

На правах рукописи



ПУЗЫРЕВ

Михаил Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА КОТЕЛЬНО-ТОПОЧНОЙ ТЕХНИКИ
ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

Специальность 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» и Обществе с ограниченной ответственностью «ПроЭнергоМаш-Проект», г. Барнаул

Научный руководитель:

Голубев Вадим Алексеевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», кафедра «Котло- и реакторостроения», доцент, г. Барнаул.

Официальные оппоненты:

Штым Константин Анатольевич доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», департамент энергетических систем, профессор, г. Владивосток.

Шторк Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория проблем тепломассопереноса, заведующий, г. Новосибирск.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Защита диссертации состоится 21 марта 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.347.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан ____ января 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Олеся Владимировна Боруж

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В промышленной энергетике на сегодня выделяется курс, направленный на повсеместное использование и увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Резкое развитие промышленного применения ВИЭ в мире началось после 1980-х годов, и было связано с энергетическим (нефтяным) кризисом, означавшим конец длительной эпохи дешевых топливно-энергетических ресурсов. Развитие ВИЭ в мире осуществляется преимущественно при законодательной и прямой финансовой государственной поддержке – более 140 стран реализуют специальные национальные и коллективные программы, направленные на стимулирование ускоренного внедрения ВИЭ. Развитие технологий ВИЭ также входит в перечень критических технологий и приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации.

В диссертации рассматривается наиболее актуальное для промтеплоэнергетики и сельхозпредприятий России направление – ресурсосберегающее применение горючих растительных отходов в качестве биотоплива. Актуальность данного направления подтверждается ещё и тем, что при всем разнообразии и важности различных типов ВИЭ (солнечная, ветровая и др.) наибольшую долю в составе мирового потребления ВИЭ занимают именно биотоплива, причём вовлечение горючих отходов в топливный баланс предприятий одновременно решает задачу ликвидации грязных, пожароопасных свалок.

Однако, несмотря на тысячелетнюю историю использования людьми биотоплив, применение отходов из легковыносимых частиц типа лузги подсолнечника при организации их сжигания на маслоэкстракционных заводах (МЭЗ) сопровождается шлакованием котлов и другими проблемами, требует применения особой, технологии низкотемпературного вихревого сжигания (НТВС).

Для лузги подсолнечника выявлен двойной парадокс. На свалках лузга горит, не потушить, но в типовых котлах её нельзя сжечь поскольку она не удерживается в топочной камере. Её зольность мала, до 2-3%, и зола составлена пылевыми частицами, медианный размер $d_m=5,58$ мкм, но котлы быстро выходят из строя – топки и конвективные пучки в горячей зоне заполняются плотной золой, которую нужно раздалбливать и выпиливать, остальные поверхности нагрева покрываются рыхлой золой, их термическое и аэродинамическое сопротивление сильно увеличиваются. Соответственно, решение этих вопросов, включая разработку специализированного оборудования для утилизации мелких сельскохозяйственных и древесных отходов очень актуально.

Внимание в диссертации уделено и рассмотрению современного зарубежного опыта. Зарубежный опыт рассматривается не только по причине его перспективности и актуальности применительно к организации утилизации лузги. Он нужен в России с её большими объёмами заготовки и запаса леса. В последние десятилетия из-за неухоженности лесов, накопления в них и лесосеках

большого количества древесных отходов проявились такие негативные тенденции: лес – это кормовая база для размножения насекомых лесовредителей, лес – это большой запас горючего материала, основа лесных пожаров. Древесные отходы – это пожароопасность для предприятий лесопереработки.

Степень разработанности темы. В основе разработки лежат вихревые технологии. Они широко применяются и получили развитие в энергетике: в инерционных золоуловителях, циклонных камерах и предтопках, в том числе с жидким удалением шлака, а также в различных вихревых топках (ВТ). Существенный вклад при решении теоретических вопросов, в том числе создания устойчивой аэродинамики в вихревых камерах дали ученые Института теплофизики: Алексеенко С.В., Гольдштик М.А., Куйбин П.А., Маркович Д.М., Саломатов В.В., Смульский И.И., Шторк С.И. и другие. Разработку вихревых предтопок и вихревых энергетических топок проводили: Кнорре Г.Ф., Маршак Ю.Л., Саломатов В.В., Котлер, В.Р., Серант Ф.А., Соловьёва Т.А., Дорогов Е.Ю., Устименко Б.П., Штым А.Н., Штым К.А. и другие. Наиболее успешные реконструкции энергетических котлов провели специалисты школы В.В. Померанцева: Григорьев К.А., Скудицкий В.Е., Лихачёва Г.Н., Рундыгин Ю.А., Финкер Ф.З. и др. Иностранные ученые: Syred N., Gupta A.K., Beer J.M, Frey D. и др. Однако эти исследованные ранее вихревые системы, во-первых, представлены открытыми или с осевым размером близким диаметру, $D \leq L$, а для решения диссертационной задачи более эффективными оказались мало изученные топочные камеры радиального типа $L \leq D$. Во-вторых, с преимущественно медленно горящими частицами угля, что принципиально отличается в аэродинамике от горения легко выносимых чешуйчатых, богатых летучими - V_{daf} , до 90-85%, быстро сгорающих частиц типа лузги.

Второй важный вопрос – это поведение золы в котле, формирование и подавление отложений золы и её выбросов. Тут следует отметить разработки ученых: Лебедева И.К., Заворина А.С., ТПУ, г.Томск; Деринга И.С., СФУ, Козлова С.Г. и Щедрова Б.В. ООО «СибВТИ», г. Красноярск; Дика Э.П., и Маршака Ю.Л. ОАО ВТИ, г. Москва; Алехновича А.Н., Богомолова В.В., г. Челябинск и Отса А.А. других. Но эти исследования касаются углей, а в случае биотоплив проблема существенно обостряется, зашлаковывание топок и забивание котельных пучков отложениями золы может происходить буквально за одну смену. Эта проблема наиболее актуальна, так как очистка требует длительного, затратного останова, на сутки и более, включая расхолаживание, очистки и последующий пуск, причём не только котла, иногда и всего оборудования МЭЗ.

Кроме того, как показал промышленный опыт, иностранный, Lackner M., Zabetta С.Е., Henderson, P.; Andersson С. и отечественный: Голубев В.А., Мурко В.И., Пузырёв Е.М., Шарапов М.А. и Щуренко В.П. и др. даже применение НТВС и других разработок современного уровня при организации сжигания малозольных растительных отходов типа лузги сопровождается гораздо более значительными проблемами в сравнении с углями. Горящие фрагменты биотоплива и их зола имеют особенности в строении и в составе: частицы сильно шлакующие, лёгкие, парусные, трудно удерживаемые в топке.

Данная работа посвящена исследованию влияния этих особенностей. В ней рассмотрены ресурсосберегающие технологические схемы, топочные устройства и котлы на основе НТВС, обсуждаются итоги натурных исследований и обоснованный длительным промышленным применением оборудования выбор оптимальных вариантов среди имеющихся и новых, фигурирующих под брендом «Торнадо».

Объекты исследования – вихревые низкотемпературные топки «Торнадо», паровые и водогрейные котлы, а также энергетические установки (ЭУ) с топками «Торнадо» и специализированное котельно-вспомогательное оборудование (КВО).

Предмет исследования – характеристики сырьевой базы: лузги, других биотоплив и продуктов их сгорания, включая золу и её отложения. Рабочие, экономические и экологические характеристики технологии и исследуемого оборудования. Натурные исследования эффективности работы оборудования в промышленных условиях.

Цель: разработка котельно-топочной техники, обеспечивающей длительный безостановочный режим работы при утилизации сильно шлакующих, измельченных растительных отходов типа подсолнечной лузги, на основе опыта промышленного применения низкотемпературного вихревого сжигания по схеме «Торнадо».

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Обобщить мировой опыт применения биотоплив и доступные технологии утилизации.
2. Обосновать выбор схемы низкотемпературного вихревого сжигания «Торнадо» для котлов на подсолнечной лузге и разработать эффективные варианты профилей вихревых топок.
3. Дополнить нормативную методику теплового расчета котлов с низкотемпературным вихревым сжиганием и спроектировать паровые котлы с разработанными топками.
4. Провести натурные испытания новых котлов с вихревыми топками на лузге, выявить роль применения экранирования, выходного пережима, верхнего ввода топлива и сравнить схемы одно- и двухступенчатого сжигания.
5. Проанализировать характеристики золы подсолнечной лузги, провести натурные исследования и описать закономерности поведения золовых компонентов и характерного формирования отложений в котлах, на этой основе разработать меры по увеличению периода безостановочной работы котлов, включая котельно-вспомогательное оборудования и способы предотвращения шлакования, очистки и золоулавливания.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Дополнена нормативная методика теплового расчёта вихревых топок на подсолнечной лузге.
2. Предложены, запатентованы и обоснованы расчетом, моделированием и промышленным применением рациональные профили вихревых топочных камер радиального типа и технологическая схема организации низкотемпературного вихревого сжигания «Торнадо».

3. Промышленными испытаниями новых котлов и моделированием обоснованы схемы расположения сопел дутья и ввода топлива, характеристики выходного пережима и рациональная геометрия вихревых камер радиального типа, встраиваемых в топочные объемы котлов.
4. В промышленных условиях изучены характеристики золы подсолнечной лузги, её отложений и описаны закономерности их формирования в котельных установках.
5. Разработаны и усовершенствованы научными и натурными исследованиями топки «Торнадо» радиального типа и котлы на их основе, котельно-вспомогательное и газоочистное оборудование и рекомендации по обеспечению эффективной безостановочной работы энергетических установок.

Практическая значимость:

- обоснована, уточнена и усовершенствована инженерными расчётами и промышленными испытаниями схема вихревого низкотемпературного сжигания «Торнадо»;
- разработаны и запатентованы десятки инновационных технических решений, которые использованы при создании специализированного КВО и улучшают эксплуатационные характеристики ЭУ, работающих на лузге и растительных отходах;
- разработаны и производятся аппараты по организации очистки оборудования и дымовых газов, снижающие экологическую нагрузку от эксплуатируемых объектов;
- практическая ценность подтверждена многолетней эксплуатацией разработанных котлов и КВО на МЭЗ.

Реализация работы. Результаты работы использованы при введении в эксплуатацию более 40 ресурсосберегающих ЭУ, включая более 50 котлов, работающих на лузге.

Методы исследования: аналитический обзор и обобщение научно-информационных источников, математическое и компьютерное моделирование аэродинамики вихревых камер, лабораторные исследования и натурные эксперименты. В натурных исследованиях использованы: инфракрасная пирометрия, электрохимический анализ продуктов сгорания, ультразвуковые расходомеры.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается многовариантными расчетами на основе уточненной нормативной методики, моделированием, натурными исследованиями и многолетней эксплуатацией ЭУ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Запатентованные технологические схемы организации эффективного низкотемпературного вихревого сжигания, топков «Торнадо» радиального типа, котлов на их основе, а также котельно-вспомогательное оборудование.
2. Проверенные натурными исследованиями и промышленным применением рациональные геометрические профили вихревых топков радиального типа, допускающие встраивание в топочные объемы, в том числе существующих котлов.

3. Дополнение к нормативной методике теплового расчёта для вихревых топок на подсолнечной лузге.
4. Изученные в промышленных условиях процессы и закономерности формирования отложений золы в топочных устройствах и газоходах котлов при сжигании подсолнечной лузги.
5. Разработанные и промышленно опробованные способы и устройства для снижения шлакования, очистки котлов и уходящих газов от золы.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы» по следующим пунктам:

- согласно п.1 разработаны принципы функционирования и режимы работы энергетических установок на альтернативных топливах в целом и их основного и вспомогательного оборудования
- согласно п. 2 проведены натурные исследования рабочих процессов в энергетических установках на альтернативном топливе, в их основном и вспомогательном оборудовании при производстве тепловой энергии;
- в соответствии с п. 3 освоено производство нового оборудования для производства тепловой энергии и использования альтернативных топлив, повышения надежности и ресурса комплексов и входящих в них энергетических установок;

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11 профильных конференциях и семинарах различного уровня. 4-я ВНТК «Наука и молодежь» (г. Барнаул, 2007), ВНПК «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» (г. Барнаул, 2008), 67-я НТК АлтГТУ (г. Барнаул, 2009), V НПК «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы» (г. Челябинск, 2011), VIII ВНПК «Горение твердого топлива» (г. Новосибирск 2012), VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике (Екатеринбург, 2013), IX Всероссийская конференция «Горение топлива: теория эксперимент, приложения» (г. Новосибирск 2015), XIV ВНТК «Наука и молодежь» (г. Барнаул 2017), МНПК Современные тенденции котлостроения» (г. Барнаул 2017), V МНТК «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла» (г. Москва 2020), XI Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2021).

Личный вклад соискателя. Постановка задач выполнялась совместно с научным руководителем. Лабораторные опыты и моделирование выполнялись лично соискателем в АлтГТУ. Теплотехнические испытания оборудования, и разработка конструкторской документации выполнялась совместно с сотрудниками ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», г. Барнаул. При этом автор внес определяющий вклад:

- в планирование и проведение натурных испытаний для уточнения методики теплового расчёта котлов;
- в разработку и патентование новых технических решений;

- в планирование и проведение лабораторных опытов и натурных теплотехнических испытаний;
- в анализ и обобщение результатов опытов и испытаний и составлении рекомендаций для конструирования оборудования энергетических установок;
- в усовершенствование конструкций паровых котлов с топками «Торнадо» и котельно-вспомогательного оборудования энергетических установок.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 47 печатных работ, включая 6 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ и 22 патента на изобретения и полезные модели. Личный вклад автора в материалах, опубликованных в соавторстве, составляет не менее 60%.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных сокращений и обозначений, списка литературы, и двух приложений. Общий объем диссертационной работы 232 страницы, включающие 115 рисунков, 25 таблиц. Список литературы содержит 153 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит анализ текущего уровня и направления развития ВИЭ. Показана важнейшая роль биотоплива и уровень технологий сжигания. Показаны свойства лузги как биотоплива и обоснована необходимость особенного подхода при её сжигании. Поставлена задача создания технологии и разработки оборудования для организации экономически и экологически эффективного топочного процесса.

Показано что сухие биотоплива имеют высокую адиабатическую температуру, и при их сжигании в высокотемпературных зонах зола будет расплавляться, вызывая зашлаковывание топки, поэтому топка должна интенсивно охлаждаться со съемом половины выделяющегося при сгорании тепла. С повышением влажности доля теплосъёма в топке снижается, а в конвективном газоходе соответственно должна повышаться. Выполнение этого условия технически сложно, поэтому промышленные котлы не являются универсальными, а рассчитаны на характеристики топлива в узком диапазоне.

Лузга выделена среди других биотоплив, так как является сухим, однородным по составу, простым в обращении горючим отходом, требующим утилизации. Рассмотрены свойства лузги разных культур, показаны проблемы сжигания: вынос недогоревших частиц и отложения золы, приводящие к вынужденному остановку котла и значительному снижению эффективности работы ЭУ. Достижение из-за формирующихся отложений условий, препятствующих дальнейшей работе котла, являются лимитирующим фактором – одним из важнейших показателей эффективности работы котла на лузге подсолнечника.

Глава 2 посвящена обоснованию использования вихревых течений в топочных устройствах и описанию принципов работы ВТ «Торнадо». Показаны предпосылки создания, пути развития и возможности применения в энергетике. Показана роль пережима на выходе из вихревых топков, повышающего стабильность и эффективность действия вихря, а также применения НТВС. Предложены рациональные конструкции ГОО с подачей третичного дутья.

Изучение аэродинамики на стендах и моделирование выявили, что разработка конструкций ГОО с подачей скоростных струй третичного дутья позволяет создать эффективно работающие ВТ с различной геометрией камер сгорания, что важно для встраивания вихревых камер сгорания в топочные объёмы реальных котлов.

В процессе научных исследований и разработки технических решений было запатентовано несколько принципиальных схем камер сгорания (Рисунок 1):

- по ориентации оси вихря, с горизонтальной, схема (1.1), и с вертикальной, схема (1.2), осью вращения;
- по геометрии, удлиненные камеры, схемы (2.1 и 2.4), и узкие, радиальные камеры, схемы (2.2 и 2.3), настоящим исследованием определены как более эффективные;
- по числу выходов, с односторонним и двухсторонним, схемы (3.1) и (3.2), выходом;
- по взаимной компоновке радиальных камер горения и камер дожигания (КД): одна вихревая камера с односторонним выходом в одну КД, схема (4.1), дубль топка с двумя топочными камерами с односторонним выходом и одной общей КД, схема (4.2), одна вихревая топочная камера с двухсторонним выходом в две КД, схема (4.3).

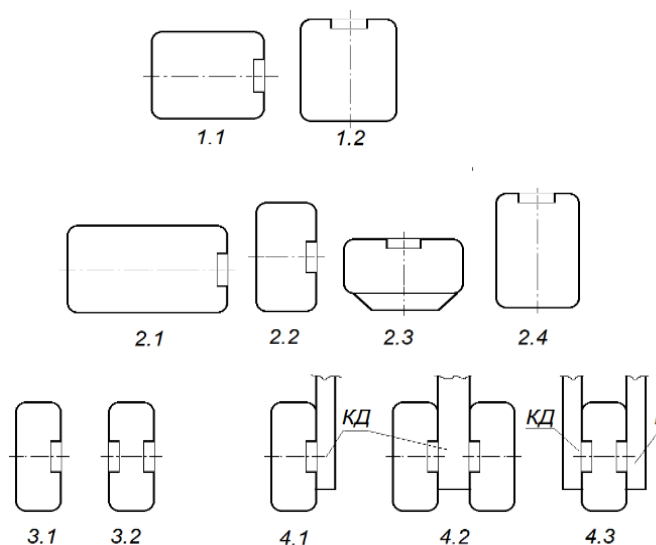


Рисунок 1 – Рассматриваемые схемы вихревых топочных устройств

Проектирование котлов с ВТ включало инженерные расчёты по программам «ПроЭнергоМаш-Проект», базирующимся на нормативном методе и разработанных с учётом конвективной теплоотдачи, определяемой по эмпирической зависимости и формирующихся отложениях золы. Детерминирующая процессы шлакования котла – температура газа на выходе из топки θ_m вычисляется через параметр f , характеризующий конвективный теплообмен и критерий Больцмана Bo^* по критериальному уравнению:

$$\theta_m = 0,686 \left(\sqrt{\left[\frac{Bo^*(1-f)}{a_k} \right]^2 + 2,92 \left[\frac{Bo^*(1-f)}{a_k} + \theta_3^4 \right]} - \frac{Bo^*(1-f)}{a_k} \right). \quad (1)$$

Для подсолнечной лузги с помощью натуральных испытаний на котлах уточнено значение теплового сопротивления загрязняющего слоя. Для котлов первого поколения $\varepsilon = 0,0018 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Для новых котлов с вихревой топкой «Торнадо» $\varepsilon = 0,0012 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

Сравнительный анализ различных способов организации НТВС выявил, что эффективнее экранирование топки для снижения температуры на выходе. Разработанные ВТ «Торнадо» пригодны для разных видов топлива с разными системами его подачи.

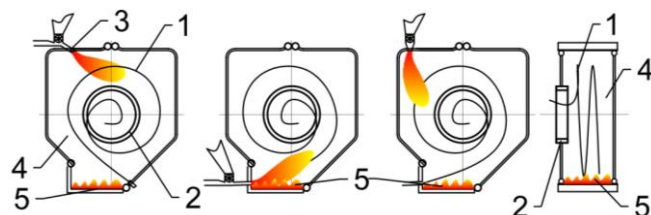


Рисунок 2 – Схемы ввода топлива в вихревую камеру

Так для лузги, опилок и других мелких частиц наиболее удобно применять пневмотранспорт. Топливо и газы могут двигаться (Рисунок 2), по разным траекториям 1 до слоя 5 и выхода в ГОО 2. От положения точки 3 ввода топлива в вихревую камеру 4 зависят поля температур и концентраций: кислорода, продуктов сгорания, частиц топлива и золы.

В ВТ «Торнадо» организуется факельно-слоевое сжигание. В этой связи также было рассмотрено взаимодействие струй первичного дутья с подовым факелом. Натурными экспериментами определено, что верхний ввод лузги эффективнее (рост тепловосприятости экранов на 14%).

Исследовано влияние горящего слоя и подачи дутья через колосник. Зависимость СО (Рисунок 3). Присутствие слоя снижает NO_x на 20-30% и в разы СО (Рисунок 4).

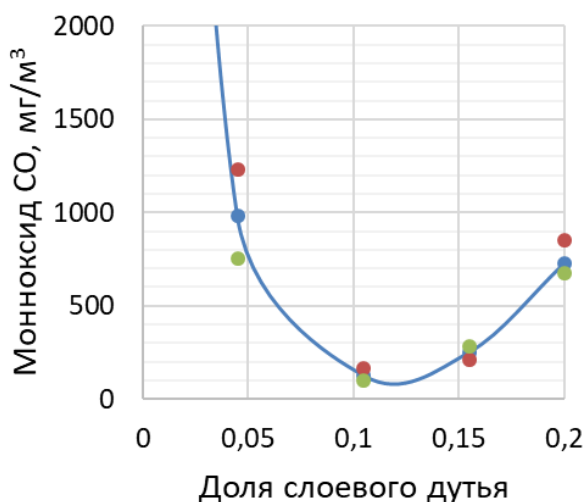


Рисунок 3 – Влияние слоевого дутья на химический недожог вихревой топки. Е-20-1,5-360 подсолнечная лузга

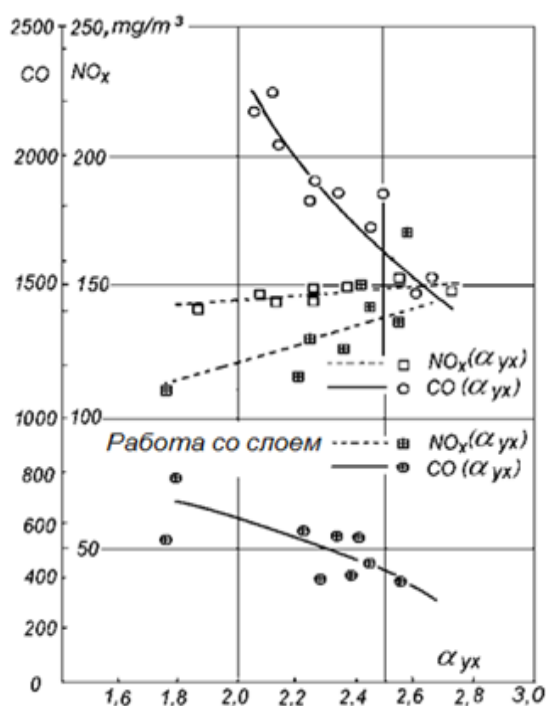


Рисунок 4 – Горение факельное и факельно-слоевое. Эмиссия СО, NO_x

С помощью моделирования, выполненного на кафедре котло-и реакторостроения АлтГТУ, усовершенствована раздача дутья и геометрия модели ВТ (Рисунок 5), повысилась удерживающая способность вихря.

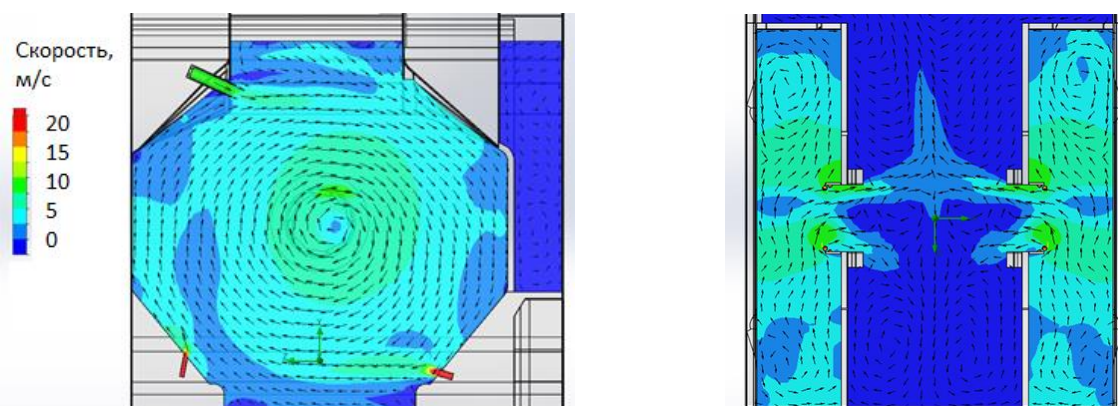


Рисунок 5 – Поля течений в модели вихревой дубль-топки. Продольный медианный разрез вихревой камеры и горизонтальный разрез по оси ГОО

Промышленные испытания показали, что вынос наблюдавшийся в первых конструкциях (Рисунок 6 *слева*), после улучшения отсутствует (*справа*). Расчётное время витания частиц в ВТ составляет около 5 секунд. Частицы крупнее 60 мкм удерживаются внутри вихревой камеры до полного выгорания, механический недожог в уносе отсутствует во всем диапазоне работы.

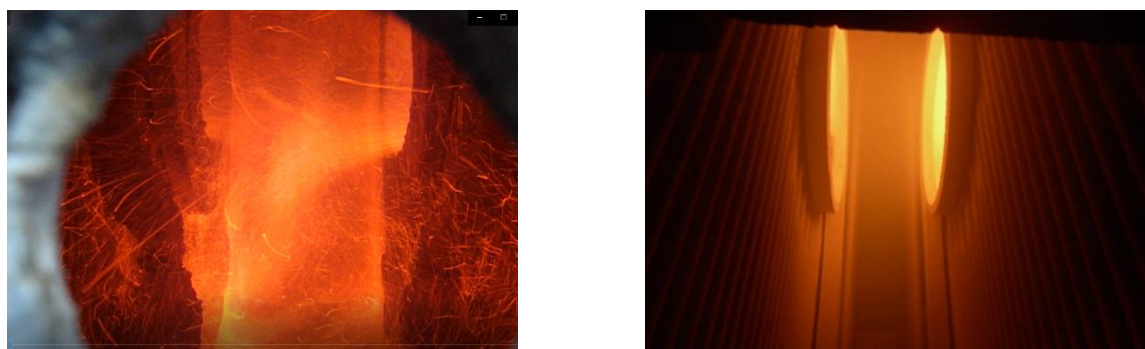


Рисунок 6 – Совершенствование конструкции ВТ. Подсолнечная лузга, полная нагрузка. Вид факела на выходе из ГОО: *слева* – котел ДКВр-20-13, 2006 г.; *справа* – котел Е-20-1,4, 2010 г.

В ходе промышленных испытаний выявлено, что у котлов с полным сгоранием топлива в одну стадию, непосредственно в ВТ, длительный период работы до очистки. Теоретически это объясняется ускорением улетучивания соединений калия в некоторых средах: в СО в 50 раз, а в СО₂ в 5 раз интенсивнее, чем в воздушной среде при той же температуре.



Рисунок 7 – Вид пламени из ГОО: *слева* – котел с ВТ и двухступенчатым сжиганием; *справа* – с одноступенчатым по схеме «Торнадо»

При полном сгорании факел прозрачный, через ГОО видно яркое свечение (Рисунок 7 справа). При двухступенчатом сжигании, факел на выходе из топки мутный, пульсирующий, с видимым горением летучих и частиц (Рисунок 7 слева). Дожигание продуктов неполного сгорания за топкой затруднено.

Основное отличие предлагаемых вихревых топок «Торнадо» от известных конструкций – это топки радиального типа (Рисунок 8), с характерными отношениями: условный диаметр топки ($D_{\text{топ}}$)/диаметр ГОО ($d_{\text{ГОО}}$) = 4...6; Диаметр топки ($D_{\text{топ}}$)/глубина топки ($B_{\text{топ}}$) = 2...6; Кроме того, экранированная вихревая камера снабжена особым ГОО с подачей третичного дутья и слоевым топочным устройством.

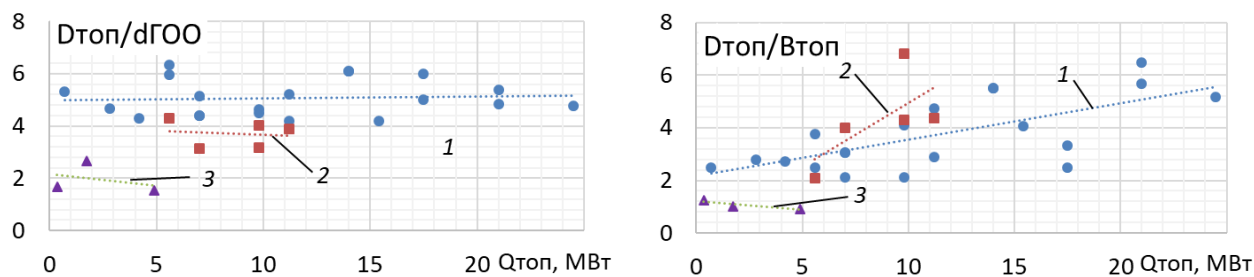


Рисунок 8 – Геометрические соотношения: 1 – ВТ «Торнадо»; 2 – Ранние радиальные ВТ; 3 – Неохлаждаемые ВТ

Выявлена возможность работы вихревых топок «Торнадо» с минимальными избытками воздуха ($\alpha_t=1,15...1,2$), что значительно ниже типичных значений для биотопливных котлов (1,7...2) и обеспечивает большую эффективность ЭУ.

Глава 3 посвящена анализу причин и механизмов формирования отложений золы в котлах на лузге. В процессе решения поставленных задач создан и внедрен в промышленную эксплуатацию ряд устройств для борьбы с проблемами, вызванными поведением золы.

Зола лузги в ходе топочного процесса претерпевает изменения, связанные с повышенными температурами. Это видно по гранулометрическому составу золы, полученной в лабораторных условиях и проб, отобранных из работающих котлов, которая значительно крупнее. Опыты по растворению в воде золы подсолнечной лузги, собранной из натрубных отложений в котле и из золоуловителей, показал, что доля водорастворимых компонентов составляет около 60% и меняется в зависимости от рабочих температур в местах сбора.

В ходе топочного процесса претерпевает существенные изменения и химический состав. На рисунке 9 приведены результаты анализа проб, отобранных из котла КЕ-10-14.

Отложения в высокотемпературных зонах имеют малое содержание калия, т.е. калий и его соединения наиболее подвержены переносу в газовой фазе. Карбонаты присутствуют главным образом в натрубных отложениях, благодаря их более низкой температуре. Подобный характер распределения по ходу дымовых газов имеют сульфаты. Это выявляет конденсационный механизм формирования отложений из возгонов золы.

Анализ образцов отложений золы по ходу дымовых газов (по мере убывания температуры отложений):

1. со дна топки,
2. с неэкранированных стен топки,
3. с пода камеры дожигаания,
4. с экрана топки,
5. под котельным пучком 1,
6. под котельным пучком 2,
7. под экономайзером.

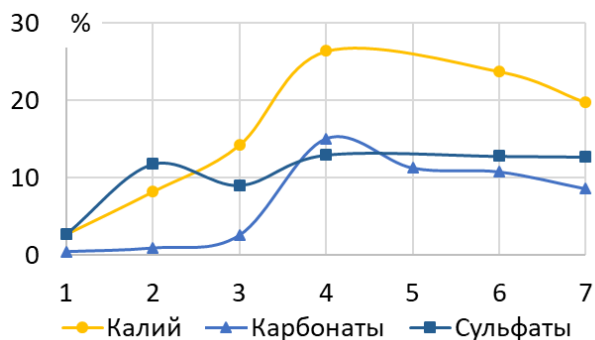


Рисунок 9 – Основные водоростворимые соединения в золе лужги

Исследование процессов формирования отложений в котлах на лужге важно для разработки способов борьбы с ними и обеспечения: длительной работы котла без остановок для очистки; экологически эффективного низкотемпературного сжигания; оптимальной температуры уходящих газов; расчетного аэродинамического сопротивления газового тракта.

Для котлов, сжигающих подсолнечную лужгу, характерно следующее распределение форм отложений, частично показано на рисунке 10:

- покрытие холодных труб экранов и котельных пучков тонким слоем рыхлой белой золы первичных отложений со стабильной толщиной в несколько миллиметров (*а*);
- нарастание на первичном слое отложений более жестких проплавливающих отложений, на дне и выступах в топочной камере (*а*) и на первых рядах труб за ней (*б*), дальнейший рост, упрочнение и распространение отложений в последующие ряды;
- оседание мелкой золы толстым слоем с высоким термическим сопротивлением на горизонтальных трубах (*в*).

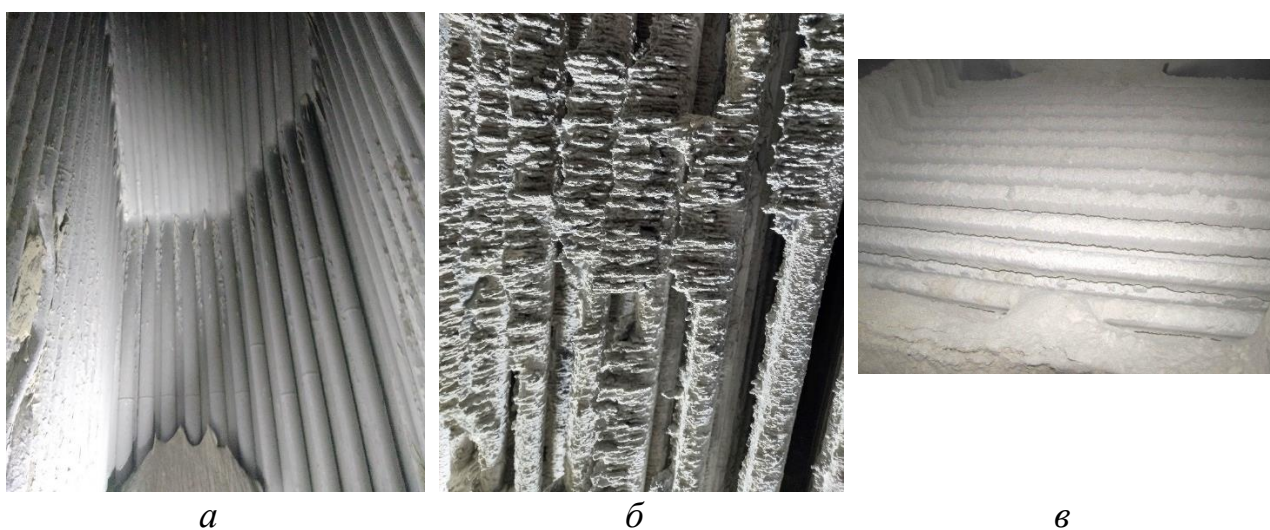


Рисунок 10 – Характерные формы отложений на поверхностях котлов

ВТ обеспечивает удержание частиц топлива и золы и полное выгорание горючих веществ. Побочным эффектом удержания топливных частиц и золы в

топке, является создание условий для интенсивного испарения летучих компонентов золы и формирования отложений.

Для подавления процессов шлакования конструкция ВТ должна оснащаться механизмом для регулярного вывода зольного остатка (Рисунок 11). Быстрое удаление золы из ВТ позволяет сократить время ее нахождения в зоне высоких температур.

Применение устройств золоудаления снизили как скорость роста, так и прочность отложений, но в силу высоких шлакующих свойств подсолнечной лузги для обеспечения продолжительной эффективной работы котлов требовалась разработка мер по очистке поверхностей нагрева. Известные методы и устройства автоматизированной очистки котлов для крупных энергетических котлов по разным причинам были непригодны или неэффективны для котлов малой и средней мощности.



Рисунок 11 – Шнек для удаления золы и шлака из ВТ

Самообдувка трубных пучков. Типично в котлах применяются шахматные и коридорные пучки теплообменных труб, геометрия и частота расположения труб влияет на формирование отложений. Проведены экспериментальные исследования и оптимизация расположения труб в пучках экономайзеров для лучшей их самообдувки. Испытания проводились на макете трубного пучка, помещённого в газоход действующего котла. По результатам испытаний экономайзеры с шахматным пучком приняты в производство.

Обдувка воздушной струей. По наблюдениям автора очистка труб конвективных пучков котлов и экономайзеров от мелкодисперсной несвязанной золы можно эффективно вести струйной обдувкой воздухом низкого давления. Разработанное устройство (Патент № 217448 РФ) содержит снабженную сопловой головкой обдувочную трубу с механизмами ее подачи и вращения, размещенными на подвижной каретке и установленную на этой же каретке воздухоподогреватель для подачи в обдувочную трубу воздуха с избыточным давлением от 20 до 50 кПа через вращающееся уплотнение.

Продолжительность работы без остановов на очистку является одним из наиболее важных требований к работе котла на лузге. На основе промышленных испытаний котла КЕ-10-14 до и после его реконструкции с установкой ВТ «Торнадо» и обдувочных аппаратов построена диаграмма (Рисунок 12), демонстрирующая прирост осредненной толщины отложений. В котле без устройств вывода золы и шлака их накопление происходит практически линейно и быстро достигает критического количества. Применение разработанного комплекса (устройство вывода золы из ВТ и обдувочные аппараты, виброочистка экономайзера) стабилизирует количество отложений и обеспечивает безостановочную работу котла.

Газоочистка. При сжигании лузги образуется много тонких частиц, аэрозолей, которые трудно осаждаются в золоуловителях и представляют опасность для здоровья людей и окружающей среды. Применение топок «Торнадо» обеспечило отсутствие горящих частиц в уходящих дымовых газах и это позволило применить рукавные фильтры собственной конструкции для обеспечения запыленности уходящих газов по перспективным требованиям, на уровне 20 мг/м^3 .

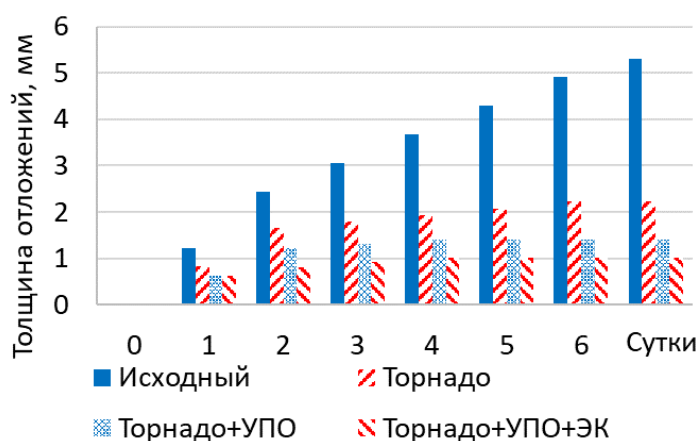


Рисунок 12 – Прирост толщины отложений в котле КЕ-10 на подсолнечной лузге.

Очистка колес дымососов. При работе котла на лузге мельчайшие частицы золы налипают на тыльной стороне лопаток колеса, слипаются и укрупняются, образуя наросты толщиной до 20 мм. Несмотря на низкую плотность летучей золы, образующиеся отложения вносят сильный дисбаланс и вибрацию в работу дымососа.

Для решения возникшей проблемы были разработаны меры: установка сопел с наружной и внутренней стороны колеса для обдувки лопаток сжатым воздухом без его останова; рабочее колесо с особым профилем лопаток.

Испытания соплового аппарата показали, что очистка колеса достигалась за 3 минуты обдувки с периодичностью очистки в 8 часов. Этого достаточно для предотвращения развития виброскорости сверх 4 мм/с .

Самообдувка рабочего колеса дымососа. Поскольку причиной появления отложений на тыльной стороне лопаток является характер распределения сил, действующих на частицу, чтобы частица не задерживалась на тыльной стороне предложено выбирать лопатки с углом $\beta_{л}$, близким к 90° (Рисунок 13).

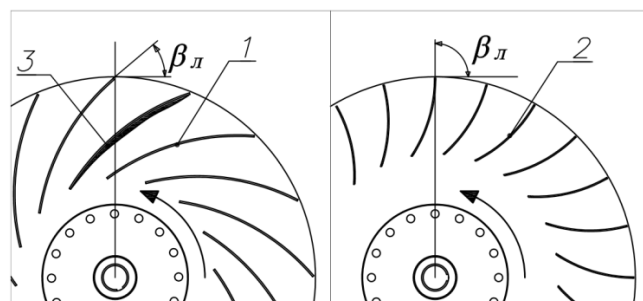


Рисунок 13 – Схема образования отложений на лопатках дымососа: 1 – лопатки колеса дымососа ДН; 2 – лопатки предлагаемого колеса; 3 – слой отложений; $\beta_{л}$ – угол лопатки

Глава 4 показывает практическую важность исследования. Разработанные с учетом представленных результатов изысканий конструкции низкотемпературных ВТ для лузги вписаны в топочные объемы паровых и водогрейных котлов. Изготовлено более 50-ти котлов с низкотемпературными ВТ для сжигания лузги, принципы и основы разработки которых изложены в настоящей диссертации. Помимо котлов с ВТ разработано специализированное вспомогательное оборудование для эффективной работы котлов.

Первым объектом, на котором была реализована принятая концепция проектирования котлов с ВТ стал котел КЕ-25-24 РТО на МЭЗ в с. Верхняя Хава Воронежской обл. (Рисунок 14). Котел поставлялся блоками из цельносварных мембранных панелей, образующих две параллельно расположенные радиальные ВТ с камерой охлаждения между ними. Техническое решение запатентовано. Котельная ячейка помимо котла включает вспомогательное оборудование.



Рисунок 14 – Монтаж блоков ВТ на котле КЕ-25-24 РТО

Схема котельной установки дана на рисунке 15. Разделительные экраны отделяют ВТ 3 от общей камеры охлаждения 4. Обе ВТ 3 соединяются с камерой охлаждения 4 через круглые ГОО.

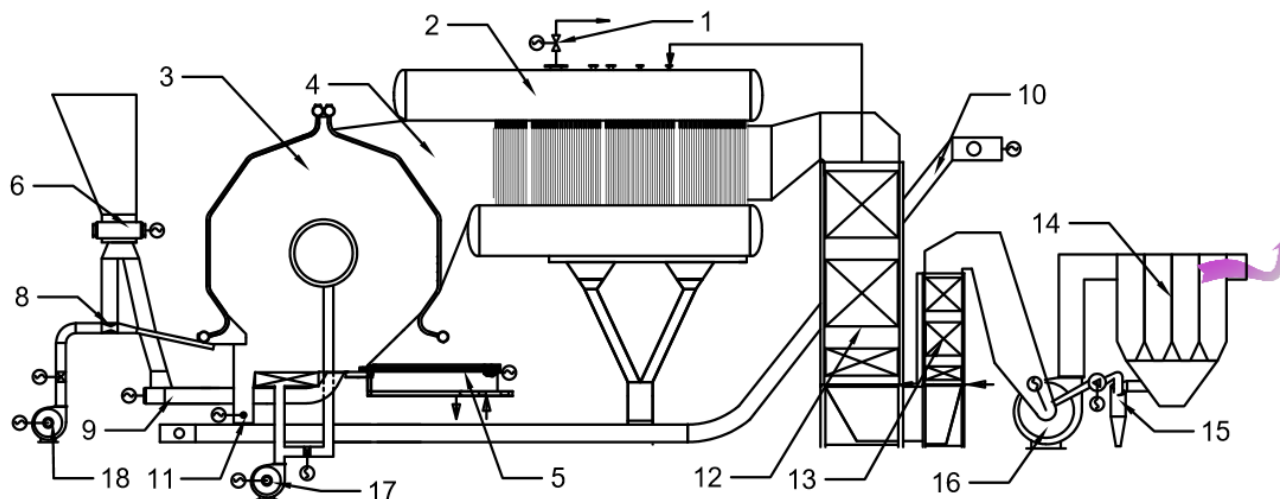


Рисунок 15 – Схема котельной установки с котлом КЕ-25-24 РТО:

1 – ГПЗ; 2 – Котел; 3 – ВТ (2шт.); 4 – Камера охл.; 5 – Мех. топка (2шт.); 6 – Питатель топлива (2шт.); 8 – Эжектор (2шт.); 9 – Питатель ретортный (2шт.); 10 – Конвейер ЗУ; 11 – Шнек ЗУ; 12 – Экономайзер; 13 – Экономайзер; 14 – Золоуловитель; 15 – Фильтр рец. золоул.; 16 – Дымосос; 17 – Вентилятор дутьевой (2шт.); 18 – Вентилятор пневмоподачи (2шт.)

В ВТ 3 через эжекторы 8 и ретортные питатели 9 подается лузга, а через фронтные, задние тангенциальные сопла и нижний водоохлаждаемый колосник подается дутье. Зола из топков 3 через шнек 11, камеры охлаждения 4 и котельного пучка удаляется конвейером 10. Дутье для пневмоподачи и горения подается вентиляторами 18 и 17 соответственно.

Низкотемпературное сжигание обеспечивается за счет большой удельной поверхности нагрева топочных камер – 90 м² против 63 м³ у реконструированного прототипа, КЕ-25-24 Р, удельная поверхность нагрева увеличена на 43 % за счет присутствия внутренних двухсветных пережимных экранов при тех же габаритах котла.

Важной особенностью ВТ, имеющих ступенчатую подачу дутья и интенсивное перемешивание топлива с воздухом, являются низкие значения недожога топлива и эмиссии оксидов азота, таблица 1.

Таблица 1 – Содержание загрязняющих веществ в уходящих газах котлов

Е-20-1,5-360 ОГИ (Газ)	Замер ($\alpha=1,4$)	При н.у. и α 1,4	Норма	Конц.
NO _x	44	92	300	мг/м ³
CO	83	173	-	мг/м ³
Е-20-1,5-360 ОГИ (лузга)	Замер ($\alpha=1,32$)	При н.у. и α 1,4		
NO _x	177	279	300	мг/м ³
CO	215	399	-	мг/м ³
Е-14-1,4 ОИ (Лузга)	Замер ($\alpha=1,33$)	При н.у. и α 1,4		
NO _x	173	274	300	мг/м ³
CO	110	174	-	мг/м ³

Для расширения возможностей огневой утилизации сельскохозяйственных отходов разработаны теплогенераторы, вырабатывающие нагретый воздух для сушильных установок.

Касаясь перспектив технологии, годовой тепловой потенциал лузги в России, составляет примерно 13 млн. Гкал/год (54 млн. ГДж/год). Суммарная паропроизводительность котлов на лузге, произведенных ООО «ПроЭнергоМаш» до 2024 года – 423 тонны пара в час, что эквивалентно 254 Гкал/час. При годовой наработке 8000 часов это около 2,3 млн. Гкал/год или около 17,8% общего объёма в России. Это говорит о наличии значительного потенциала для расширения производства котлов с технологией «Торнадо».

Дополнительный спрос на утилизационные котлы открывают БиоЭС. Внедрение малой генерации, обеспечивающей нужды предприятия без отпуска в сеть, на сегодняшний день является наиболее востребованным. Применение разрабатываемых роторно-винтовых машин и котельно-топочной техники позволит комплексно решать вопросы строительства котельных и мини-ТЭЦ на основе новых технологий утилизации биомассы.

Для традиционных энергетических твердых топлив возможно создание более экологически и экономически эффективных схем организации топочных процессов на основе полученного при строительстве котлов на лузге опыта. Заполнение вихревой камеры сгорания частицами золы и низкотемпературный режим приближают технологию «Торнадо» к топочным процессам в циркулирующем кипящем слое с сохранением преимуществ простоты пылеугольного сжигания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Обобщен мировой опыт использования биотоплив и роль зелёных тарифов в организации утилизации растительных отходов. Показаны проблемы

- эксплуатации котлов на подсолнечной лузге и влияние вынужденного останова для очистки от золовых отложений на эффективность работы ЭУ.
2. Разработаны и запатентованы конструкции пережима в виде ГОО, обеспечивающие повышение удержания частиц, экологическую и экономическую эффективность ВТ. Показана необходимость поддержания низкотемпературного режима сжигания лузги, эффективно организуемого достаточным экранированием ВТ. Разработаны экранированные низкотемпературные ВТ «Торнадо», отличающиеся от известных конструкций – это топки радиального типа, с характерными отношениями: условный диаметр топки ($D_{\text{топ}}$)/диаметр ГОО ($d_{\text{ГОО}}$) = 4...6; диаметр топки ($D_{\text{топ}}$)/глубина топки ($B_{\text{топ}}$) = 2...6; а экранированная ВТ снабжена ГОО с подачей третичного дутья и слоевым топочным устройством.
 3. Дополнена нормативная методика для расчета котлов с ВТ. С применением моделирования, натурных и промышленных испытаний выявлены рациональная геометрия, конструкция ВТ и состав технологических схем утилизации лузги.
 4. Опытными промышленными испытаниями выявлено, что радиальные ВТ с верхним вводом лузги эффективнее топок с нижним вводом, причём котлы с полным сгоранием топлива в ВТ, имеют большую эффективность и меньше шлакуются, чем котлы с дожиганием части топлива за ВТ, чему дано теоретическое обоснование. Испытаниями доказана возможность работы ВТ «Торнадо» с минимальными избытками воздуха ($\alpha_{\text{т}} = 1,15...1,2$), что значительно ниже типовых значений для биотопливных котлов (1,7...2) и обеспечивает большую эффективность ЭУ.
 5. Рассмотрены механизмы переноса золы, этапы образования твердых отложений и характерное для сжигающих подсолнечную лузгу котлов их формирование: рыхлых и прочных, стабильных и нарастающих по толщине. Предложены способы, разработаны и промышленно внедрены устройства для борьбы с формирующимися в котлах отложениями и их очистки.
 6. Реализованы обладающие промышленной применимостью и новизной запатентованные инновационные разработки, решающие поставленные в диссертации задачи – созданы ВТ «Торнадо», котлы и ЭУ на их основе с повышенными экономическими и экологическими показателями. Для сжигания лузги по разработанной технологии изготовлено и эксплуатируются более 50 котлов в составе 40 ЭУ. Их установленная мощность позволяет утилизировать до 17,8% вырабатываемой в стране лузги, сэкономить 357 тыс.т.у.т./год, снизить выбросы золы на 140 тыс.т./год и выработать тепло с экономическим эффектом $\mathcal{E}=4,86$ млрд.руб./год.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов (перечень ВАК):

1. **Пузырев, М.Е.** Технология «Торнадо» для энергетических котлов / Е. М. Пузырёв, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // *Электрические станции – 2022.* – № 6 – С. 10-16.

2. **Пузырев, М.Е.** Разработка вихревых топок для энергетических котлов / Е. М. Пузырёв, М. Е. Пузырев, В. А. Голубев // Журнал Энергетик – 2017. – № 4 – С. 44-47.
3. **Пузырев, М.Е.** Роторно-винтовые двигатели / Е. М. Пузырев, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Известия Томского политехнического университета – 2014. – Т. 324. – № 10 – С. 38-45.
4. **Пузырев, М.Е.** Роторные машины / Е. М. Пузырев, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Ползуновский вестник – 2013. – № 4/3 – С. 63-69.
5. **Пузырев, М.Е.** Оценка доли зеленой энергии при сжигании биомассы / В. А. Голубев, Е. М. Пузырев, М. Е. Пузырев // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 39-41.
6. **Пузырев, М.Е.** Разработка технологии пиролиза и применение газогенераторов при утилизации отходов / Е.М. Пузырев, В.Г. Лурий, А. В. Лаптов, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Ползуновский вестник – 2010. – №1. – С.87-92.

Результаты интеллектуальной деятельности:

7. Патент № 217448 РФ. Устройство для обдувки поверхностей нагрева котла / **Пузырев М. Е.** – № 2022134392 : заявл. 27.12.22 : опубл. 03.04.2023. – 7 с.
8. Патент № 2748363 РФ. Котел с вихревым дожиганием / **Пузырев М. Е.,** Пузырёв Е. М., Платов И. В. – № 2020135908 : заявл. 02.11.2020 : опубл. 24.05.2021. – 11 с.
9. Патент № 200824 РФ. Котел с внутритопочными циклонами / **Пузырев М. Е.,** Пузырёв Е. М., Голубев В. А. – № 2019129150 : заявл. 17.09.19 : опубл. 12.11.2020. – 11 с.
10. Патент № 198069 РФ. Твердотопливная низкотемпературная вихревая топка / **Пузырев М. Е.,** Пузырёв Е. М., Жуков Е. Б., Тиханов М. В. – № 2020100840 : заявл. 14.01.2020 : опубл. 17.06.2020. – 7 с.
11. Патент № 195412 РФ. Теплогенератор / **Пузырев М.Е.,** Пузырев Е.М. – № 2019125247 : заявл. 09.08.19 : опубл. 28.01.2020. – 8 с.
12. Патент № 197085 РФ. Низкотемпературная вихревая топка / **Пузырев М. Е.,** Пузырёв Е. М., Жуков Е. Б., Тиханов М. В. – № 2020100775 : заявл. 14.01.2020 : опубл. 30.03.2020. – 7с.
13. Патент № 2675644 РФ. Котел с циркулирующим слоем / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., **Пузырев М. Е.** – № 2017136769 : заявл. 18.10.2017 : опубл. 21.12.2018. – 13 с.
14. Патент № 2675639 РФ. Роторно-винтовая машина / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., **Пузырев М. Е.** – № 201710477 : заявл. 14.02.17 : опубл. 21.12.18. – 16 с.
15. Патент № 2695877 РФ. Энергетический котел / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., **Пузырев М. Е.** – № 2018113201 : заявл. 11.04.2018 : опубл. 29.07.2019. – 14 с.

16. Патент № 2648314 РФ. Котел с камерной топкой / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., **Пузырев М. Е.** – № 2015155848 : заявл. 24.12.15 : опубл. 23.03.2018. – 11 с.
17. Патент № 2627757 РФ. Слоевой котел с вертикальной вихревой топкой / Пузырев Е. М., **Пузырев М. Е.**, Голубев В. А. – № 2015149577 : заявл. 18.11.2015 : опубл. 11.08.2017. – 16с.
18. Патент № 2627752 РФ. Котел с двухкамерной вихревой топкой / Пузырёв Е.М., Афанасьев К.С., Голубев В.А. **Пузырев М.Е.** – № 2015152387 : заявл. 24.12.2015 : опубл. 11.08.2017. – 11 с.
19. Патент № 2611117 РФ. Роторная машина / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., **Пузырев М. Е.** – № 2015111887 : заявл. 01.04.15 : опубл. 21.02.17. – 8 с.
20. Патент № 2591070 РФ. Твердотопливный котел с вихревой топкой / Пузырёв Е. М., Голубев В. А. **Пузырев М. Е.** – № 2014131658 : заявл. 30.07.2014 : опубл. 10.07.2016. – 13 с.
21. Патент № 2582722 РФ. Вихревая топка / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., **Пузырев М. Е.** – № 2013136666 : заявл. 05.08.13 : опубл. 27.04.2016. – 11 с.
22. Патент № 2573078 РФ. Вихревая камерная топка / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., **Пузырев М. Е.** – № 2014107891 : заявл. 28.02.14 : опубл. 20.01.2016. – 11 с.
23. Патент № 2564171 РФ. Роторный механизм / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., **Пузырев М. Е.** – № 2013143273 : заявл. 24.09.13 : опубл. 27.09.15. – 9 с.
24. Патент № 2552009 РФ. Механизированная слоевая топка / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., **Пузырев М. Е.** – № 2013159350 : заявл. 30.12.2013 : опубл. 10.06.2015. – 8 с.
25. Патент № 2564172 РФ. Роторная машина / Пузырёв Е. М., **Пузырев М. Е.** – № 2013143340 : заявл. 27.09.13 : 24.09.15. – 14 с.
26. Патент № 128697 РФ. Вихревая топка с газоотводящим окном (варианты) / Пузырев Е. М., Голубев В. А. **Пузырев М. Е.** – № 2011147584 : заявл. 23.11.2011 : опубл. 27.05.2013. – 12с.
27. Патент № 107841 РФ. Топка кипящего слоя / Пузырев Е. М., Голубев В. А., **Пузырев М. Е.** – № 2011112811 заявл. 01.04.11 : опубл. 27.08.11. – 12 с.
28. Патент № 86277 РФ. Вихревая топка / Афанасьев К. С., Голубев В. А., Жуков Е. Б., Пузырев Е. М., **Пузырев М. Е.** – 2009111614 : заявл. 30.03.09 : опубл. 27.08.2009. – 14 с.

Издательская лицензия ЛР 020261 от 14.01.1997.

Подписано в печать 24.12.2024.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Усл.-печ. л. 1,16. Тираж 100. Заказ 706.

Типография Алтайского государственного университета:
656049, Барнаул, ул. Димитрова, 66