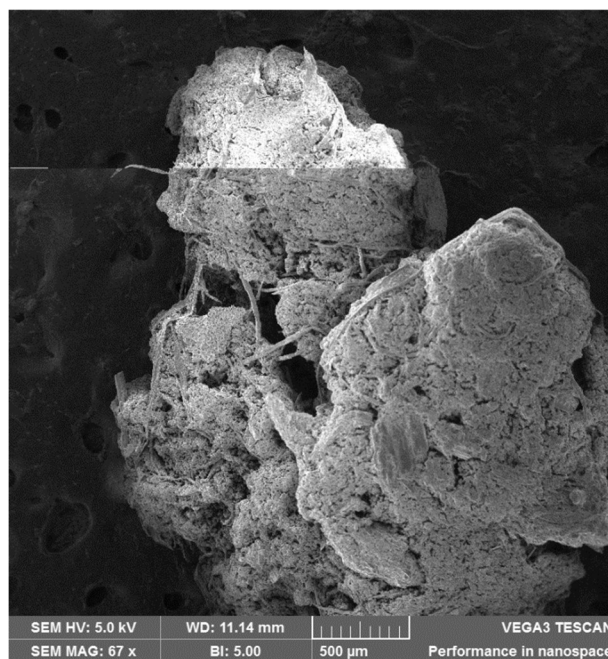


Рисунок 3 – Морфология исходного образца осадка сточных вод при 500 нм

Результаты газохроматографического анализа показали, что основные продукты пиролиза при температуре 200 °С – вода и CO₂. Основные продукты пиролиза при температуре 300 °С – фенолы, спирты и кетоны. Результаты газохроматографического анализа при температуре 400 °С показали основной выход фенольных соединений. Пиролиз при температуре 500 °С характеризуется большим выходом углеводородов с высокой теплотой сгорания.

Глава три посвящена комплексному исследованию работы котлоагрегатов, использующих технологию кипящего слоя для сжигания низкокачественного топлива — кордревесного топлива и осадка сточных вод. 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 кордревесного 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%) кордревесного топлива с осадком сточных вод (25% смеси).

Исследования котельных агрегатов проводились при установившемся тепловом режиме; параметры (нагрузка, давление пара, температура и др.) поддерживались стабильными. Перед испытаниями котёл работал не менее 48 часов на близкой к тестовой нагрузке. Измерения выполнялись с помощью стационарных приборов, установленных на котлах.

Результаты исследований Е-75-3,9-440 ДФТ показали, что при сжигании лиственного кородревесного топлива и осадка сточных вод КПД брутто составил 84,75 % (близко к проектному 86,16 %). Результаты при сжигании хвойного кородревесного топлива показали, что КПД брутто составил 84,07 %. Результаты исследований КМ75-40М при сжигании лиственного кородревесного топлива и осадка сточных вод КПД брутто составляет 80,64 %. При сжигании хвойного кородревесного топлива и осадка сточных вод КПД брутто был 81,20 %. Результаты исследований Е-83,5-9,8-540 ДФ при сжигании смеси лиственного и хвойного кородревесного топлива и осадка сточных вод КПД брутто составляет 80,64 %. 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.

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

1. Предложено стабилизировать температуру кипящего слоя котлоагрегатов автоматизации подачи газов рециркуляции.

2. 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.

3. Для решения проблемы цементации золы в конвективных газоходах предложено снизить скорости ожигения кипящего слоя, что позволит уменьшить количество золы и частиц песка выносимых из слоя в топочное пространство. Однако для реализации данного мероприятия необходимо решить одну из основных проблем эксплуатации кипящего слоя – проблему агломерации.

4. Предложено увеличить равномерность распределения топлива по кипящему слою.

В четвертой главе подробно исследован процесс агломерации материала кипящего слоя котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ в процессе его эксплуатации от пуска котла с новым свежим материалом кипящего слоя до останова котла для его замены.

Обнаружены ключевые причины агломерации:

1. Высокое содержание калия (K_2O) в золе топлива и образование легкоплавкой эвтектики K_2O-SiO_2 ;

2. Температура кипящего слоя 754–840 °С, способствующая агломерации донной золы;

3. Ухудшение гидродинамики слоя (рост минимальной скорости псевдоожигения, снижение коэффициента псевдоожигения).

На рисунках 4 и 5 показаны некоторые агломераты отобранные в процессе эксплуатации котельного агрегата. В ходе дальнейшей эксплуатации размер и количество агломератов постепенно увеличивались. Наиболее крупные

агломераты имели рыхлую структуру. Агломераты характеризовались наличием сердцевин 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.



Рисунок 4 – Агломераты отбора №4



Рисунок 5 – Агломераты отбора №5

На скорость укрупнения донной золы, образование агломератов и дефлюидизацию слоя влияет содержание калия и натрия в золе топлива, а именно превышение их суммарного содержания в слое свыше 1%. В исследуемой донной золе натрий (Na) обнаружен не был. Содержание калия (K) с момента пуска котла увеличилось по всем точкам в 6 раз (рисунок 6). 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.

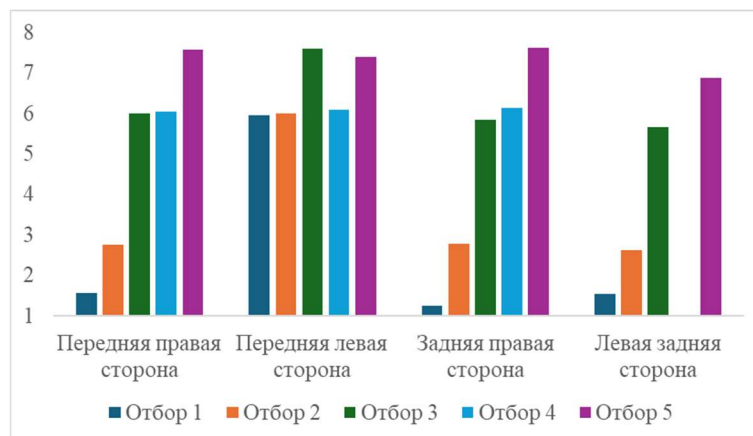


Рисунок 6 – Содержание K₂O в донной золе, %

В таблице 3 приведены результаты рентгеновского исследования двух различных агломератов, отобранных при отборах №4 и №5. Первый образец характеризовался плотной однородной структурой с внешней оболочкой, второй образец отличался тем, что имел сердцевину из расплавленной золы, к которой впоследствии прилипали частицы слоя.

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.

Таблица 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 (рисунок 7)	-	1,21	17,20	1,30	4,27	62,40	6,17	0,62
Небольшой агломерат (рисунок 8)	0,26	0,66	15,54	0,85	2,71	65,95	6,61	0,34

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.

Анализ работы псевдооживленного слоя 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. Самая низкая температура за время эксплуатации была в правой задней части котла (рисунок 7). Она отличается от средней температуры слоя в среднем на 30-40°C. Самая высокая температура слоя наблюдалась в левой передней части котла, она была на 40-50°C выше средней. Это указывает на необходимость регулировки разброса топлива, чтобы равномерно распределить его по псевдооживленному 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 псевдооживленного слоя котла Е-75-3,9-440 имела более низкую температуру, но именно из задней части слоя сливались самые крупные агломераты.

Температура псевдооживленного 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 псевдооживленного слоя является эффективным способом борьбы с агломерацией. Однако снижение температуры обычно достигается за счет уменьшения расхода первичного воздуха, что снижает степень псевдооживления и может привести к усилению процессов агломерации в материале слоя.

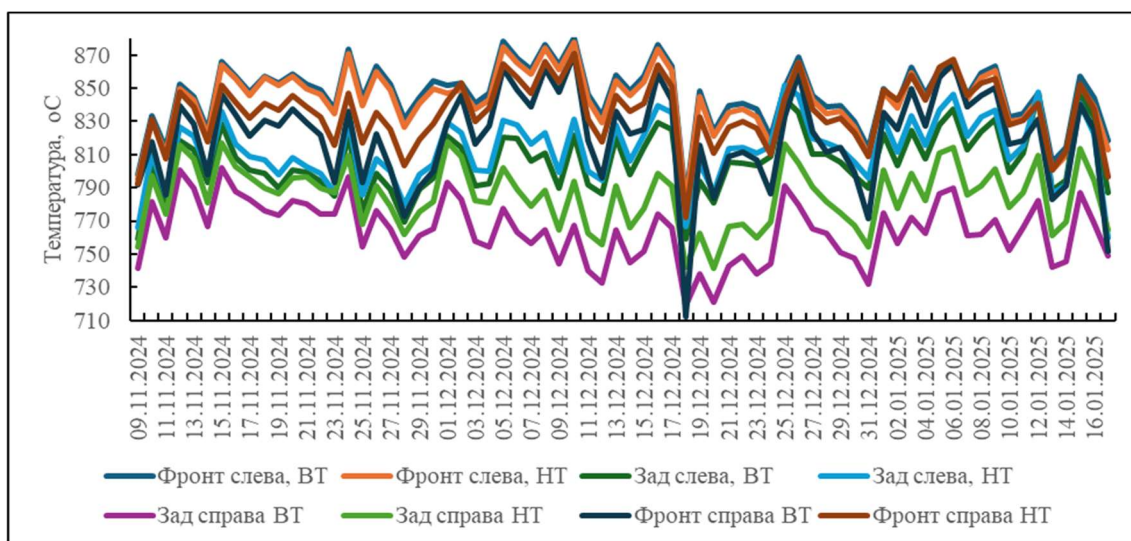


Рисунок 7 – Температура кипящего слоя в различных точках

Проведены опытно-промышленные испытания по исключению процесса агломерации показало, что снижение температуры и увеличение расхода воздуха

на ожигание являются эффективными способами снижения агломерации кипящего слоя. 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, при этом процесс агломерации резко ускорился при накоплении калия в слое вплоть до его дефлюидизации.

Микроскопическое исследование донной золы показало, что основной механизм образования крупных фрагментов агломератов в кипящем слое – агломерация, вызванная покрытием (рисунок 8).

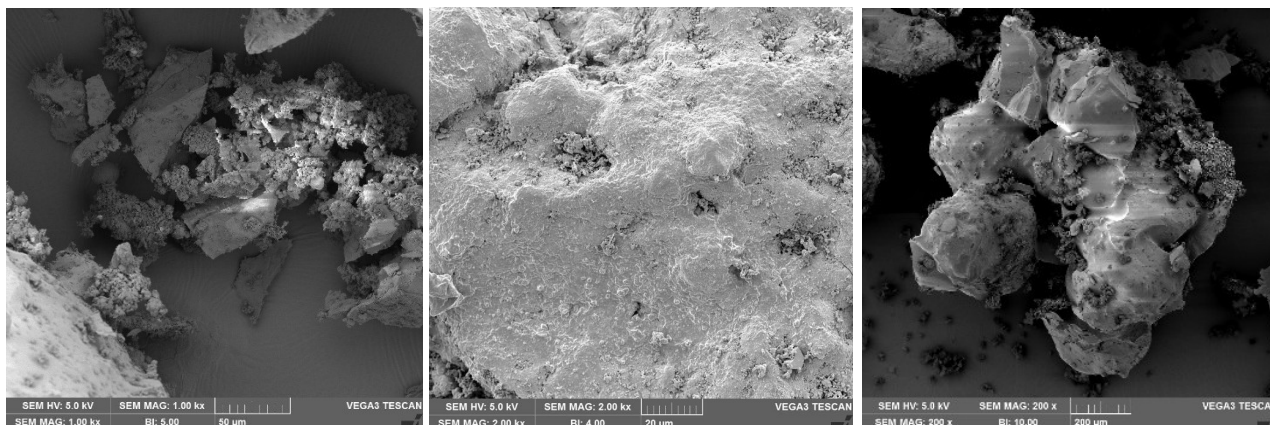


Рисунок 8 – СЭМ изображения агломерированных частиц слоя

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:

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

G_c – Добавка нового кварцевого песка в слой.

G_a – Поступление золы (11,500 кг/день при сжигании осадка сточных вод и лиственных древесных отходов).

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 E-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 критическая концентрация калия составит 7,44%. В то же время среднее содержание калия в слое в конце эксплуатации составило 7,36%. Это говорит о том, что можно эффективно контролировать максимальную концентрацию калия в материале псевдоожиганного слоя, зная химический состав биомассы и топливной золы.

Для исключения процесса агломерации материала слоя и частиц топливной золы предложены следующие технические 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 SiO₂) оливин (40% SiO₂), диабаз (45-52% SiO₂) или использование добавок.

В приложении А приведен акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс.

В приложении Б приведен акт о внедрении технических решений, предложенных в диссертационной работе.

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.

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.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Научные статьи, опубликованные в международных базах цитирования Web of Science и Scopus

1. Terekhin, A. P., Maryandyshev, P. A., & Brillard, A. (2026). Operation factors influencing bed agglomeration in an industrial fluidized bed boiler. *Fuel*, 425, 139421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.139421>

2. 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.

3. 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.

Марьяндышев, П. А. Влияние влаги на характеристики совместного сжигания смеси целлюлозно-бумажного осадка сточных вод и коммунальных отходов / П. А. Марьяндышев, А. Брийард, А. П. Терехин // *Химия твердого топлива*. – 2025. – № 4. – С. 48-56. – DOI 10.31857/S0023117725040052.

4. 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.

5. 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. Maryandyshv, A. Briard // *Power Technology and Engineering*. – 2025. – Vol. 58, No. 5. – P. 816-823. – DOI 10.1007/s10749-025-01887-2. (Переводная версия).

6. Gromov, A.A., Alekseev, P.D., Terekhin, A.P. *et al.* Characterization of the Pyrolysis Products of Hydrolytic Lignin and Sewage Sludge Using Pyrolytic Gas Chromatography. *Solid Fuel Chem.* **59**, 444–454 (2025). <https://doi.org/10.3103/S0361521925600348>

Исследование продуктов пиролиза гидролизного лигнина и осадка сточных вод методом пиролитической газохроматографии / А. А. Громов, П. Д. Алексеев, А. П. Терехин, П. А. Марьяндышев // *Химия твердого топлива*. – 2026. – № 2. – С. 131-144. – DOI 10.7868/S3034607X26020035. – EDN LVXBMU.

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых журналах из перечня ВАК

7. Терехин, А. П. Эффективность энергетического использования отходов целлюлозно-бумажного производства в котлоагрегатах с кипящим слоем E-75-3,9-440 ДФТ и KM-75-40M / А. П. Терехин, П. А. Марьяндышев, А. Брийард // *Электрические станции*. – 2024. – № 7(1116). – С. 2-10. – DOI 10.71841/ep.elst.2024.1116.7.01.

8. 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.

9. Терехин, А. П. Влияние химического состава биомассы на процесс агломерации в псевдооживленном слое котлоагрегата E-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.

10. 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.

11. Терехин, А. и Марьяндышев, П. 2026. Исследование параметров производства пеллет из осадка сточных вод. *Bulletin of the South Ural State University series «Power Engineering»*. 26, 1 (мар. 2026), 92–100. DOI:<https://doi.org/10.14529/power260111>.

Материалы конференций

12. Сжигание кородревесного топлива и осадка сточных вод в кипящем слое / В. К. Любов, А. Н. Попов, А. П. Терехин [и др.] // *Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках : сборник научных трудов X*

международной конференции, Архангельск, 20–22 октября 2025 года. – Архангельск: Общество с ограниченной ответственностью «Консультационное информационно-рекламное агентство», 2025. – С. 288-290.

13. Любов, В. К. Термогравиметрическое исследование древесного биотоплива, идущего на сжигание в ТЭС-1 АО «Архангельский ЦБК» / В. К. Любов, А. П. Терехин // Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию : Материалы III Международной молодежной научно-практической конференции, Архангельск, 26–28 апреля 2022 года. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2022. – С. 474-478.

Подписано в печать 04.06.26. Формат 60×84/16.
Усл.печ.л. 1,22. Тираж 100 экз. Заказ № 9151.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в Издательском доме им. В.Н. Булатова САФУ
163060, г. Архангельск, ул. Урицкого, д. 56