

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Общество с ограниченной ответственностью «ПроЭнергоМаш-Проект»

На правах рукописи



ПУЗЫРЕВ

Михаил Евгеньевич

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

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Голубев Вадим Алексеевич

Барнаул - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	12
1.1 О возобновляемой энергетике и роли биотоплива	12
1.2 Характеристики древесной биомассы.....	16
1.3 Анализ влияния влажности и схемы топочного процесса.....	18
1.4 Роль зелёных тарифов в утилизации отходов	21
1.5 Особенности и практика организации сжигания биомассы	22
1.6 Сжигания биомассы в пылеугольных котлах.....	27
1.7 Зарубежный опыт и котлы для сжигания биомассы	31
1.8 Лузга – отход и биотопливо	35
1.9 Проблемы утилизации лузги.....	39
1.10 Затраты на останов котла для очистки.....	43
1.11 Теплотехнические характеристики лузги разных культур	47
Выводы по первой главе.....	51
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ВИХРЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ «ТОРНАДО»	52
2.1 Особенности вихревых течений и их применение в энергетике.....	52
2.2 Вихревые топки и камеры сгорания, роль пережима.....	55
2.3 Разработка конструкций газоотводящего окна.....	60
2.4 Предшествующий опыт сжигания лузги в вихревых топках	66
2.5 Анализ схем организации низкотемпературного сжигания	70
2.6 Разработка конструкции вихревых топок «Торнадо»	75
2.7 Моделирование вихревых топочных камер	86
2.8 Разработка паровых котлов с вихревыми топками.....	93
Выводы по второй главе	103
ГЛАВА 3 ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЗОЛОЙ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЧИСТКИ.....	105
3.1 Характеристики золы лузги	105
3.2 Поведение золы при сжигании лузги в вихревых топках.....	112
3.3 Изменение состава золы при сжигании лузги.....	116

3.4 Улетучивание минералов из золы	120
3.6 Образование отложений	126
3.7 Формирование отложений.....	131
3.8 Спекание отложений.....	139
3.9 Удаление золы из вихревой топки.....	141
3.10 Очистка поверхностей нагрева	144
3.11 Очистка дымососов.....	166
3.12 Газоочистка.....	170
Выводы по третьей главе.....	171
ГЛАВА 4 ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «ТОРНАДО»	173
4.1 Опыт промышленного применения разработанного оборудования.....	173
4.2 Теплогенератор – альтернативный способ утилизации лузги.....	186
4.3 Оценка перспектив полезного использования лузги.....	191
4.4 Перспективы низкотемпературного вихревого сжигания в энергетике .	195
Выводы по четвертой главе.....	201
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	203
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	205
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	206
ПРИЛОЖЕНИЕ А «АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ»	223
ПРИЛОЖЕНИЕ Б «ПАТЕНТЫ»	226

ВВЕДЕНИЕ

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 [1]. 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 утилизация горючих отходов одновременно решает задачи ликвидации грязных, пожароопасных свалок и повышения рентабельности предприятий.

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: Алексеев С.В., Гольдштик М.А., Куйбин П.А., Маркович Д.М., Саломатов В.В., Смольский 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., Заборина 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 рациональных 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 сопл дутья и ввода топлива, характеристики выходного режима 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 расчётами и промышленными испытаниями схема вихревого низкотемпературного сжигания «Торнадо»;
- разработаны и запатентованы десятки инновационных технических решений, которые использованы при создании специализированного КВО, улучшающих эксплуатационные характеристики ЭУ, работающих на лузге и растительных отходах (приложение Б «Патенты»);

- 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 (Приложение А «Акты о внедрении»).

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, топок «Торнадо» радиального типа, котлов на их основе, а также котельно-вспомогательное оборудование.
2. Проверенные натурными исследованиями и промышленным применением рациональные геометрические профили вихревых топок 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.

Благодарность. За возможность плодотворной совместной работы по исследованию и практическому внедрению разработок, за помощь и сотрудничество автор выражает глубокую благодарность:

- Пузырёву Е.М., д.т.н., зам. директора по научной работе, и всему коллективу ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», г. Барнаул;
- Голубеву В.А., к.т.н. и профессору Сеначину П.К., д.т.н., АлтГТУ, г. Барнаул;
- генеральному директору Варкову В.В. и техническому директору Варкову В.А., ООО ПО «Котлосервис», г. Урюпинск.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 О возобновляемой энергетике и роли биотоплива

Диссертация посвящена рассмотрению вопросов организации огневой утилизации растительных отходов, в том числе лузги. Лузга выделена среди других отходов, так как является сухим, качественным, однородным по составу, простым в обращении видом биотоплива, и во многих сельхоз предприятиях она уже является ресурсосберегающей базой для собственной энергетики.

Биоэнергетика относится к числу наиболее важных, интенсивно развивающихся направлений современной энергетики, к ВИЭ, а последние десятилетия характеризуются резким ростом производства электро- и тепловой энергии на основе ВИЭ во многих странах мира. Например, производство ВИЭ электроэнергии в странах ЕС с 2006 по 2017 годы выросло почти в 4 раза (до 674,3 млрд кВт×ч) и достигло 20,5 % от общего производства электроэнергии, а установленная мощность электростанций в ЕС на основе ВИЭ (без ГЭС) увеличилась за этот период в 4,4 раза и достигла $N_{уст\text{Э}}=320$ ГВт [2]. Для сравнения, на 01.01.2022 $N_{уст\text{Э}}=246,6$ ГВт всех электростанций России, включая ГЭС.

С другой стороны, в 2006 году мировая выработка электроэнергии составила в общем производстве энергии на основе ВИЭ всего 10 %, а к 2016 году эта доля увеличилась лишь до 11,4 %, так как подавляющую часть в этих объемах занимали биотопливо и твердые коммунальные отходы: 94 % в 2006 году и 86 % в 2016 году [2]. Это объясняется тем, что из-за случайного характера изменения метеофакторов коэффициент использования установленной мощности – КИУМ электроэнергетики на основе ВИЭ в 2016 году составил всего лишь 0,24, причем за указанный период он снизился до 0,21. В то же время КИУМ традиционных ТЭЦ в 2006 году имел гораздо большее значение, около 0,57, хотя тоже снизился, причем весьма существенно, до 0,51 [2] и негативную роль в этом сыграл интенсивный ввод ВИЭ на основе солнечной и ветровой энергетики.

В [2] также отмечается, что процесс внедрения ВИЭ за рубежом сам по себе не пошел бы так активно ввиду экономической нецелесообразности: стоимость

1 кВт·ч, получаемого от ВИЭ, гораздо выше, для России в среднем в 4,5 раза, чем от ТЭЦ. По-видимому, и сейчас следует дожидаться в ближайшие годы прогресса в технологии производства и аккумуляции электроэнергии на основе ВИЭ и перепрыгнуть настоящий этап развития ВИЭ, как это произошло, например, при переходе от ламп накаливания сразу к более эффективным светодиодным лампам, минуя этап внедрения компактных люминесцентных ламп.

В России ветровые, солнечные и приливные электростанции на ВИЭ особо не дотировались, поэтому они традиционно занимают незначительное место. Исключение составляют многочисленные ТЭЦ целлюлозно-бумажных комбинатов и крупных деревоперерабатывающих предприятий, которые были целенаправленно построены совместно с ними для утилизации кородревесных отходов – КДО. Основным направлением энергетического использования ВИЭ в России, впрочем, как и во всём мире (Рисунок 1.1) является выработка тепловой энергии. Наибольшим количеством тепловой энергии отличается тепловая генерация на основе энергии биомассы – 4323 ТВт·ч/год [3]. Установленные мощности и годовая выработка тепловой энергии солнечного теплоснабжения составили 501 ГВт и 407 ТВт·ч/год, геотермального теплоснабжения – 108 ГВт и 284 ТВт·ч/год.

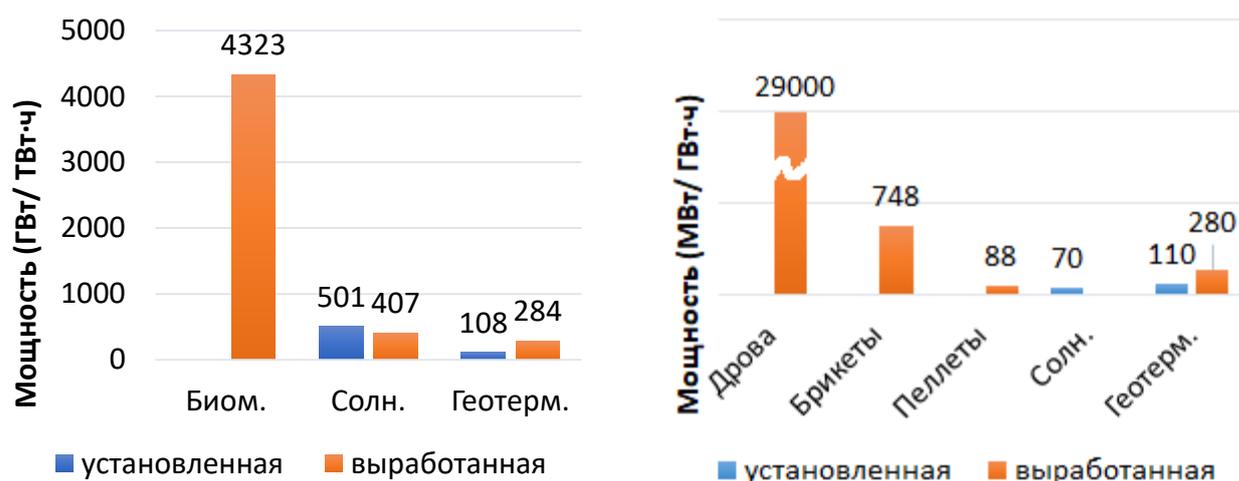


Рисунок 1.1 – Установленные мощности и выработка тепловой энергии на основе ВИЭ в мире в 2020 году [3]

Рисунок 1.2 – Установленные мощности и выработка тепловой энергии на основе ВИЭ в России в 2020 году [3]

Соответствующие данные для России с выделением доли облагороженных видов биотоплива на основе переработки древесины даны на рисунке 1.2 [3]. Из этих данных видно, что для России без искусственно создаваемых государством преференций эффективна только выработка тепловой энергии, в том числе технологического пара, высокотемпературных теплоносителей и горячей воды с использованием дров, КДО и других растительных отходов.

Среди биотоплив наибольшая доля представлена древесиной [4]. Так как большая часть древесины идет в отходы, которые вместе с дровяными деревьями непосредственно являются биотопливом или служат сырьевой базой для его производства, рубятся в щепу либо в малой части (Рисунок 1.2) перерабатываются в брикеты и пеллеты.

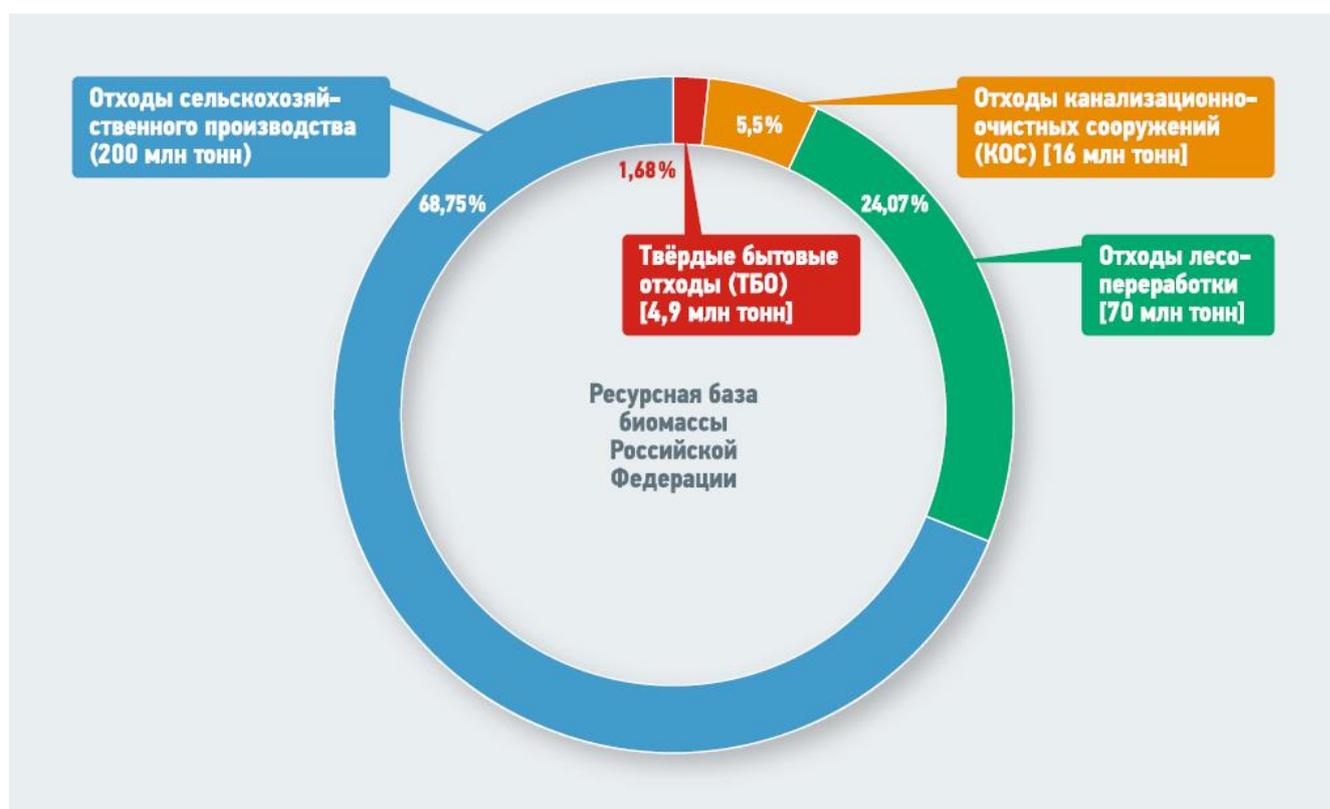


Рисунок 1.3 – Ресурсная база биомассы Российской Федерации [5]

В России опубликовано большое количество работ по оценке ресурсной базы биомассы страны. В [5] (Рисунок 1.3) приводятся следующие цифры ежегодных органических отходов:

- лесопереработка – 70 млн. тонн;

- растениеводство – 126 млн. тонн;
- животноводство и птицеводство – 66,5 млн. тонн;
- городские твёрдые бытовые отходы – 16 млн. тонн;
- осадки городских канализационных очистных сооружений – 4,9 млн. тонн.

Так отходы лесопереработки по оценке при естественной влажности обладают ежегодно энергетическим потенциалом в 171 млн.Гкал или 715 млн.ГДж.

Сухая древесина – высококачественное твердое топливо с низкой зольностью и высоким $V^{daf}=80-95\%$ выходом летучих, легко воспламеняется и быстро сгорает. Кроме того, простое прессование измельченной сухой древесины через фильеры благодаря наличию в ней значительной доли лигнина, обретающего текучесть при приложении нагрузки, переводит древесину в гранулы – пеллеты. Пеллеты – это новый вид топлива с высокой насыпной плотностью, удобный в хранении, доставке и сжигании, применение которого сейчас значительно расширяется.



Рисунок 1.4 – При открытом хранении плесневеет, гниёт, заражается грибком



Рисунок 1.5 – Горящую биомассу невозможно полностью потушить даже зимой

Древесное биотопливо в виде отходов, особенно КДО, имеет низкую насыпную плотность и соответственно большие объёмы. Высокая рабочая влажность $W_i=40 - 60\%$ и крайне разнообразный сортамент усложняют обращение, затрудняют организацию сжигания, а также требуют быстрой утилизации, так как при хранении сырая биомасса теряет товарные свойства, гниёт и самовоспламеняется (Ри-

сунки 1.4 и 1.5). В итоге на сегодня для многих предприятий большой выход биотоплива в виде сырых отходов является не основой энергетической независимости предприятий, а серьёзным сдерживающим развитие фактором. Соответственно, имеющиеся проблемы обращения с КДО, включая сжигание, и имеющийся опыт их решения необходимо учесть при разработке технологии по организации утилизации потоков лужги и других растительных отходов.

1.2 Характеристики древесной биомассы

В виду низкой плотности древесных отходов и их большого количества по выходу древесные отходы характеризуются огромными объёмами, которые представляют реальную биологическую и пожарную угрозу для территории (Рисунки 1.4 и 1.5) и большие трудности в логистике. При этом на лесоперерабатывающих предприятиях организовать длительное закрытое хранение, особенно влажной биомассы с сохранением её качества, практически невозможно. Открытое хранение сопровождается дополнительным насыщением биомассы дождевой влагой и ещё более быстрой деградацией качества, с потерей калорийности и эмиссией метана и других загрязнителей, соответственно, присутствует необходимость незамедлительной утилизации биомассы по мере её выхода.

Итак, влага в биомассе – наиболее вредная балластирующая составляющая. Оценка её влияния проводилась в [6] расчётно-аналитическим методом на основе [7]. Был проведен анализ влияния влажности W^r на калорийность (Рисунок 1.6)

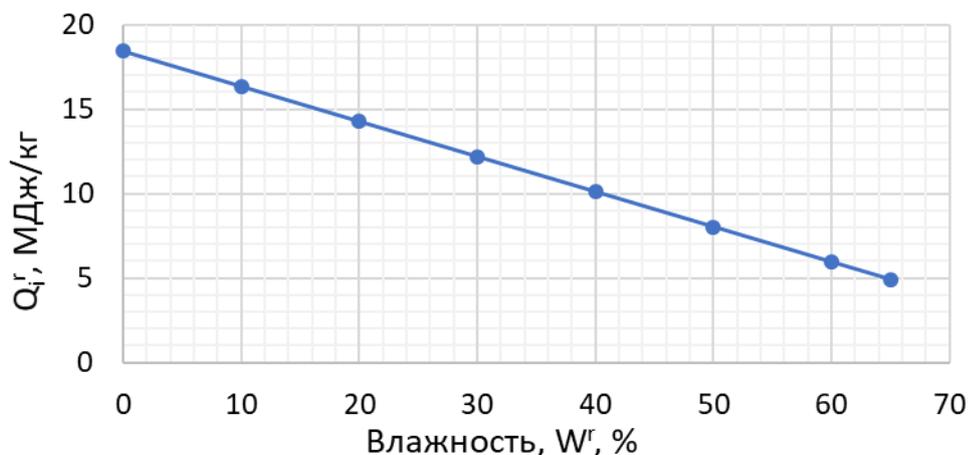


Рисунок 1.6 – Зависимость теплоты сгорания КДО Q_i^r от влажности W^r

Также проанализировано [6] влияние влажности W^r_i на и адиабатическую температуру горения T_a , °С (Рисунок 1.7), причем с учетом влияния подогрева дутья, воздуха горения, $t_{2в}=250$ °С [8]. На рисунке 1.7 также показан график изменения влагосодержания $\omega=100 \cdot W^r_i / (100 - W^r_i)$ %, отношение массы влаги к сухой массе топлива.

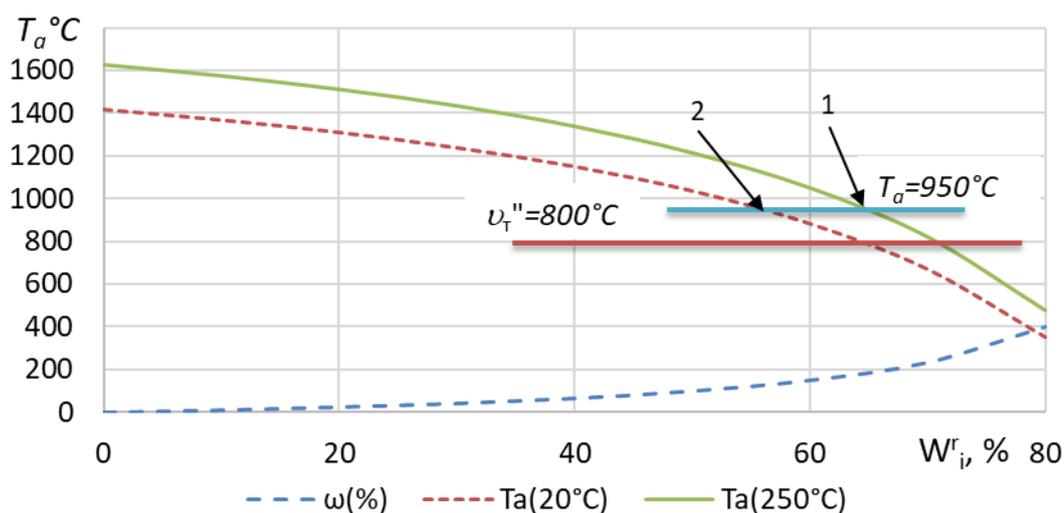


Рисунок 1.7 – Влияние влажности W^r_i и подогрева дутья на адиабатическую температуру горения T_a

Очевидно, что влага не просто является балластом и снижает теплоту сгорания Q^r_i , она забирает ещё часть теплоты сгорания на испарение влаги из топлива, а в зимних условиях нужно учитывать, что влага замерзает, и для плавления льда требуется подвод дополнительной теплоты в размере $Q_{nl} = W^r_i \times 334$ кДж/кг.

Из рисунка 1.7, видно, что при температуре автогенного горения (на пределе самоподдерживающегося горения), по опыту равной примерно $T_a=950^\circ\text{C}$, можно сжигать древесину с рабочей влажностью не выше $W^r_i \approx 48-50$ %.

Одна из мер стабилизации горения - подогрев дутья, здесь до $t_{2в}=250$ °С, позволяет сжигать более влажную древесину с $W^r_i \approx 57-60$ % (точка 2). Подогрев дутья до 250 °С (Рисунок 1.7) при влажности $W^r_i=50\%$ увеличивает температуру адиабатического горения T_a от 926°C до 1069 °С, на 143°C , и за счет этого возрастает интенсивность топочного процесса.

1.3 Анализ влияния влажности и схемы топочного процесса

Используя графики, приведенные на рисунках 1.6 и 1.7 можно провести более глубокий анализ возможных схем организации топочного процесса. Для устойчивого горения КДО температура на выходе из топки поддерживается на уровне $\nu_T''=800^\circ\text{C}$, так как при этом легко обеспечить полное, без механического недожога сжигание биотоплива, причём без расплавления золы и зашлаковывания топки.

При полном сгорании топлива температура уходящих дымовых газов ν_{yx} за котлом в совокупности с избытком воздуха α_{yx} и влажностью топлива предопределяет основные потери тепла. Это потери тепла с уходящими дымовыми газами q_2 , температура которых поддерживается на уровне $\nu_{yx} - 150\dots 200^\circ\text{C}$. На рисунке 1.8 приведен график для q_2 , рассчитанный при $\alpha_{yx} = 1,5$ и $\nu_{yx} = 150^\circ\text{C}$. Видно, что при влажности выше 50-60% потери тепла q_2 резко увеличиваются за счёт большого выноса из котла теплоты с испарившейся влагой топлива.

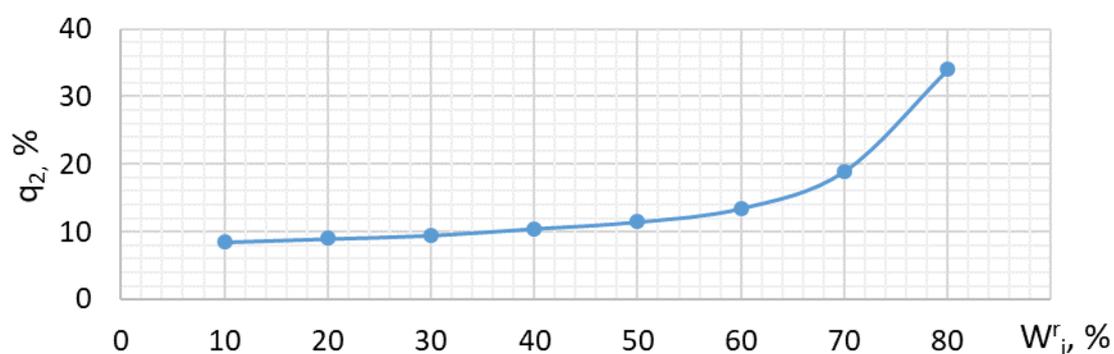


Рисунок 1.8 – Потери тепла с уходящими газами в зависимости от влажности [8]

В топке продукты сгорания охлаждаются на $\Delta\nu_T = T_a(W_{ri}) - \nu_T''$ °C, от адиабатической температуры $T_a(W_{ri})$ до температуры на выходе из топки ν_T'' с тепловосприятием q_T удельного тепла на кг топлива от топочных газов топочными экранами. При этом температура ν_T'' по условию устойчивого горения и отсутствия шлакования должна поддерживаться постоянной, типично на уровне $\nu_T''=800^\circ\text{C}$.

В конвективном пучке дымовые газы соответственно должны охлаждаться от ν_T'' до ν_{yx} с тепловосприятием тепла $q_{кп}$ конвективными поверхностями нагрева

котла, причём эти температуры примерно постоянны, поэтому неизменна и их разница $\nu_T'' - \nu_{yx} = \Delta \nu_{кп} = 630 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом общее охлаждение продуктов сгорания в котле $\Delta \nu_{ка}$ осуществляется до температуры уходящих дымовых газов ν_{yx} за котлом и соответствует общей разнице температур $\Delta \nu_{ка} = Ta(W^r_t) - \nu_{yx} \text{ }^\circ\text{C}$.

С другой стороны, при поддержании постоянной полезной мощности котла $q_{ка}$ распределение тепловосприятий между топочными экранами и конвективным пучком должно удовлетворять уравнению теплового баланса:

$$q_{ка} = q_T + q_{кп} = \eta_{ка} \times Q^r_i. \quad (1.1)$$

В итоге распределение тепловосприятий (Рисунок 1.9) между экранами топки q_T и конвективным пучком $q_{кп}$ и соответственно требуемые площади этих поверхностей нагрева в котле - экранов и трубных пучков в конвективном газоходе котла становятся существенно зависимыми от влажности исходного топлива.

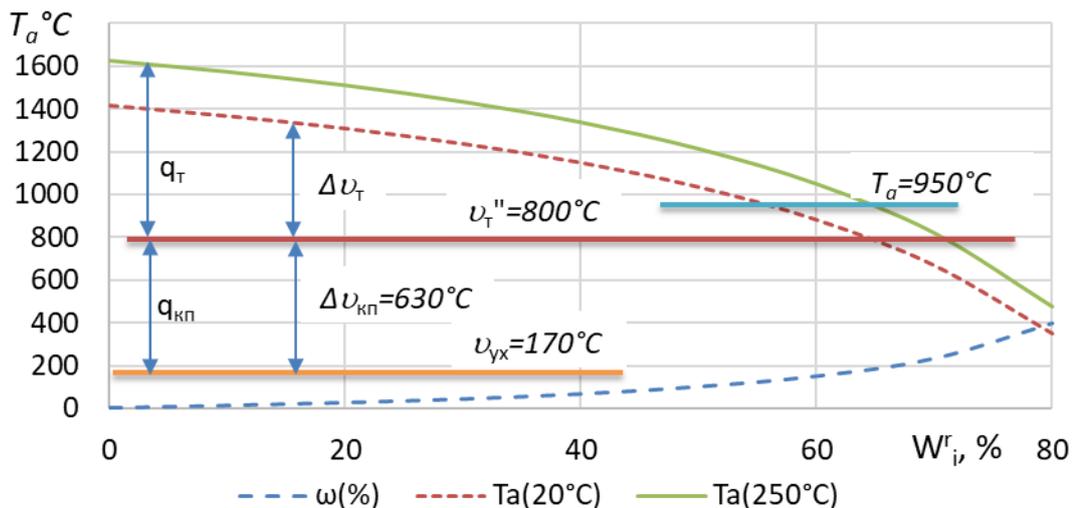


Рисунок 1.9 – Влияние влажности и подогрева дутья на баланс тепла и тепловосприятий в котле

Для примера дано сравнение некоторых возможных вариантов организации сжигания влажной древесины с иллюстрацией на рисунке 1.9:

1. Сухое топливо $W^r_t = 10\%$ с подогревом дутья, $t_{gv} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$.
2. Сухое топливо $W^r_t = 10\%$ без подогрева дутья, $t_{gv} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Сырое топливо $W^r_t = 50\%$ с подогревом дутья, $t_{gv} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$.
4. Сырое топливо $W^r_t = 50\%$ без подогрева дутья, $t_{gv} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Данные оценок принятые и рассчитанные согласно рисункам 1.6...1.9 приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Влияние влажности биотоплива и температуры дутья на T_a и распределение долей теплосъёма в топке и конвективном пучке котла

W_t^r	ω	$t_{гв}$	T_a	Δu_T	$\Delta u_{кп}$	$\Delta u_T/\Delta u_{ка}$	$\Delta u_{кп}/\Delta u_{ка}$
%	%	°С	°С	°С	°С	%	%
10	11	250	1490	690	630	52,3	47,7
10	11	20	1310	510	630	44,7	55,3
50	100	250	1069	269	630	30	70
50	100	20	926	126	630	16,7	83,3

Из данных таблицы 1.1 видно, что сухие, $W_t^r=10\%$, биотоплива имеют высокую адиабатическую температуру (T_a) – 1310...1490 °С, и при их сжигании в высокотемпературных зонах зола будет расплавляться, вызывая зашлаковывание топки, поэтому топка должна интенсивно охлаждаться со съемом 45...52% выделяющегося при сгорании тепла. С повышением влажности от 10% до 50% отношение температур $\Delta u_T/\Delta u_{ка}$ и соответственно требуемая для поддержания по условию работы топки без её зашлакования, $u_T''=800$ °С, доля теплосъёма в топке $\Delta u_T/\Delta u_{ка}$ снижается с 44,7% до 16,7%, а теплосъём в конвективном газоходе, необходимый для обеспечения заявленной номинальной тепловой мощности котла, повышается с 55,3% до 83,3%. Соответственно, для выполнения этих условий необходимо снижать площадь топочных экранов и увеличивать площадь пучков труб, которые расположены в конвективном газоходе котла вслед за изменением влажности топлива, т.е. оперативно менять конструкцию котла или менять интенсивность теплосъёма, что до последнего времени было технически нереальным.

Так как при кучевом складировании (Рисунки 1.4 и 1.5) характеристики КДО в разных местах отбора по высоте и площади кучи в соответствии с распределением

свежего и перепревшего топлива могут сильно отличаться, то и организация сжигания биотоплива является достаточно сложной задачей. Типично они переувлажнены, и это требует [9-11] специальных мер поддержания горения:

- уменьшение влажности топлива за счет отжима и подсушки;
- подогрев подаваемого на горение воздуха;
- дополнительное сжигание в топке высококалорийного топлива;
- применение неэкранированных (обмурованных) топок;
- осреднение характеристик за счёт перемешивания потоков биотоплив.

1.4 Роль зелёных тарифов в утилизации отходов

Ввиду низкой плотности, $50...200 \text{ кг/м}^3$, сельскохозяйственных и древесных отходов и их большого количества по выходу – это огромные объёмы загрязнений, появившиеся в связи с интенсивным развитием промышленной переработки биомассы. Потребовались меры по их утилизации. Сама по себе утилизация для мелких предприятий переработки по большей части экономически проигрышная в сравнении с использованием качественных ископаемых твердых, жидких и газообразных топлив, как из-за показанной выше сложности в организации топочного процесса, так и из-за трудностей логистики при перевозке огромных объёмов отходов. Выход был постепенно найден, причём не за счёт введения ограничений и отягощения деятельности предприятий - переработчиков, а за счет введения зелёных тарифов - экономического и политического механизма, предназначенного для привлечения инвестиций в технологии использования ВИЭ.

Впервые идея льготных тарифов была реализована в США Джимми Картером в 1978 году, который подписал Закон о национальной энергетике (NEA). Этот закон включал пять отдельных актов, одним из которых был Закон о политике регулирования коммунальных предприятий (PURPA). Закон был принят в ответ на энергетический кризис 1973 года [12]. Цель этих законов заключалась в поощрении энергосбережения и развитии новых видов энергетических ресурсов, в том числе возобновляемых источников энергии на основе биотоплив. По состоянию на 2019

год в более чем 50 странах приняты законы, регулирующие выработку электроэнергии при помощи зелёных тарифов [12].

Введение зелёных тарифов дало мощный толчок развитию устройств для сжигания и обращения с биотопливами, это драйвер для оборудования, нашедшего применение и в других отраслях промышленности:

- рубильные машины и шредеры (измельчают даже металл);
- прессфильтры, декантеры и сушилки, в том числе ударного действия;
- оборудование и комплексы производства из биотоплива брикетов и пеллет – обогороженного биотоплива (кормов и кормовых добавок);
- оборудование и комплексы производства жидкого и/или газообразного топлива из отходов – биогаза и биодизеля, в том числе авиационного;
- фуры огромных размеров для перевозки, в том числе с подвижным дном, которые могут дозировать и механизировать выгрузку;
- склады активного типа «живое дно» или с верхней выгрузкой.

Финская фирма Альстрем в 1979 году создала наиболее важную в современной теплоэнергетике, принципиально новую [13] технологию и технику ЦКС марки «Pyroflou» с управляемым теплосъёмом из топки, который, как это было выявлено в п. 1.3, необходим для сжигания КДО. Причем технология «Pyroflou» применялась сначала именно для сжигания древесных отходов. На сегодня энергетические котлы с топками КС и ЦКС [10, 13], введенные на существующих и новых электростанциях – это основная технология утилизации в промышленных объёмах КДО и растительных отходов при совместном их экологически чистом сжигании с углем.

1.5 Особенности и практика организации сжигания биомассы

Биомасса большей частью представлена древесным топливом, её особенностью является то, что она влажная. В соответствии с теорией О. Кришера [14] пористую структуру можно представить как набор тонких и больших капилляров с диаметрами d_1 и d_2 , причём мелкие капилляры покрывают почти всю поверхность частиц, а крупные (Рисунок 1.10) содержат основную массу влаги.

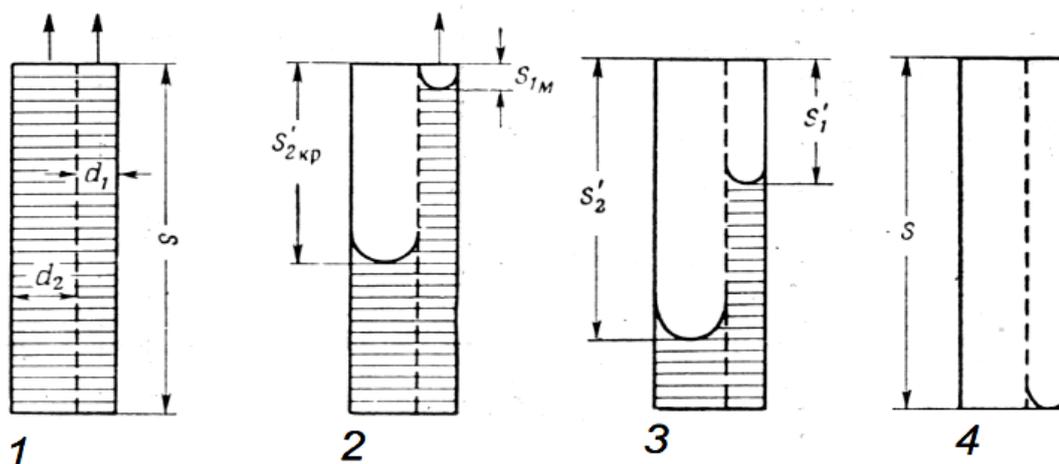


Рисунок 1.10 – Стадии процесса сушки по О.Кришнеру [14], пояснения в тексте

Процесс сушки разделяют [14] на несколько стадий. В короткий начальный период удаляется поверхностная влага, и далее на стадии 1 сушка идёт через мениск мелких капилляров, при этом температура частицы соответствует температуре t_m мокрого термометра (характеристика омывающего потока). Стадия 1 продолжается с углублением мениска крупных капилляров внутрь тела, то есть приповерхностные слои высыхают, но их температура продолжает оставаться на уровне t_m , вплоть до критического положения мениска $s'_{2кр}$ в крупных капиллярах, стадия 2, когда мелкие капилляры уже не могут подводить влагу к поверхности и углубляются на $s'_{1м}$. На стадии 3 начинает испаряться влага с погружением мениска, как в крупных, так и в мелких капиллярах до полного высыхания тела, стадии 4, $s'_2 = s'_1 = s$. Таким образом, длительная стадия 1 сушки исходных частиц с потерей примерно половины исходной влажности протекает при температуре t_m мокрого термометра, заведомо более низкой чем $100\text{ }^\circ\text{C}$. И только на стадии 3 частицы могут быстро разогреваться с в последующим выходом летучих и воспламенением. Требуется длительное время подготовки, прогрева и сушки влажного топлива, соответственно, в топочном устройстве накапливается большая масса топлива, и это наибольшая проблема, которая возникает при организации сжигания влажных биотоплив.

Далее частицы биотоплива быстро разлагаются с выделением летучих, теряя до 80-90% горючей массы, и наступает наиболее длительная фаза – фаза догорания

коксового остатка, углерода. Углерод даёт наиболее высокую температуру горения. Возникает вторая проблема, как удержать и безопасно дожечь горящие с высокой температурой частицы кокса, которые легко могут прожечь колосники. Сухие опилки, стружка и лужга загораются быстро, но коксозольный остаток также даёт высокотемпературное горение с расплавлением и возгонкой золы.

Типовые слоевые и пылеугольные котлы как в малой, так в промышленной энергетике из-за специфики свойств биотоплив непригодны для сжигания КДО. С другой стороны, в России также производятся котлы [11], сжигающие древесные отходы и КДО с поддержанием горения за счёт подогрева дутья, сжигания качественного стабилизирующего топлива и колосников двухстороннего воспламенения (Рисунки 1.11 – 1.13). БиКЗ серийно [15] производит многотопливные котлы КЕ–МТ и ДКВр-ПМ паропроизводительностью 2,5, 4,0, 6,5, 10 и 25т/час на основе топок Померанцева, резервное и дополнительное топливо газ, мазут или уголь, но по современным требованиям их работа неэффективна.

Кучевая топка (Рисунок 1.11) с большим объёмом сохнущего биотоплива имеет нижнюю загрузку топлива шнеком 1 на конусный колосник 3 и подачу под него первичного дутья 2, вторичное дутьё вводится тангенциальными соплами 4 и создаёт вихрь. Зола выгружается по периферии колосника. Топка цилиндрическая, утепленная, выполнена обмуровкой 5, имеет выход сверху в котел через пережим с соплами дожигающего дутья.

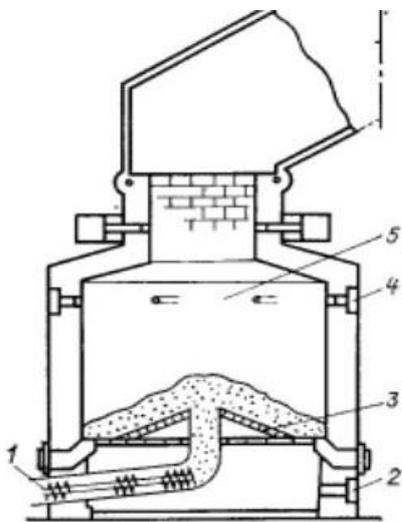


Рисунок 1.11 – Кучевая топка

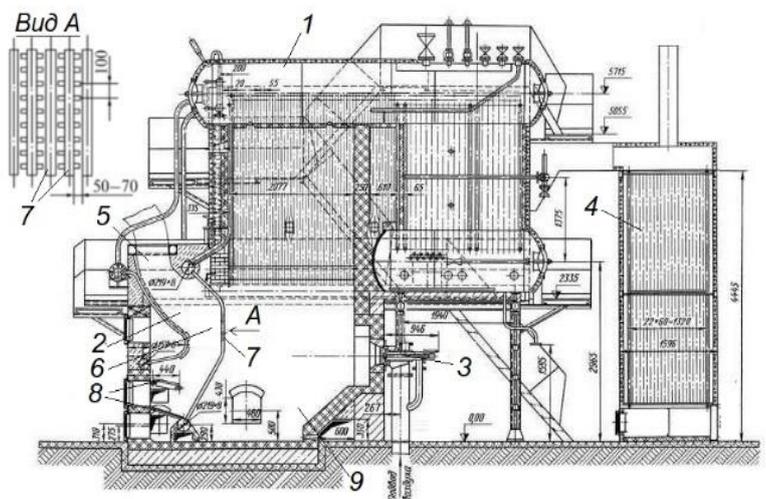


Рисунок 1.12 – Котёл КЕ-6,5-14МТ

Многотопливный 1 котел КЕ-6,5-14МТ содержит [15] топку скоростного горения 2 с колосниками 8, имеет две горелки 3 марки ГМГ-4М (газ/мазут) и воздухоподогреватель 4. Топка выделена зажимающим экраном 7. Топливо самотеком поступает по каналу 2, газифицируется и горит в слое 6 за счет потока воздуха, который продувается через слой. Выделяющиеся газы и унос проходят через зазоры экрана 7, вид А, и догорают в топочном объеме 9 во вторичном дутье.

Перемещение топлива в зажатом слое осуществляется путем заполнения прогоревших зон за счет силы тяжести, что приводит к пульсациям давления в топочной камере и плавающей мощности. Возможны повисания топлива, приводящие к прогарам и возможному затягиванию пламени в топливную шахту над топкой. Вынесенная из слоя через трубную решетку парусные частицы плохо догорают в топочном объеме, вызывая пожары в газоходах и воздухоподогревателях. Для надежной работы топкам необходим стабильный фракционный состав (предварительная сортировка КДО) [16]. Котлы с кучевыми и топками скоростного горения непригодны для сжигания лузги, имеют высокую компоновку и влекут повышенные затраты на строительство котельной.

Колосник двухстороннего воспламенения имеет тонкую горящую прослойку на колоснике, зола осыпается с обратной стороны слоя (Рисунок 1.13). Фильтрация первичного воздуха и продуктов горения через слой обеспечивает быстрый прогрев, сушку и зажигание свежего слоя. Это важно для сырых биотоплив, но для сухой лузги это приведет к зашлаковыванию слоя, хотя, по опыту, гречневая лузга может сжигаться на обычном наклонном колоснике с верхним горением.



Рисунок 1.13 – Колосник двухстороннего воспламенения

В связи с развитием зеленой энергетики в Финляндии, ЕС, США и других странах появились новые типы котлов и топочных устройств, которые сейчас используются и у нас. Производство топков с горизонтальными и наклонными переталкивающими колосниками - НПП, других

аналогов и вспомогательного оборудования было освоено и в России. Отечественные предприятия, имеющие значительный выход биотоплив, в том числе, используя эту базу оборудования, могут комплектовать котельные и требуемую инфраструктуру на высоком уровне механизации и автоматизации, комплексно решать вопросы не только сжигания, но и заготовки и подготовки разных видов биотоплив, а также обращения с их золой.

Топки НПР [17] обеспечивают быстрые зажигание и горение, а также разрушают спеки шлака за счёт механического перемешивания перемещаемого слоя, при этом температурный режим топочного процесса может определяться направлением движения продуктов сгорания над слоем, расположением выхода из камеры сгорания (Рисунок 1.14) слева направо: противоток (для влажных отходов), прямоток (для сухих) и перекрестный ток.

В последнее время широко исследуется и анализируется зарубежный опыт [18-20] сжигания биомассы в энергетических котлах с топками КС или ЦКС совместно с углем. Большое внимание уделяется построению методик расчета котлов с топками КС или ЦКС [20-23], использующих новые принципы сжигания.

Испытания на ТЭЦ Селенгинского целлюлозно-картонного комбината [18] в ноябре-феврале 2019-2020 гг. китайского биотопливного КС котла WFG-75, работающего с естественной циркуляцией на уравновешенной тяге, при осмотре отработанного шлака показали наличие в нём спекшихся стекловидных окатышей (Рисунок 1.15) указывающих на высокий риск шлакования топки КС. Материалом КС являлся кварцевый песок с содержанием $\text{Na}_2\text{O} \leq 1,0-2,0 \%$ и $\text{K}_2\text{O} \leq 2,0-3,0 \%$ мельче 3 мм, со средним размером частиц $\leq 0,8$ мм, и он в количестве 30 т был заменен свежим. Подобные существенные проблемы сжигания КДО в топках КС отмечались в [24-26] и в других исследованиях. На сегодня в Финляндии и ЕС они успешно решены переходом на совместное сжигание КДО с углем в котлах ЦКС за счёт удаления склонной к спеканию древесной золы с более мощным потоком золы угля.



Рисунок 1.14 – Три схемы движения продуктов сгорания и слоя топлива, слева направо: противоток, прямоток и перекрестная [13]



Рисунок 1.15 – Спекшийся песок

1.6 Сжигания биомассы в пылеугольных котлах

По опыту [24-26] сжигание КДО совместно с пылеугольным возможно и в типовых энергетических котлах. Применение топок «НТВ - «Торнадо» с V-образными горелками и дожигающей решеткой, выполненное реконструкцией энергетического котла согласно патентам [27, 28] по проекту выполненному «Про-ЭнергоМаш-Проект» № 253-010/10.000 «Перевод котлоагрегата БКЗ-75-440ФБ ст.№9 участка ТИиТС Падунского района ТЭЦ-6 на совместное сжигание угля и измельченных кородревесных отходов» показало высокую эффективность совместного сжигания КДО и угля».

При проведенных сотрудниками СибВТИ испытаниях [29] был выявлен ряд положительных сторон, как в новой схеме «НТВ - «Торнадо» сжигания угля, так и в замене части угля на КДО. Во всех режимах работы котла наблюдалась вихревая аэродинамика и устойчивое горение угля и угля с КДО. Дожигающая решетка (Рисунок 1.16) резко уменьшает мехнедожог в провале и позволяет сжигать КДО в виде



Рисунок 1.16 – Догорание провала на водоохлаждаемой дожигающей решетке

крупной щепы, $q_4 \leq 0,3\%$, причём потери тепла составили незначительную величину, $q_4 \leq 0,4\%$, и при пылеугольном сжигании (Рисунок 1.17).

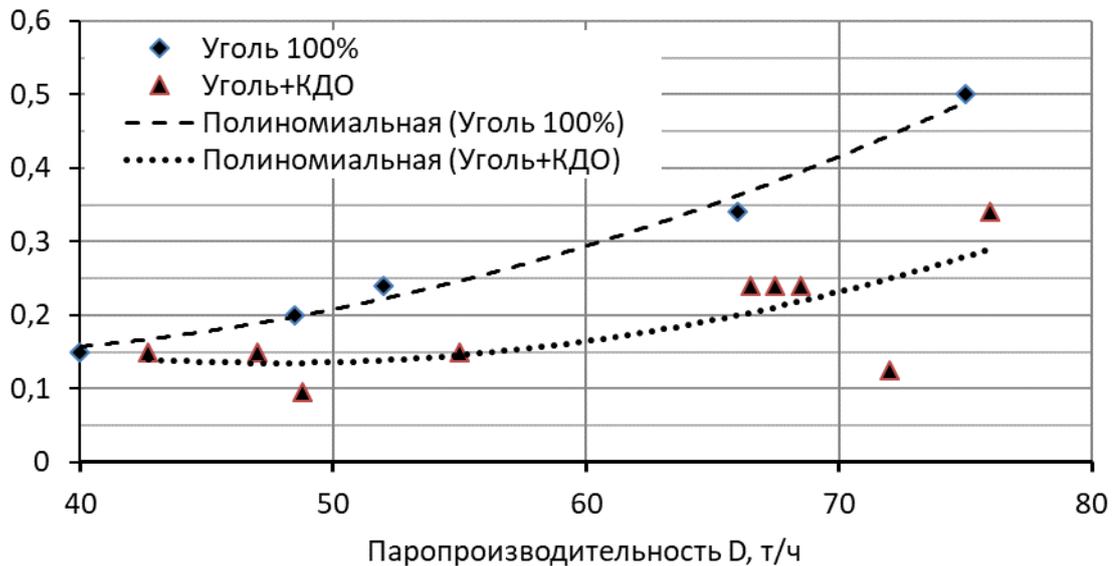


Рисунок 1.17 – Снижение мехнедожога q_4 с провалом

Тепловая эффективность экранов и конвективных поверхностей во всех опытах была выше проектной, все поверхности нагрева котла чистые, работают более эффективно, КПД котла превысил 92%, паспортную величину. Добавление КДО увеличивает КПД котла (Рисунок 1.18) и снижает эмиссию NO_x , особенно при приближении нагрузки котла к номинальной (Рисунок 1.19) [29].

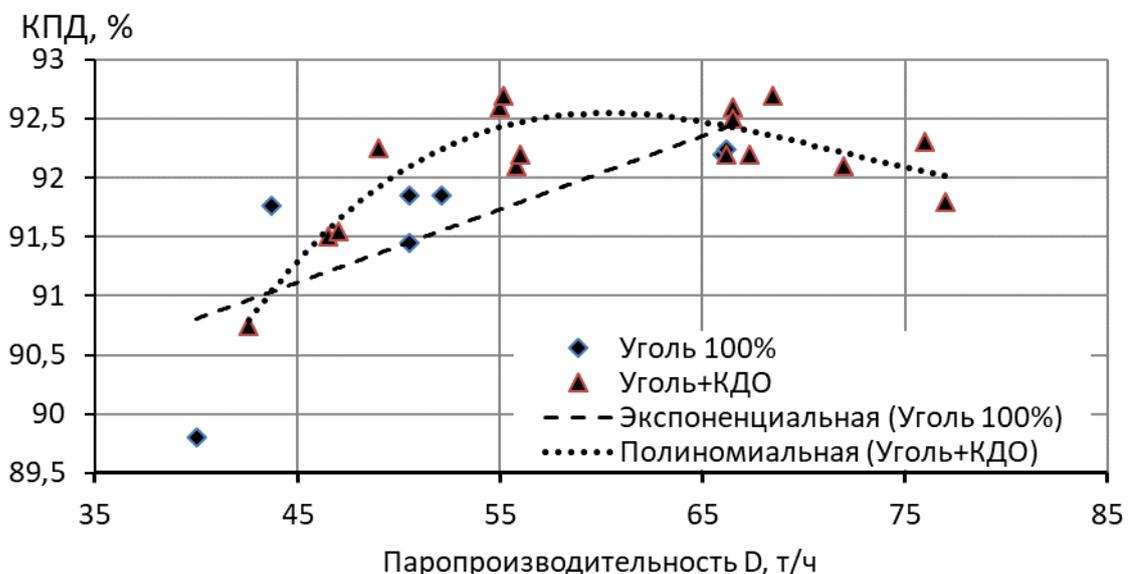


Рисунок 1.18 – КПД котла при разных нагрузках котла и различной доле КДО

По диаграмме на рисунке 1.19 наглядно видна возможность значительного снижения выбросов оксидов азота пылеугольными котлами с камерным сжиганием за счет добавления к углю доли биомассы.

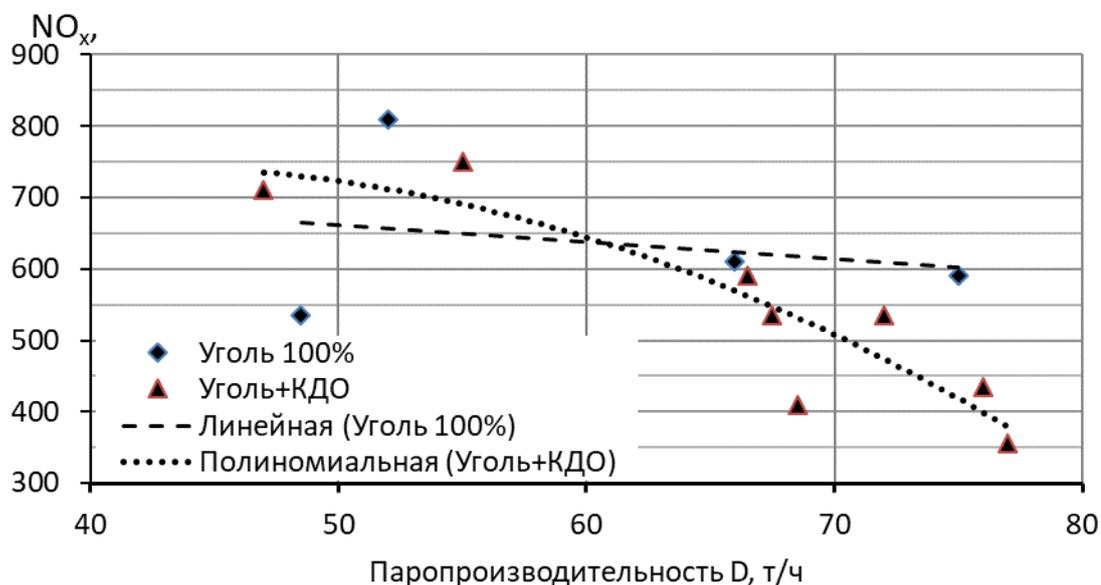


Рисунок 1.19 – Снижение эмиссии NO_x при различной доле КДО с ростом нагрузки

На рисунке 1.20 представлена схема организации подготовки и подачи КДО на сжигание в котёл. Схема включает входящий контроль и приём КДО с сортировкой по качеству, с выгрузкой из автомобилей и вагонов для текущего хранения. Далее идет загрузка фронтальным погрузчиком ФП32, отделение металла электромагнитом ЭЖ24, отсортировка крупных включений на дисковом сите ДС25 с загрузкой в бункер БП6. Длинномер, крупные включения типа горбыля, включая отсортированные, измельчаются в рубильных машинах РМ26 и РМ31. Подготовленные опилки и мелкая щепа шнеками ШП7-ШП9 дозируются в эжекторы Э10, в режиме пневмотранспорта подаются пылевыми вентиляторами ПВ2 в смеси с горячим воздухом и дымовыми газами, с одновременной сушкой непосредственно в котёл через прямоточные фау-горелки Г17 и Г18 на сжигание в топку котла или в силосы А и Б для последующего сжигания.

Для обслуживания механизмов есть гидросистема ГС15, часть КДО может загружаться с углем через угольные мельницы.

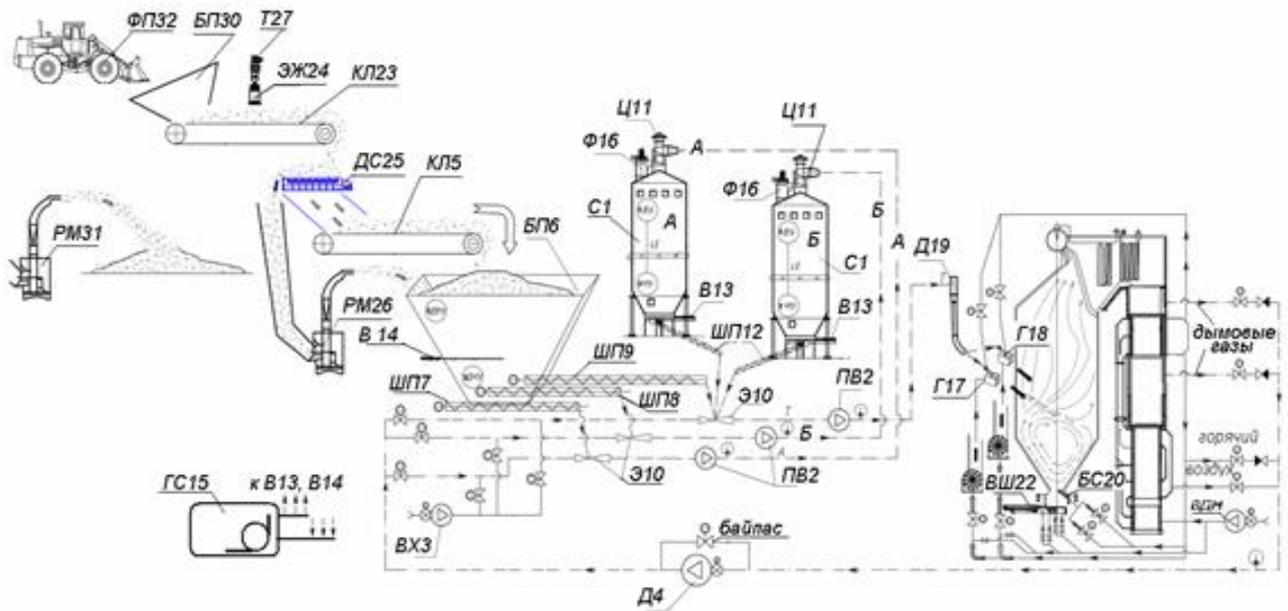


Рисунок 1.20 – Организация сжигания КДО и угля по схеме «НТВ - «Торнадо»

Из рассмотрения видно, что переход на котлы ЦКС и КС или на НТВ сжигание со сложной схемой обращения типа данной на рисунке 1.20 для утилизации КДО в промышленных масштабах, которые на сегодня требуются для решения проблем их утилизации, может быть освоен только на достаточно мощных предприятиях, таких как территориальные генерирующие компании – ТГК. Они имеют возможность стабильного потребления биотоплива и сбыта произведенной энергии. С другой стороны, целевые дотации по зеленому тарифу могут обоснованно распределяться ТГК по конкретным компаниям, поставщикам и заготовителям КДО и не будут распылены по кругу недобросовестных исполнителей. Дотации также поддержат стабильность тарифов ТГК для населения за счёт расширяющегося ресурсосберегающего вовлечения отходов, с устранением загрязнений, причём как от отходов, так и от эмиссии вредных выбросов, в том числе NO_x и SO_2 .

Опыт по сжиганию лузги в пылеугольных котлах Кумертауской ТЭЦ 3, исследованный специалистами ВТИ, [30] показал возможность успешного сжигания добавочного к энергетическому биотоплива в доле до 20%. Доля лузги в смеси твердого топлива ограничена из-за загрязнения поверхностей нагрева, необходимости поддержания параметров перегретого пара и стабильной максимальной и

минимальной нагрузки котла. С увеличением доли лузги в смеси топлив КПД котлов повышается (для номинального режима работы котла с 87,87% при одном открытом дозаторе до 89,49% при четырех открытых дозаторах) [30].

1.7 Зарубежный опыт и котлы для сжигания биомассы

В зарубежной практике используются более разнообразные топочные устройства, получившие особенно сильное развитие после введения зелёных тарифов. Развитие было направлено на механизацию и автоматизацию всех процессов, появились автоматизированные комплексы, включающие склад топлива с автоматической загрузкой и управлением топочным процессом при удаленном контроле. Топочные устройства приобрели различные улучшения и модификации.

Например, кучевые топки (Рисунок 1.11) оснащаются механизированными колосниками, обмуровка тонкая, с охлаждаемой воздушной полостью и ярусами тангенциальных сопел вторичного дутья и развиваются по меньшей мере в двух направлениях (Рисунки 1.21 и 1.22). В топке «Биогрейт» нижняя подача топлива и вращающиеся кольцевые колосники [17] с секционированной подачей первичного дутья. Центральная зона используется для сушки, вывод золы - по периферии.

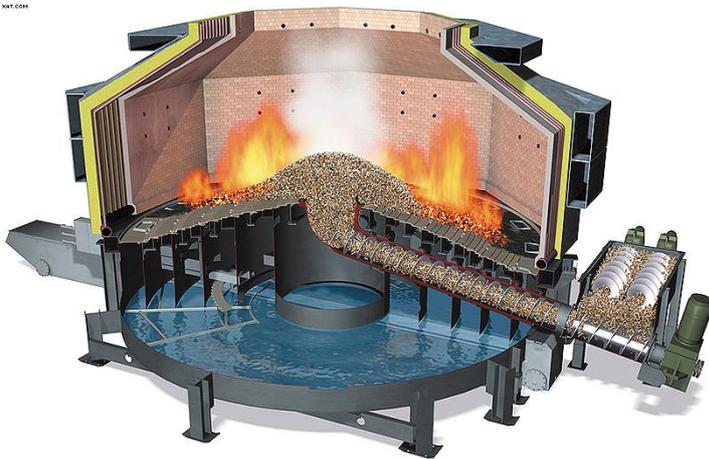


Рисунок 1.21 – Топка «Биогрейт»

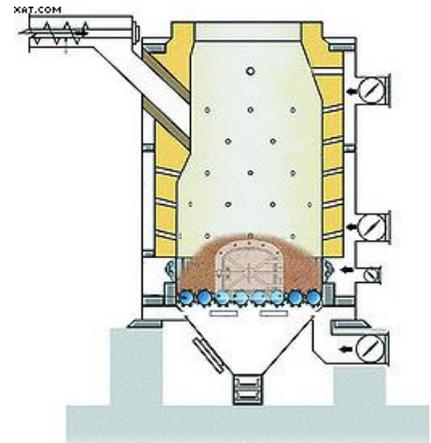


Рисунок 1.22 – Топка «Веллонс»,
США

В топке «Веллонс» [17] применен более простой способ верхней подачи топлива, непосредственно на кучу. Колосники выполнены в виде вращающихся охлаждаемых водой валов, которые обеспечивают измельчение, равномерную выгрузку

очаговых остатков и противоточную схему движения слоя и первичного дутья, подходящую для топлив с высокой влажностью. Топки имеют 6 типоразмеров, внизу по периметру опоясаны кольцевыми трубами водяного охлаждения. Под котлом большой мощности могут попарно устанавливаться несколько, 4-8, топочных ячеек. Это обеспечивает хороший режим, большую глубину регулирования и эксплуатационную надежность при простоте управления.

Наибольшее распространение для сжигания КДО получили жаротрубные котлы с НПР топками, например (Рисунки 1.23 и 1.24) Polytechnik (Австрия) и Vynske (Бельгия) [17]. Влияние влаги в котлах «Политехник» компенсируется за счёт мощной тяжелой обмуровки с многоходовыми каналами для прохода газов между сводами, соответственно, это тяжелые котлы огромных размеров.



Рисунок 1.23 – Котёл
«Политехник»



Рисунок 1.24 – Котёл «Винке» США

Из других зарубежных широко известны гибридные котлы «Hurst Boiler» с разнообразными топочными устройствами, но типично низ топки в них не охлаждается, и поэтому они шлакуются и непригодны для сжигания лузги.

В целом, котлы и топки «Биограйт», «Веллонс», «Политехник» «Харст Бойлер» и другие рассчитаны на сжигание сырых биотоплив. Из-за отсутствия охлаждения при работе на сухом топливе: древесном, лузге, других типах сухих топлив

и особенно на лузге подсолнечника зашлаковываются или выгорают и непригодны для их сжигания.

Более эффективными являются котлы и топки НПП «Винке». Собственно котлы могут выполняться, в том числе, гибридной конструкции, с водотрубным экранированием топки и жаротрубным конвективным газоходом. При этом за топкой котел имеет пустой газоход, на рисунке 1.24 их два. В дополнительном фронтальном газоходе установлена газомазутная горелка, которая служит для растопки котла и поддержания нагрузки на КДО с высокой влажностью. Пустой газоход легко очищается от спёков шлака, позволяет глубоко охладить дымовые газы без образования прочных и связанных отложений при охлаждении в конвективном газоходе, этим обеспечивается длительная безостановочная работа котла.

Топка НПП «Винке» (Рисунок 1.25) также имеет оригинальную конструкцию, выполнена из колосников, собранных в группы. Группы состоят из трёх пар неподвижных, охлаждаемых водой и движущихся колосников, имеют двухсторонний гидравлический привод, и каждая группа колосников может работать независимо, обеспечивая надлежащее перемешивание и перемещение слоя. Собственно топки НПП «Винке» могут выполняться в различных вариантах, в том числе сдвоенными для котлов большой мощности (Рисунок 1.25 *а*). Из всех известных слоевых котлов, именно котлы «Винке» наиболее пригодны для сжигания лузги.

Технология пустого газохода применяется для сильно шлакующих топлив. В СССР она использовалась при сжигании [31] прибалтийских сланцев, на вертикальных экранах топки и пустого газохода отложения золы удерживаются слабо и легко сбиваются. Отечественным аналогом «Винке» являются паровые котлы производительностью 10, 12, 16 и 25 т/час, пригодные для сжигания лузги, с чугунными топками НПП и пустым газоходом, производимые АО «Завод котельного оборудования» (АО ЗКО) (Рисунок 1.26). Котлы отличаются значительными массогабаритными характеристиками, например, котел Е-10-1,4 (10 т/час, насыщенный пар с давлением 1,4 МПа) имеет габариты 15,0×9,0×15,0 (Д×Ш×В) и вес 68 т, с завышенными требованиями к строительной части котельной и инвестициям [32].

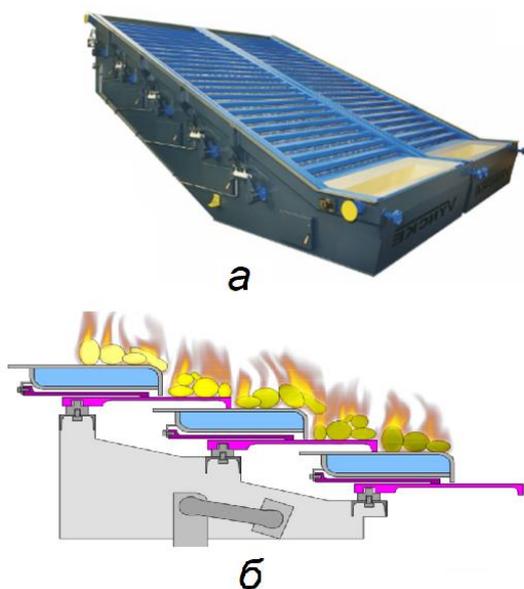


Рисунок 1.25 – Топка НПР «Винке»: *а* – вид; *б* – охлаждаемый колосник

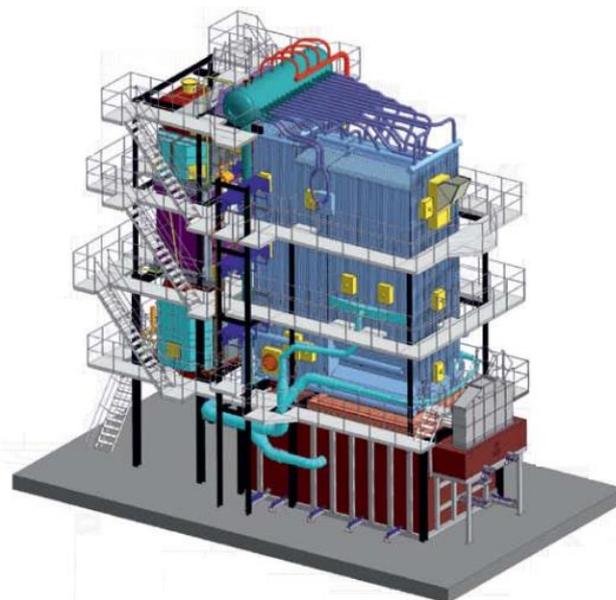


Рисунок 1.26 – Котел АО ЗКО с пустым газоходом и топкой НПР

Другой тип – упомянутые котлы с топками КС нашли применение для сжигания КДО и в России. Например, к котлам БКЗ-75, КМ-75 компанией ООО «ИНЭКО» устанавливались предтопки КС. Попадание частиц топлива в бурлящую раскалённую массу частиц КС обеспечивает быстрый контактный разогрев и воспламенение частиц топлива без длительного прогрева. Тепловая инерция большой массы КС, около $300-800 \text{ кг/м}^2$, обеспечивает стабильность работы топки КС вплоть до возможности её останова на несколько часов в «горячий резерв».

Котлы с топками ЦКС являются вторым поколением и широко применяются для сжигания КДО совместно с дроблённым углем, что весьма неудобно, но позволяет решить проблему [18] образования спёков древесной золы в КС. На сегодня наиболее эффективной является разработка фирмы «Фостер - Уиллер» - котел ЦКС «Компакт» с пустым газоходом и защитой пароперегревателя от заноса золой и хлорной коррозии. Котел сжигает содержащие хлор RDF и КДО с влажностью до 60%, измельченную выброшенную древесину и другие отходы в различных композициях на ТЭЦ Игельста. ТЭЦ работает в режиме комбинированной выработки тепла и электроэнергии, отпускает 73 МВт электроэнергии и около 200 МВт тепла [21-23, 33,34].

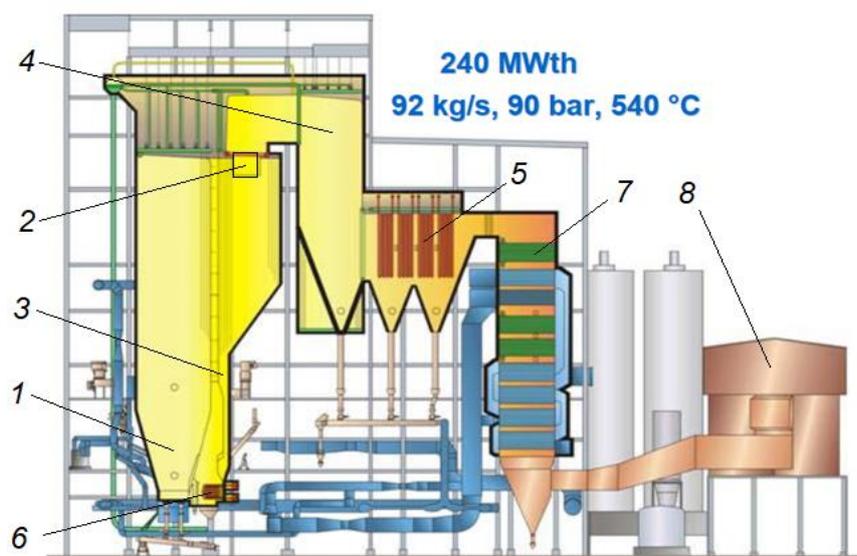


Рисунок 1.27 – Котёл ЦКС «Компакт» ТЭЦ Игельста

Котел (Рисунок 1.27) имеет топку 1 с ЦКС, встроенные циклоны 2 и опускные стояки 3, которые образуют контур циркуляции раскаленных частиц ЦКС. Далее за циклонами 2 расположен пустой газоход 4, оснащенный водяными пушками и переходящий в горизонтальный газоход 5 с пароперегревателем первой ступени и паровой обдувкой. Выходная ступень пароперегревателя размещена в вынесенном теплообменнике 6 КС и этим защищена от хлорной коррозии. Далее в газоходе 4 дымовые газы охлаждаются до температуры 700°C , после пароперегревателя они доохлаждаются в конвективном газоходе 7 и затем поступают в утилизатор тепла 8, где глубоко охлаждаются обратной сетевой водой и увлажняемым воздухом горения с конденсацией из них влаги.

Используя смесь отходов, котел с ЦКС в принципе работает как на одном типе топлива с зольностью $2...3,6\%$ и влажностью $35-50\%$, причем без подачи угля. При этом на влажном топливе КПД котла по низшей теплоте сгорания может достигать 110% , а по высшей $97,5\%$. Котлы ЦКС могут с высокой эффективностью сжигать в составе смеси топлив и лузгу [35-39].

1.8 Лузга – отход и биотопливо

Производство основных видов круп, таких как овес, гречневая и рисовая, а также подсолнечного масла, как правило, располагается в крупных поселениях и городах. При этом образуется большое количество горючих отходов, преимущественно в виде шелухи или лузги, которые формируются из оболочки, закрывающей семена, и представлены легкими парусными чешуйками. Выход лузги не более

15-20% от массы зерна, но и из-за низкой насыпной плотности, 100-150кг/м³, её объём представляет серьёзную проблему для организации производства.

Согласно данным федерального классификационного каталога отходов [40] отходы в виде лузги и зола от ее утилизации отнесены к 5 и 4 классу соответственно:

- лузга подсолнечная – V (5) класс опасности (практически неопасные), к этому же классу отнесена и лузга зерновых культур;
- зола от сжигания лузги подсолнечной – IV (4) класс опасности (малоопасные).

Исторически родиной подсолнечника считается юг Северной Америки, где он был одомашнен приблизительно 4 - 5 тыс. лет назад. Местные народы использовали семена и масло в пищу. В 1510 году подсолнечник был вывезен в Испанию и быстро распространился как декоративное и лекарственное растение, а в петровское время добрался и до России.

Начиная с 1830 года крестьяне из Алексеевки Воронежской губернии стали выращивать и перерабатывать подсолнечник и уже в 1841 году на экспорт было отправлено более 2000 пудов подсолнечного масла, а общий объём производства к середине 1840-х достиг около 500 т. Культура подсолнечника быстро распространилась на соседние уезды и Саратовскую губернию. К середине 1860-х гг. только Воронежская губерния производила в год до 15 тыс. т., а в 1913 году в России было выработано 180 тыс. т. масла.

Были выведены устойчивые к ржавчине и насекомым сорта, и производство резко пошло вверх. Так в 1912 году В. С. Пустовойт организовал опытно-селекционное поле, превращённое во ВНИИ масличных культур в 1932 году. Другие селекционные центры появились в Саратове и Харькове. Были выведены такие популярные в середине XX века сорта подсолнечника, как «Передовик», «ВНИИМК 8931», «Ждановский 8281» и другие. Благодаря разработкам селекционеров содержание масла в семенах повысили с 28-33% до 42-46%, сократились сроки созревания семян и повысилась сопротивляемость подсолнечника болезням [42], поэтому

и до сих пор основное производство, более 50% подсолнечного масла, располагается на территории СССР. Более того, сбор урожая подсолнечника в России значительно влияет на мировой рынок масла, так как её доля более 25%. В условиях увеличения мирового спроса с 2009 по 2018 год валовой сбор увеличился в 2,4 раза, а посевная площадь возросла с 6,2 млн. га до 7,6 млн. га, в 2020 г. в России было засеяно подсолнечником [41] около 8,55 млн. га.

Данные Росстата по сельхозпродукции [41], приведенные в таблице 1.2 и на рисунке 1.28 позволяют оценить выход отходов в России. Видно, что больше других лузги подсолнечника. Подсолнечное масло занимает четвертое место в мире вслед за пальмовым, соевым и рапсовым, с растущей долей России, более четверти.

На маслоэкстракционных заводах (МЭЗ) очистка семян от сора, обрушивание и отделение ядра от лузги происходит в рушально-веечном отделении. Далее переработка семян включает их подогрев и тепловую обработку со значительным потреблением тепла на технологию, отопление и др. Ориентировочно из 1 куб.м. семян массой 300-400 кг выделяется около 0,5-0,65 м³ лузги. Например, на Урюпинском МЭЗ после его модернизации [43] к 2025 году будет достигнута производительность до 1600 т/сутки по переработке семян подсолнечника. При этом выход лузги составит огромную величину, около 2500 м³/сутки, и в варианте вывоза этих отходов потребуются значительное количество рейсов автотранспорта, не считая проблем организации собственно утилизации лузги.

Подобная технология переработки семян с отделением их от оболочки применяется и при переработке гречихи, овса, риса, проса и др. В итоге в больших поселениях на крупяных и маслозаводах при переработке семян образуются круп-

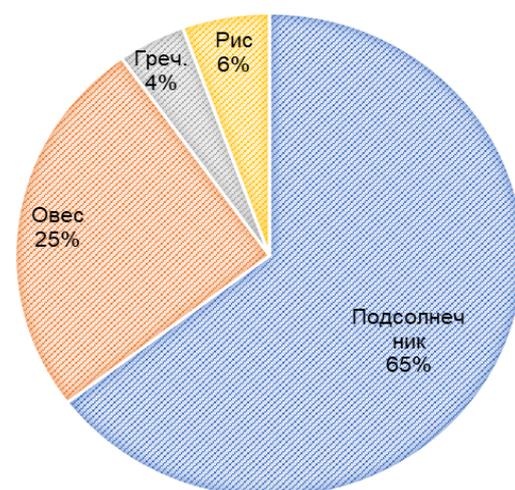


Рисунок 1.28 – Доли наиболее распространенных видов лузги в валовом выходе

нотоннажные потоки горючих отходов с огромными объемами, и есть значительная потребность в тепле и технологическом паре. Соответственно, возникает идея сжигать в котлах с получением энергии лузгу, как сухое, чистое, без примесей высококачественное биотопливо с малой зольностью.

Таблица 1.2 – Валовой сбор продуктов растениеводства и реализация масла в России, млн. тонн [41]

Продукт \ год	2018	2019	2020	2021	2022
Семена подсолнечника	12,8	15,4	13,3	15,7	16,4
Овес	4,7	4,4	4,2	3,8	4,5
Гречиха	0,932	0,786	0,892	0,919	1,222
Рис	1,038	1,099	1,142	1,076	0,92
Масло подсолнечное нерафинированное	4,643	5,418	6,024	5,249	6,095
Ориентировочный выход лузги подсолнечника (20%)	2,56	3,08	2,66	3,14	3,28
Ориентировочный выход лузги овса (25%)	1,175	1,1	1,05	0,95	1,125
Ориентировочный выход лузги гречихи (20%)	0,186	0,157	0,178	0,1838	0,2444
Ориентировочный выход лузги риса (20%)	0,208	0,220	0,228	0,2152	0,184
Общий выход лузги	4,176	4,596	4,161	4,489	4,8334

Общий годовой тепловой потенциал лузги в России, оцененный согласно таблице 1.2, составляет примерно 18 млн.Гкал или 75,5 млн.ГДж. В пересчёте это соответствует экономии около 2 миллиардов кубометров природного газа или в размере 15,2 миллиард. руб. при его отпускной цене 7,61 руб./м³.

Итак, лузгу можно охарактеризовать как особое, качественное, возобновляемое CO₂ нейтральное биотопливо, сухое, малозольное, с высокой калорийностью. Лузга составлена из однородных частиц, не засорённых включениями и проста в обращении. Имеющаяся в больших количествах в распоряжении у потребителей

энергии, МЭЗ, крупяных заводов и в поселениях лузга бесплатна, при её утилизации исчезают проблемы и затраты, связанные с содержанием автопарка со штатом водителей, нужным для организации вывоза и обращения с лузгой на свалках.

1.9 Проблемы утилизации лузги

С другой стороны, при всех достоинствах лузги как биотоплива, практика её использования, особенно лузги подсолнечника, выявила серьёзные проблемы и трудности. Типовые котлы крупяных и маслоэкстракционных заводов, рассчитанные на слоевое сжигание угля или древесных отходов, оказались непригодны, было невозможно поднять на длительный период нагрузку котлов выше 30-40% от расчетной.

При малой зольности лузги, 2...3%, в котлах интенсивно формируются отложения золы, иногда за одну смену (Рисунок 1.29) забивая межтрубные зазоры для прохода газов в котельных пучках, а ручная очистка (Рисунок 1.30) требует длительного останова котла. В итоге пришлось возвращать котлы на расчетное энергетическое топливо, а лузгу выбрасывать на свалку.



Рисунок 1.29 – Быстрое зарастание котельного пучка отложениями золы

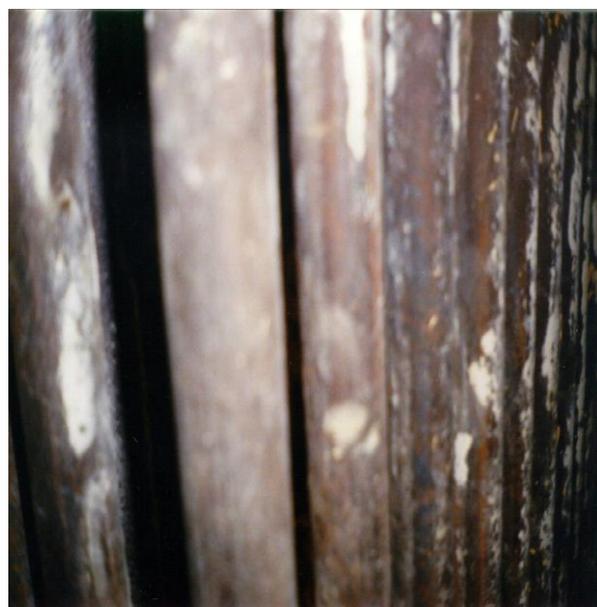


Рисунок 1.30 – Очищенный от отложений золы котельный пучок [44]

Исторически вопрос в необходимости разработки специализированных котлов и топок возник в связи с утилизацией лузги подсолнечника после пуска Урюпинского МЭЗ [44], одного из наиболее крупных. В г. Урюпинске отвозимая на свалки лузга горела с периодическим задымлением города, свалки быстро разрастались, так как автомобили из-за пожароопасности, особенно в ветреную погоду, не могут подъезжать близко к горящим кучам. Возникающие народные митинги в дни плохой метеорологической обстановки и другие проблемы, мешающие работе МЭЗ, могли быть разрешены только за счёт огневой утилизации лузги.

Обследования котлов и их подробный анализ выявил ряд проблем при организации сжигания лузги в имеющихся слоевых котлах:

- Трудно организовать устойчивое слоевое сжигания лузги, легкие частицы улетают из слоя, не выгорая, в слое кратерное горение, над слоем топка холодная.
- Недогоревший унос оседает в газоходах, золоуловителях и дымовой трубе – в них часто возникают пожары, возникает коробление и выгорание стенок.
- При малой зольности лузги, до 2-3% в котлах на номинальной нагрузке из-за интенсивного возгона легкоплавких соединений золы формируются мощные отложения, иногда за одну смену, забивая межтрубные проходы с остановкой котла из-за невозможности удаления дымовых газов дымососом.

Подобные проблемы, но не столь сильные по отложениям золы возникли также с появлением отходов на предприятиях глубокой переработки: древесины (пыль шлифования, опилки и стружка), а также лузги овса, риса, гречихи и других. Они состоят из легковыносимых парусных частиц с низкой насыпной плотностью 80-150 кг/м³, из-за большого объёма отходов их перевозка, складирование (гречневая лузга в кучах может сохраняться до 90 лет) и утилизация усложнены.

Котлы ранних конструкций XX века в целях ремонтпригодности и удобства монтажа характеризовались тяжелой обмуровкой, просторными ходами для газов в увеличенным сортаментом трубного проката. Так, за счет просторного коридорного пучка котел Killer паропроизводительностью 6,5 тонн с факельно-слоевым

сжиганием показал приемлемую работоспособность на подсолнечной лузге в Лабинском МЭЗ [44]. Трудоемкость его очистки значительно снижена за счет удобства и простора в газоходах котла.

Попытки сжигания лузги в распространенных слоевых двухбарабанных котлах, производимых для промышленной теплоэнергетики БиКЗ и другими котельными заводами, показали их непригодность для таких отходов ввиду снижения паропроизводительности в 2-3 раза от номинальной [44]. Парадокс: свалки горят, не потушить, а в котлах лузгу сжечь не получается.

Установка современных разрекламированных иностранных котлов, предназначенных для работы на влажной биомассе, также не принесла востребованного результата. В топках прогорает обмуровка и колосники (Рисунок 1.31), а жаротрубные горизонтальные котельные пучки забиваются золой. На фото – последствия эксплуатации американского биотопливного котла на подсолнечной лузге.



Рисунок 1.31 – Топка котла Hurst Boiler с НПР, прогар колосников и разрушение обмуровки.

Интенсивная возгонка легкоплавких соединений золы, из которых формируются мощные отложения при последующей конденсации их на холодных поверхностях нагрева, экологически опасна сама по себе [45]. Конденсация возгонов формирует по схеме образования инея, аэрозоль из очень тонких субмикронных частиц, которые вредны для дыхательных систем и здоровья человека и животных,

причем они трудноуловимы и легко переносятся через золоуловители и дымовую трубу на большие расстояния в атмосфере.

С точки зрения процесса сжигания типовые топки со слоевым и факельно-слоевым сжиганием показали неудовлетворительную работу при подаче в топку легких парусных частиц типа лузги. Это обусловлено тем, что в открытой камере сгорания от выноса недогоревшие частицы удерживаются только за счет гравитационной сепарации, а приемлемое по условиям выгорания время пребывания частиц должно обеспечиваться за счет большого топочного объема. При повышенной форсировке дутья значительно возрастает вынос частиц из зоны активного горения – это газообразные продукты горения и механический недожог (Рисунок 1.32) с уносом. Из-за скопления уноса происходят частые возгорания в газоходах, золоуловителях и бункерах, диапазон надежной работы котла сужается.

С другой стороны, в первых же вариантах, разработанных НИЦ ПО БЭМ вихревых топок [16, 44] полнота выжигания горючих компонентов из лузги оказались достаточно высокой. Удержание мелких парусных частиц лузги до их глубокого и практически полного выгорания при всех вариантах организации топочных процессов в вихревых топках обеспечивалось легко. В котлах с ВТ сепарация частиц из вихревого факела происходит перед его выходом в ГОО и она интенсифицируется с ростом нагрузки и расхода дымовых газов.

В целом, по результатам обследований котлов, сжигающих лузгу и сухие мелкие растительные отходы, проведенных специалистами ЦКТИ и НИЦ ПО БЭМ, г. Барнаул, 1997 г. [46] выявлена непригодность существующих котлов и котельно-вспомогательного оборудования для утилизации лузги и



Рисунок 1.32 – Искры уноса в газоходе после экономайзера котла Е-15-1,4 с открытой камерной топкой при сжигании подсолнечной лузги на полной нагрузке

подобных сухих измельченных горючих отходов ввиду кратного снижения производительности, опасности возгорания уноса за котлом и быстрого забивания поверхностей нагрева и проходов для газов золой.

При этом также выявлены:

- экономическая необходимость организации утилизации лужги, образующегося на МЭЗ, ввиду высоких затрат на логистику;
- пожароопасность и экологический ущерб при вывозе ее на свалку;
- необходимость разработки специализированной котельно-топочной техники.

Сделан вывод, что основным мероприятием по снижению отложений золы является переход к низкотемпературному сжиганию, так как этим обеспечивается снижение сублимации (возгонки) золовых компонентов топлива, особенно щелочных металлов [44].

1.10 Затраты на останов котла для очистки

Касаясь вопросов эксплуатации, укажем, что наибольшим недостатком в работе котла в условиях сильного золового загрязнения является необходимость его вынужденного останова для очистки. При этом перед остановкой котёл может нести лишь пониженную нагрузку. Из-за золового загрязнения и плохого тепловосприятия все показатели котла уходят в минимум, котел, ТДМ и другие механизмы работают неэффективно, на пределе возможного, а процедура очистки требует длительного расхолаживания котла, 1-2-е суток.

Особенно длительное, 2-4 суток, охлаждение требуется для котлов с неохлаждаемыми ВТ, выполненными из тяжелой обмуровки. Кроме того, каждый цикл термического нагружения обмуровки сокращает срок ее службы.

Сам останов котла (и его последующий запуск) требуют быстрых действий, часто связанных с авариями из-за «человеческого фактора». Процедура останова на расхолаживание котла либо переключения на другой котел или останов также и основного оборудования МЭЗ требуют привлечения дополнительного обслуживающего персонала и его многоплановой напряженной работы. Именно в этой ситу-

ации наиболее часто выходит из строя оборудование. Останов сопровождается длительным расхолаживанием, осмотром, ремонтом и очисткой оборудования с последующим многооперационным запуском и выведением на рабочий режим.

При останове котла должен произойти либо вынужденный останов основного производства, либо перевод паровой нагрузки на резервный котел. Необходимость наличия резервного котла влечет сопутствующие затраты, как на стадии капитальных вложений, так и эксплуатационных. При работе котла на резервном энергетическом топливе, появляются дополнительные расходы на его закупку.

Выполнена оценка затрат, вызванных остановом котла на очистку в годовом выражении. Для упрощения оценка выполнена только по стоимостям вывоза лузги как отхода на полигон и резервного топлива. Оценка не учитывает разницу в стоимости амортизации оборудования, работе персонала, затраты электроэнергии и др.

Годовые затраты можно вычислить по выражению:

$$Z = n_o \cdot T_o \cdot (C_y \cdot B_l + C_{\text{пг}} \cdot B_{\text{пг}}), \quad (1.2)$$

где n_o – количество остановов; T_o – продолжительность останова, часов; C_y – стоимость утилизации лузги, руб./т.; B_l – расход утилизируемой лузги при работе котла, т/ч; $C_{\text{пг}}$ – цена природного газа, руб./м³; $B_{\text{пг}}$ – расход природного газа при работе котла, м³/ч.

Первый вариант расчета выполнен для котельной с двумя котлами паропроизводительностью 20 тонн в час (14 МВт). Один котел на подсолнечной лузге. Второй на природном газе.

Продолжительность рабочей кампании на лузге, суток: 7, 14, 21, 28, 60, 180.

Продолжительность останова для очистки, T_o , ч – 48.

Низшая теплота сгорания подсолнечной лузги Q_i^r – 17,5 МДж/кг.

Насыпная плотности 120 кг/м³

Расход лузги при КПД 90%, B_l – 3200 кг/час (26,67 м³/час).

Стоимость вывоза лузги на полигон включает плату за размещение отходов, логистические расходы и аренду полигона:

Ставка платы при размещении отходов [47]:

V класса опасности перерабатывающей промышленности – 40,1 руб./т (2018 год);

IV класса опасности – 663,2 руб./т (2018 год);
 Коэффициент пересчёта ставки с 2018 на 2024 год – 1,32.

Таким образом ставка платы за размещение лужги (отходов V класса опасности) в 2024 году составляет $40,1 \cdot 1,32 = 52,9$ руб./т. Насыпная плотность лужги 0,12 т/куб.м. Это плата при условии хранения на собственном полигоне, без учета расходов по его содержанию.

При отсутствии собственного полигона необходимо воспользоваться услугами специализированного предприятия (полигона). Цена за захоронение отходов, не относящихся к твердым коммунальным отходам, а также не относящиеся к группе отходов «Отходы строительства и ремонта», по данным АО «ЭКО-Комплекс», г. Барнаул (2023 г.) составляет 182 руб./куб.м. (1516,66 руб./т)

Рассчитана стоимость вывоза лужги на полигон автомашиной «КАМАЗ» зерновоз с прицепом.

Объем кузова+ прицепа – 57 куб.м.

Полная загрузка: $57 \cdot 0,12 = 6,84$ тн.

Стоимость перевозки – 45 руб/км.

Примем расстояние транспортного плеча до полигона 10 км.

Стоимость одного рейса составит $10 \cdot 45 \cdot 2 = 900$ руб.

Стоимость транспортировки на полигон 1 куб.м лужги (1 т):

15,79 руб./куб.м (131,57 руб./т)

Стоимость не огневой утилизации лужги при простое котла:

При вывозе на собственный (бесплатный) полигон:

$$C_y = (131,57 + 52,9) = 184,47 \text{ руб/т}$$

При оплате услуг специализированного полигона:

$$C_y = (131,57 + 1516,66) = 1648,23 \text{ руб/т}$$

Цена природного газа (2024), $C_{гр}$ – 7,61 руб./м³.

Низшая теплота сгорания Q_i^d – 36 МДж/м³.

Часовой расход газа при КПД 90%, $V_{гр}$ – 1556 м³/час.

На основе проведенной оценки построен график (Рисунок 1.33) затрат на останов котла для очистки для продолжительности рабочей кампании от 7 до 90

суток, обратно пропорционально влияющей на количество остановов котла, n_o . Наглядно видно, что увеличение продолжительности безостановочной работы значительно снижает затраты и себестоимость продукции в конечном счете.

Увеличение продолжительности работы снижает затраты в базовом варианте (7 суток – 24458, вариант 1, или 33677, вариант 2, тысяч рублей в год):

- до 15 суток снижает на 49%;
- до 30 суток снижает на 73%;
- до 60 суток снижает на 85%;

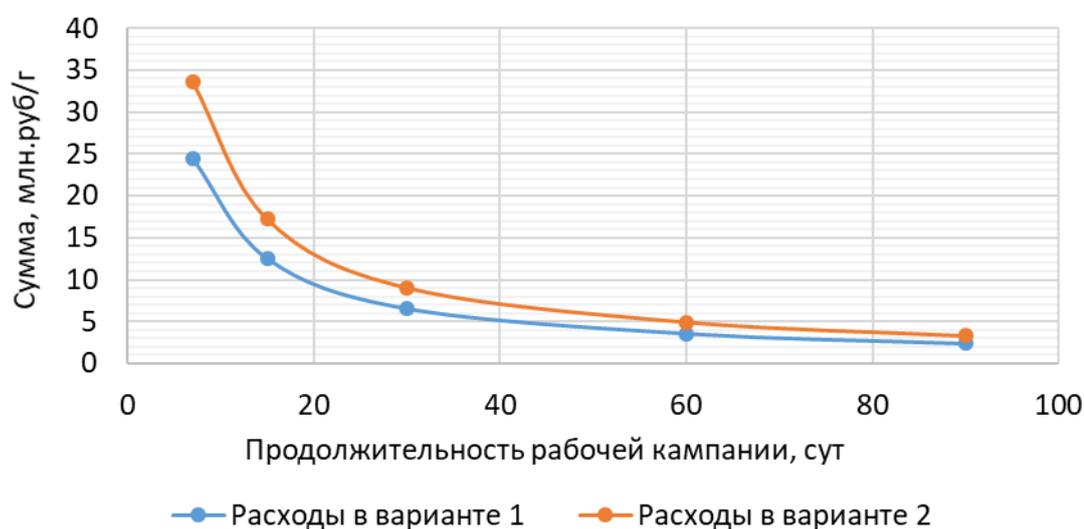


Рисунок 1.33 – Затраты на останов котла на подсолнечной лузге паропроизводительностью 20 тонн с замещением выработки пара на время останова котлом на природном газе. Здесь варианты вывоза лузги: 1 – на собственный полигон, 2 – в специализированную организацию.

Таким образом, продолжительность рабочей кампании до останова котла на очистку можно считать одним из наиболее значимых показателей эксплуатационных качеств котла. А достижение условий, требующих останова для очистки – лимитирующим фактором.

1.11 Теплотехнические характеристики лузги разных культур

Отходы растительного происхождения, получаемые при производстве сельскохозяйственной продукции это естественное, возобновляемое биотопливо с высокой калорийностью 15...19 МДж/кг, большим выходом летучих [16, 44] и низкой зольностью. Огневая утилизация таких отходов дает меньший парниковый эффект чем гниение с выходом метана., имеют низкую зольность. Отходы переработки зерна и масличных культур характеризуются стабильно низкой влажностью, поскольку зерно с повышенным содержанием влаги обязательно подсушивается перед хранением. Сравнительно стабильные характеристики, схожие с древесиной имеет и горючая масса.

Отклонения в минеральном составе и теплотехнических характеристик, вызванные местом и условиями при выращивании и уборке могут быть значительными даже для одного вида отхода. По анализам [44] (Таблица 1.3) теплотехнические характеристики лузги, поставляемой в котельную, варьируются в значимом диапазоне. Ещё больший разброс имеется для различных типов отходов, таблицы 1.4 и 1.5. Нормативный метод [7] данных для лузги и растительных отходов не содержит. В качестве расчетного состава топлива приняты осредненные данные технических анализов (Таблица 1.6).

Таблица 1.3 – Характеристики подсолнечной лузги

Характеристика лузги	Обозн.	Дата отбора пробы		
		25.11.2000	26.11.2000	1.12.2000
Влажность рабочая, %	W^p	9,36	8,22	10,66
Влажность аналитическая, %	W^a	3,9	3,9	4,05
Зольность рабочая, %	A^p	2,2	2,5	2,2
Выход летучих, %	V^e	78,2	77,4	77,7
Теплота сгорания, МДж/кг	$Q_{н}^p$	17,04	16,62	16,25

Таблица 1.4 – Характеристики растительных отходов

Характеристика	Обозн.	Тип отходов			
		Подсолнечная лузга	Гречневая лузга	Солома	Костра льна
Влажность рабочая, %	W^p	7,04	9,55	10	11
Зольность, %	A^p	1,95	1,22	4,5	2,9
Выход летучих, %	V^e	78,3	76,25	80	80
Содержание серы, %	S^p	0,2	0,1	0,1	0,1
Теплота сгорания, МДж/кг	Q^p_n	16,25	15,41	15,69	19,08

Таблица 1.5 – Технический состав растительных отходов

Наименование отходов	Технический состав на рабочую массу, %							Q^p_n МДж/кг
	C^p	H^p	O^p	N^p	S^p	A^p	W^p	
Солома	42,7	5,3	36,9	0,5	0,1	4,5	10	15,69
Стебли хлопка	40	5,0	63,0	0,5	0,1	3,4	15	14,52
Костра льна	43,5	5,4	36,6	0,5	0,1	2,9	11	15,92
Лузга подсолнечная	42,5	4,9	34,6	0,44	0,16	2,4	15	13,33
Шелуха рисовая	35,4	4,3	30,2	0,5	0,1	19,5	10	18,66

Таблица 1.6 – Осредненные характеристики подсолнечной лузги

1	Теплота сгорания	Q^p_n	МДж/кг	17,5
2	Влажность	W^p	%	8,8
3	Зольность	A^p	%	3
4	Выход летучих	V^e	%	78
5	Скорость витания частиц	w_6	м/с	2
6	Насыпная плотность	$\rho_{нас}$	кг/м ³	120

Теоретические объёмы газов при сжигании лузги				
7	воздуха	$V^o_{\text{в}}$	нм ³ /кг	4,48
8	паров воды	$V^o_{H_2O}$	нм ³ /кг	0,76
9	азота	$V^o_{N_2}$	нм ³ /кг	3,54
10	трехатомных газов	$V^o_{RO_2}$	нм ³ /кг	0,89
11	дымовых газов	$V^o_{\text{д}}$	нм ³ /кг	5,66

Масляничность лузги, контролируемая на МЭЗ, но не учитываемая стандартным анализом теплотехнических характеристик топлива зависит от сорта семян и значительно влияет на теплоту сгорания [44].

Для проектирования котлов и оборудования котельных в ООО «ПроЭнерго-Маш-Проект» используются обобщенные литературные и полученные лабораторно данные, представленные в таблице 1.7.

Сжигание лузги и других измельченных сухих растительных отходов в слоевых котлах сопровождается интенсивным выносом их из слоя и топочной камеры, поэтому для успешного сжигания необходимо организовать удержание мелких легких горящих остатков частиц лузги в топке. Известный опыт показывает, что для подавления выноса из топки недогоревших витающих частиц наиболее эффективны ВТ, удерживающие частицы за счёт циклонного эффекта [16, 44, 46].

Таким образом, на примере лузги подсолнечника видно, что имеются значительные проблемы по организации экономичного и устойчивого топочного процесса. Из-за высокой парусности недогоревшие частицы выносятся из топки, оседают в газоходах, золоуловителях и дымовой трубе, и в них часто возникают пожары, коробление и выгорание стенок. При зольности лузги всего до 2-3% в котлах из-за интенсивного возгона легкоплавких соединений быстро формируются мощные отложения золы, препятствующие работе котлов. Выявлено, что для организации эффективного сжигания лузги не пригодны ни типовые котлы, ни котлы, созданные для сжигания древесных отходов, которые могут удовлетворительно работать на нагрузках не выше 30-40% от номинальной.

Таблица 1.7 – Теплотехнические характеристики лузги и растительных отходов

№	Название биотоплива	W_r	A_r	S_r	C_r	H_r	N_r	O_r	Q_i^r	V^{daf}
	Размерность	%	%	%	%	%	%	%	МДж/кг	%
1	Лузга подсолнечная	8,8	3	0,1	47,8	5,2	0,5	34,6	17,5	80
2	Лузга овсяная	11	4,5	0,1	43,9	5	0,5	35	15,9	80
3	Лузга гречневая	9	1,5	0,1	44	5	0,5	39,9	15,5	75
4	Лузга рисовая	10	19,5	0,1	35,4	4,3	0,5	30,2	12,9	80
5	Солома льна	11	2,9	0,1	43,5	5,4	0,5	36,6	16,1	75
6	Скорлупа кедрового ореха	2,4	2	0,1	48	6	0,1	41,4	17,8	80
7	Солома пшеницы	10	4,5	0,1	42,7	5,3	0,5	36,9	15,7	80

№	Название биотоплива	V_B^0	$V_{N_2}^0$	$V_{RO_2}^0$	$V_{H_2O}^0$	V_r^0	Плотность	
							лузги	золы
	Размерность	м ³ /кг	кг/м ³	кг/м ³				
1	Лузга подсолнечная	4,48	3,54	0,89	0,76	5,66	100	400
2	Лузга овсяная	4,07	3,22	0,82	0,76	4,79	130	200
3	Лузга гречневая	3,91	3,09	0,82	0,73	4,65	170	200
4	Лузга рисовая	3,28	2,6	0,66	0,65	3,91	100	100
5	Солома льна	4,08	3,23	0,81	0,8	4,84	65	200
6	Скорлупа кедров. ореха	4,48	3,54	0,9	0,77	5,21	350	400
7	Солома пшеницы	3,98	3,15	0,8	0,78	4,72	80	200

Опыт по организации сжигания биотоплив, включая применение зелёных тарифов, на основе отечественной и передовой зарубежной практики подробно рассмотрен и проанализирован выше, в литературном обзоре. В итоге на этой основе формулируется 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» и ставятся сопутствующие задачи.

Выводы по первой главе

1. В современной энергетике интенсивно развивается направление ВИЭ, при этом подавляющую часть в них занимает биотопливо, основным продуктом энергетического использования которого является выработка тепловой энергии.
2. Показана связь характеристик биотоплив и их влияние на выбор схемы организации топочного процесса. Анализ процесса сушки на основе модели О. Кришера выявляет особенности конструкции топок, указывает на непригодность угольных топок для сжигания влажных КДО, а КДО котлов для сжигания лузги.
3. Рассмотрена функция зелёных тарифов в организации утилизации растительных отходов в промышленных масштабах, показана их роль как катализатора создания инновационного оборудования для сжигания и обращения с биотопливами.
4. Энергетические котлы с топками КС и ЦКС – мощные, экономически, экологически эффективные, а также пылеугольные котлы, реконструированные, например, на совместное «НТВ – «Торнадо» сжигание с углем пригодны для утилизации КДО и растительных отходов в промышленных масштабах. ТГК с мощными твердотопливными ТЭЦ имеют возможность стабильного потребления биотоплива, с устранением отходов и эмиссии вредных выбросов, NO_x и SO_2 .
5. Рассмотрены свойства лузги разных культур, показано, что это особый вид биотоплива, сухого, малозольного, с высокой калорийностью, и рациональность его огневой утилизации, а также имеющиеся проблемы: вынос недогоревших частиц, пожары в газоходах и отложения золы, препятствующие работе котла.
6. Показана основная проблема эксплуатации котлов на подсолнечной лузге – вынужденный останов котлов для очистки и его лимитирующее влияние на эффективность ЭУ.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ВИХРЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ «ТОРНАДО»

2.1 Особенности вихревых течений и их применение в энергетике

Вихревое движение, наряду с потенциальным течением, является одним из основных состояний движущейся сплошной среды и характеризуется чрезвычайным разнообразием. Эти виды течений удобно описывать соответственно уравнениями Эйлера и Громеки – Ламба, причём оба вида течений могут существовать одновременно в общем потоке. Пара вихрей, сходящих с кончиков крыльев самолета, дорожка Кармана в виде чередующихся вихрей, образующихся за обтекаемым телом в спокойном потоке – примеры подобных составных течений.

В энергетике вихри широко применяются для организации перемешивания топлива и окислителя, интенсивного и равномерного. Это вихревые горелки и вихревые течения, в том числе создаваемые в объёмах камер сгорания энергетических котлов с тангенциальной, не радиальной, подачей струй из горелок в сторону оси вращения формируемого горящего вихря.

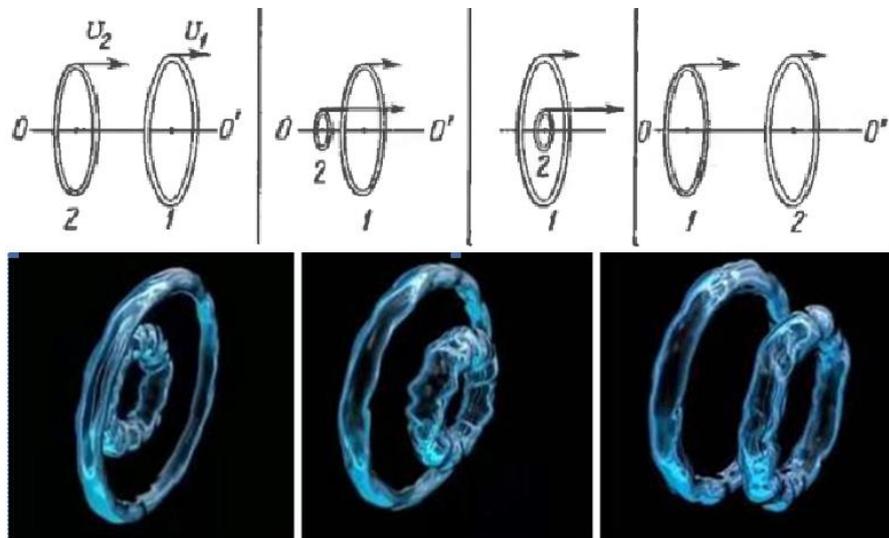


Рисунок 2.1 – Чехарда вихревых колец, схема и фото

Вихревые течения и вихри не случайность, возможны устойчивые образования, например, вихревые кольца. Пара колец может образовать динамические структуры, называемые «чехарда колец», которые подробно исследовал Гельмгольц [48,49]. Если два одинаковых вихревых кольца движутся в жидкости или газе

вдоль общей оси в одном направлении с одинаковыми скоростями, то они начинают притягиваться. При этом первое кольцо (1) растягивается и замедляет движение, а второе кольцо (2) стягивается, ускоряется и проскакивает внутри кольца 1. Как только это происходит, кольцо 2 начинает расширяться и замедляться, а кольцо 1 – сужаться и ускоряться. Когда их размеры и скорости выравниваются, вся игра повторяется, и так далее. Эта картина взаимодействия колец была выведена теоретически, исходя из уравнений гидродинамики идеальной жидкости [48].

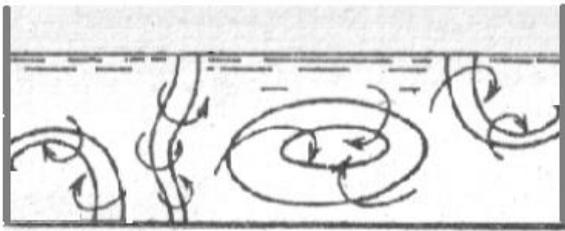


Рисунок 2.2 – Схемы замыкания вихря

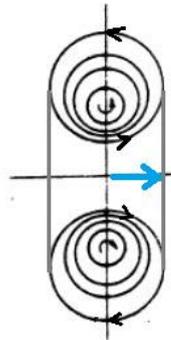


Рисунок 2.3 – Вихревое кольцо

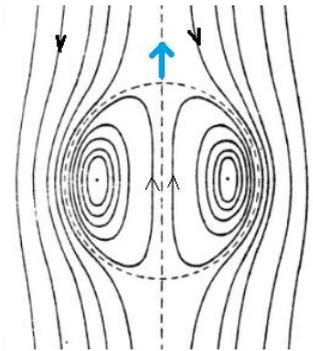


Рисунок 2.4 – Вихрь Хилла

При анализе вихревых движений в идеальной жидкости Гельмгольцем было получено несколько важных результатов для вихревых линий и вихревых трубок. Под «вихревой линией» понимается воображаемая линия, проходящая через сердцевину вращения жидкости, представить которую легко, вспомнив «ножку» водяной воронки в ванной. Гельмгольц аналитически доказал, что устойчивые вихревые линии должны быть либо замкнуты, образуя вихревое кольцо, либо оканчиваться на поверхности жидкости, на дне или на стенках ограничивающего ее сосуда [48] (Рисунок 2.2), что важно при проектировании вихревых камер сгорания.

Частным случаем вихревого кольца (Рисунок 2.3) является течение в виде вихря Хилла (Рисунок 2.4) соответствующее обтеканию капли. Можно выделить протяженные вихри, вихревые структуры, точечные вихри и занимающие промежуточное положение вихревые кольца, которые близки по свойствам к ним.

Касаясь теории и экспериментальных исследований, следует указать, что наиболее значительный вклад внесли учёные Института теплофизики СО РАН:

Алексеенко С.В., Гольдштик М.А., Куйбин П.А., Маркович Д.М., Саломатов В.В., Смутьский И.И., Шторк С.И. и другие сотрудники института. Основные результаты исследований изложены в монографиях [50-53], диссертациях и научных публикациях, в том числе в [54-58]. Так в [50] выделены и рассмотрены сферические вихри Хилла и Хикса, протяженные вихри Ламба – Озеена, Рэнкина, Гаусса, Бюргера, протяженные вихревые структуры и их взаимодействия. Выявлена важность пережима для формирования устойчивых вихревых течений. Подробно изучались: прецессия, неустойчивость и распад протяженных вихрей и вихревых структур с их перезамыканием и формированием кольцевых и точечных вихрей.

Таким образом, вихревые потоки относятся к классу устойчивых течений, они могут и оправданно широко применяются в различных отраслях техники. Например, применительно к котлам интересные эффекты создаются группой вихревых горелок, в простейшем случае парой. Пара одинаковых вихревых горелок, имеющих различное вращение, создают общий факел, отклоняющийся вниз (Рисунок 2.5 а) или вверх (Рисунок 2.5 б) и этот эффект можно использовать для контроля температуры перегрева пара. Если при этом одна из горелок, на рисунке 2.6 а справа, даёт вихрь с большей интенсивностью, то их общий факел "ф" будет уходить, вращаясь вокруг оси "о", которая смещена по соединяющей горелки линии за более мощную горелку и здесь возможен режим с опасным набросом факела на правый экран топки. Если пара вихрей с одинаковым вращением, но различной степенью крутки (Рисунок 2.6 б), то их факелы не объединяются и вращаются вокруг общей оси "о", находящейся между горелками на соединяющей их линии, ближе к более мощной.

Вихрей, впрочем, как и горелок в энергетических котлах, а также устойчиво работающих схем их взаимного расположения достаточно много [49, 50]. В качестве примера можно указать, что у нас при переводе котлов ЭЧМ 60 на НТВ сжигание с V – образными горелками, г. Междуреченск, удалось на всех трёх котлах устранить выгорание правых основных горелок за счёт изменения направления вращения правых растопочных горелок, охлаждающихся присосами воздуха. [59].

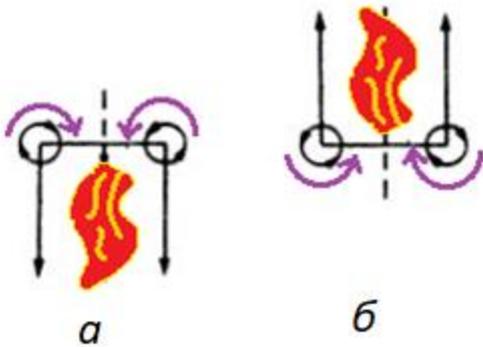


Рисунок 2.5 – Схема отклонения факела

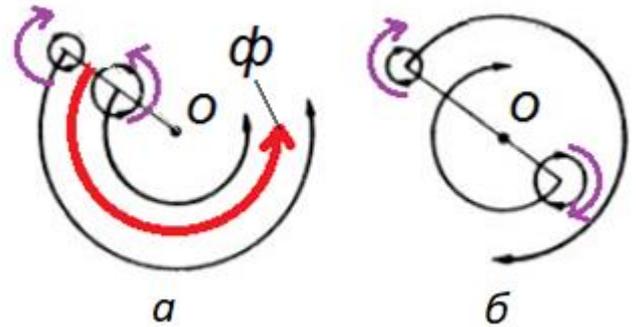


Рисунок 2.6 – Схемы с вращением факелов

2.2 Вихревые топки и камеры сгорания, роль пережима

Вихревые течения формируют в камерах сгорания вводом потока через осевой лопаточный завихритель или за счет его тангенциального ввода через сопла (Рисунок 2.7). При этом в центре вихря возникает разрежение, оно и торможение потока на торцевых стенках формируют возвратные потоки и сложную аэродинамику в вихревых камерах. Уменьшение площади сечения сопел повышает скоростной режим (Рисунок 2.8) и, наряду с изменением положения сопел вдоль оси камеры, (Рисунок 2.7) это наиболее значительно влияет на аэродинамическую обстановку. Структура закрученного потока не испытывает принципиальных изменений при загрузке его твердой взвесью. Все зоны, характерные для чистого закрученного потока, качественно сохраняются и в запылённом потоке [44], но значения параметров несколько изменяются [60, 61]. Снижаются вращательные скорости, и падает статическое давление, на рисунке 2.9 показано пунктиром.

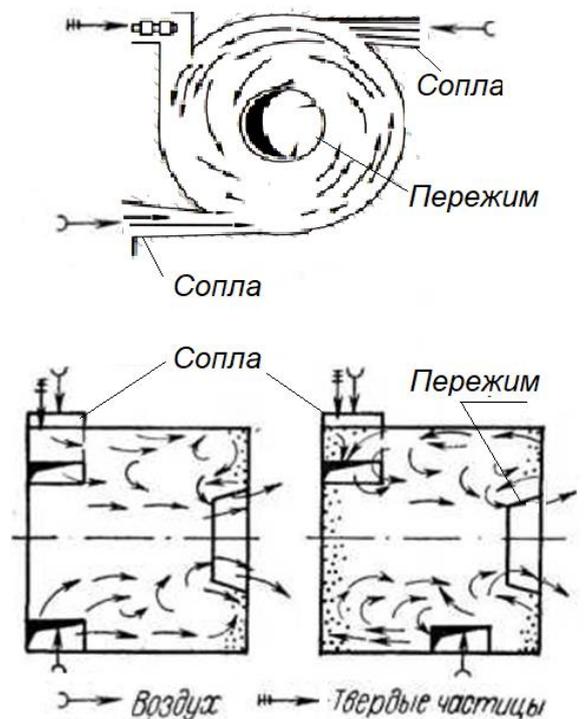


Рисунок 2.7 – Вихревая камера [61]

Более подробно практический опыт, аналитические модели с картинами течений, полей температуры и других параметров для цилиндрических и приближенным к ним геометрий камер сгорания и их моделей рассмотрены в монографиях и научных статьях: Кнорре Г.Ф., Маршака Ю.Л., Саломатова В.В., Котлера В.Р., Скуратова А.П., Козлова С.Г. и других учёных [60-65].

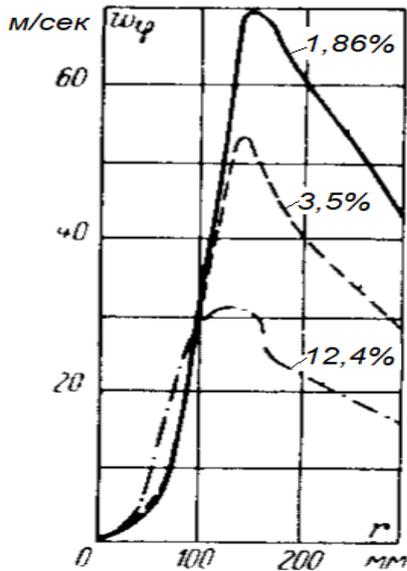


Рисунок 2.8 – Зависимость скорости от сечения ввода [61]

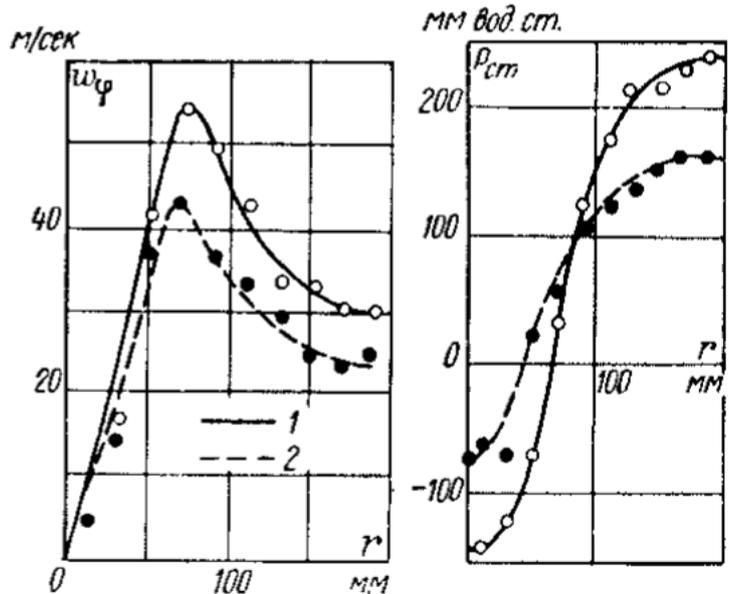


Рисунок 2.9 – Влияние твердой взвеси на аэродинамику: 1 – чистый поток; 2 – запыленный [61]

Наиболее чётким признаком предлагаемых ВТ является пережим в виде газоотводящего окна - ГОО, повышающий стабильность вихря [50]. Вихри, как и линии тока, не исчезают. При их сжатии пережимом, кинетическая энергия потока сохраняется и поэтому скорость вращения возрастает. Увлечение частиц ускоряющимся потоком сопровождается увеличением скорости их вращения w и уменьшением радиуса траектории частиц r , при этом центробежная сила $P = m \times w^2 / r$, действующая на частицу массой m , резко возрастает, поэтому уходящий поток на выходе очищается от частиц с их отбрасыванием на периферию и удержанием в камере сгорания. В итоге пережим – это наиболее важный признак вихревых топок и камер. Он повышает стабильность вихря [50], и как показывают исследования [66],

именно пережим, особенно [61] выступающий внутрь, рисунок 2.7, в виде обратной воронки надёжно удерживает частицы в ВТ.

Наиболее близким к предлагаемым в диссертации вариантам, являются, рассмотренные выше небольшие ВТ – высокотемпературные циклонные предтопки, которые подключаются к камере охлаждения котлов. Этот тренд у нас был задан Г.Ф. Кнорре [60, 61] разработкой в начале 30-х годов циклонной топки в виде цилиндрической камеры с горизонтальной осью и пережимом на выходе, схему, которую в 1940 г. Ковригин А.Н. предложил использовать для сжигания угля с улавливанием и удалением золы в виде жидкого шлака (ЖШУ).

Циклонные предтопки имеют высокое объёмное теплонапряжение, $q_{\text{впт}}=2\dots6$ МВт/м³ при среднем для топок $q_{\text{впт}} = 0,23$ МВт/м³, практически полное выгорание топлива и за счет пережима типа обратной воронки и шлакоулавливающего пучка на выходе могут улавливать до 85...95% жидкого шлака. Наиболее совершенными были предтопки типа ЦКТИ-БКЗ, приведенные на рисунке 2.10.

В целом значительного прогресса с внедрением ЖШУ, несмотря на оптимистичность в ожиданиях [64], не произошло ввиду сложности и дороговизны изготовления циклонных камер и котлов, пониженной их надежности, необходимости высокого подогрева и напора дутья, а также повышенных вредных выбросов. Во всех случаях эксплуатации котлов с ЖШУ отмечен быстрый занос золой поверхностей нагрева, связанный с ее интенсивной возгонкой из пленки шлака.

Следует отметить что вихревая технология была успешно усовершенствована и применена Штымом А.Н. [67], его учениками и последователями, Штымом К.А., Соловьёвой Т.А., Дороговым Е.Ю и другими для высокоэффективного сжигания практически беззольных топлив, мазута и природного газа, в энергетических котлах [66 - 69] с применением охлаждаемых воздухом простых циклонно-вихревых камер. Проведенные работы включали обобщение большого объема накопленных данных, а также натурные исследования практической эффективности работающего энергетического оборудования [69].

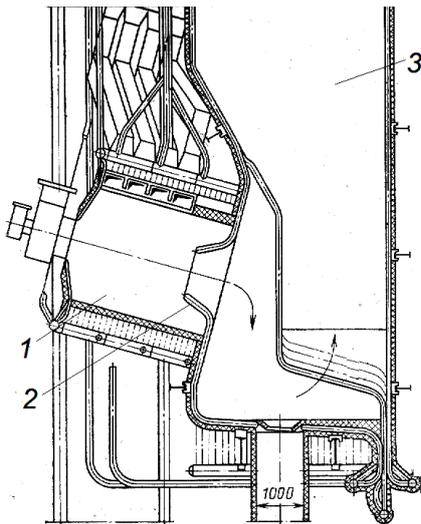


Рисунок 2.10 –
Предтопок: 1 – циклон; 2
– пережим; 3 – камера
охлаждения

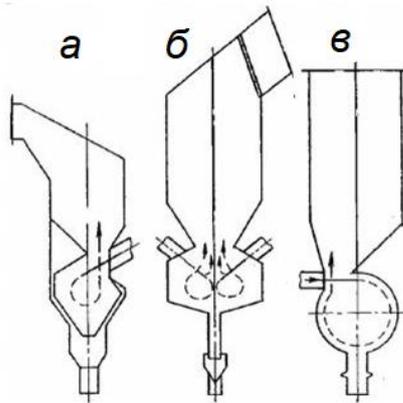


Рисунок 2.11 – Топки с
петлевым пламенем: а –
МЭИ; б – гамма-топка
ВТИ; в – топка ЦКТИ

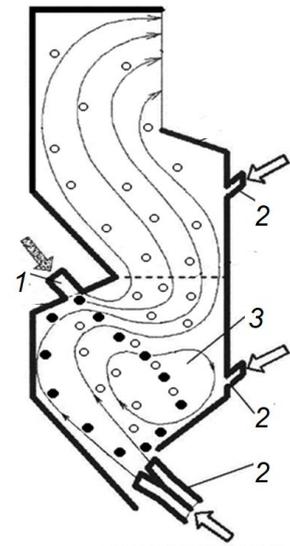


Рисунок 2.12 – НТВ
топка: 1 – горелка; 2
– сопла; 3 – вихревая
зона

С другой стороны, известны и более масштабные топки с петлевым факелом, также именуемые как ВТ (Рисунок 2.11) полуоткрытые топки с ЖШУ. Здесь горение сосредоточено в небольшом объеме нижней полуоткрытой камеры сгорания, что позволяет удерживать частицы золы и горящие частицы угля в стекающей вниз плёнке жидкого шлака [64]. Топливовоздушная смесь подается в камеру сгорания через горелки. Конфигурация камеры сгорания способствует формированию петлеобразного факела, который обеспечивает стабильное воспламенение топливовоздушной смеси. В этих топках достигается высокая экономичность, а с жидким шлаком удаляется 95–98% золы. Однако высокий уровень температуры в зоне активного горения обуславливает большую эмиссию NO_x (до 1200–1500 мг/м³), интенсивное испарение золы, шлакование и загрязнение поверхностей нагрева в топке и конвективных газоходах, что осложняет работу котла.

Исторически первые петлевые ВТ, были созданы в ЦКТИ в конце 20-х годов прошлого века, начиная с топок Шершнева и Макарьева [60, 61]. Они предназначались для мелких топлив с большой парусностью, например, в 1931 г. опытная ВТ была установлена под котлом Шатурской ГРЭС для сжигания торфа.

Более эффективными по экологическим показателям вариантами топок с петлевым пламенем являются низкотемпературные вихревые (НТВ) топки, разработанные в Ленинградском политехническом институте под руководством профессора В.В. Померанцева. В создании этих топок участвовали его ученики Ю.А. Рундыгин, Д.Б. Ахмедов, С.М. Шестаков, Ф.З. Финкер, В.Е. Скудицкий, К.А. Григорьев и другие.

В НТВ топке (Рисунок 2.12) зона активного горения включает в себя холодную воронку. Это позволяет снизить максимальную температуру в вихревой топке (примерно на 100–300 °С) и за счет активного перемешивания выровнять температуру в вихревой зоне. Пониженная температура факела исключает шлакование поверхностей нагрева, что также повышает тепловую эффективность топки. Пониженный уровень температур, ступенчатый ввод окислителя, многократная циркуляция горящих частиц и угрубление гранулометрического состава золы в совокупности улучшают показатели НТВ топок по вредным выбросам (оксидам азота NO_x и диоксиду серы SO_2) и повышают эффективность работы золоулавливающего оборудования [70].

Успешные модернизации котлов с организацией НТВ сжигания торфа, бурых и каменных углей, сланца были реализованы на Кумертауской ТЭЦ, Новомосковской ГРЭС, Кировской ТЭЦ-4, МУП «Южная тепловая станция» (г. Рубцовск), ТЭЦ Бумажного комбината (г. Инкоу, Китай), Балтийской ГРЭС (г. Нарва, Эстония) и др. [70-74].

Далее к числу условно вихревых также относится известная с 30х годов [75] схема без пережима, с твердым шлаком и угловыми прямоточными горелками, реализованная в 1937 году в котле ЛМЗ на Сталиногорской (Новомосковской) ГРЭС. Дополненная НПО ЦКТИ и БКЗ системой встречно-смещенного нижнего дутья, она особенно широко применяется в котлах БКЗ [76] с твердым шлаком. Оригинальным среди них также является малогабаритный котел Е-820 разработки Ф.А. Серанта [77] с кольцевой топкой, который может длительно работать с нагрузкой до 900-920 т/ч при высоких экологических показателях.

С другой стороны, все эти, применяемые в энергетике крупномасштабные топки, при всех их достоинствах, не имеют главного элемента, удерживающего частицы пережима, который необходим в вихревых топках небольших котлов промышленной энергетики из-за малого времени пребывания частиц в них.

Зарубежные исследования применительно к ВТ даны в монографии [78], статьях [79-82] и других источниках. В них рассмотрены циклонные предтопки, но уделяется гораздо меньше внимания публикациям и проведению научных и опытных разработок по ВТ [64, 77] в целом.

Из обзора видно, что при наличии глубокого теоретического обоснования и практической реализации различных вариантов ВТ, циклонных предтопок и ВТ с петлевым факелом при ЖШУ, НТВ и другие, есть существенные проблемы по удержанию частиц и поддержанию их режима работы без ЖШУ. Для лужки требуются ВТ нового типа, низкотемпературные с пережимом на выходе из ВТ, который повышает стабильность и эффективность работы вихря.

2.3 Разработка конструкций газоотводящего окна

Обзор конструкций топочных устройств, п.2.2, показал, что имеющийся в энергетике опыт не может напрямую использоваться при разработке котлов для сжигания интенсивно шлакующей лужки, состоящей из легких парусных частиц, однако, отмеченная выше особая роль пережима заслуживает пристального внимания. Кроме того, необходимо учесть, что в последние десятилетия предпочтение отдается экологически эффективным ступенчатым методам сжигания с понижением температуры горения. Это снижает шлакование экранов, уменьшает образование NO_x , SO_2 и замедляет уплотнение отложений. В итоге разработка общего дизайна и параметров работы пережима должны проводиться комплексно, включая создание простых, эффективных конструкций ГОО.

Изучение аэродинамики на стендах и математическое моделирование выявило, что именно разработка конструкций пережима и ГОО позволяет создать [24] эффективно работающие вихревые топки с различной геометрией камеры сгора-

ния. Могут эффективно применяться не только цилиндрические или приближенные к ним многоугольные, но и любой, в том числе неправильной формы камеры, что важно для встраивания вихревых камер сгорания в топочные объемы реальных котлов. Во всех случаях конструкция ГОО в значительной степени нивелирует [16, 44] влияние формы вихревой топки, и обеспечивает необходимое для горения время пребывания топлива при практической организации топочного процесса.

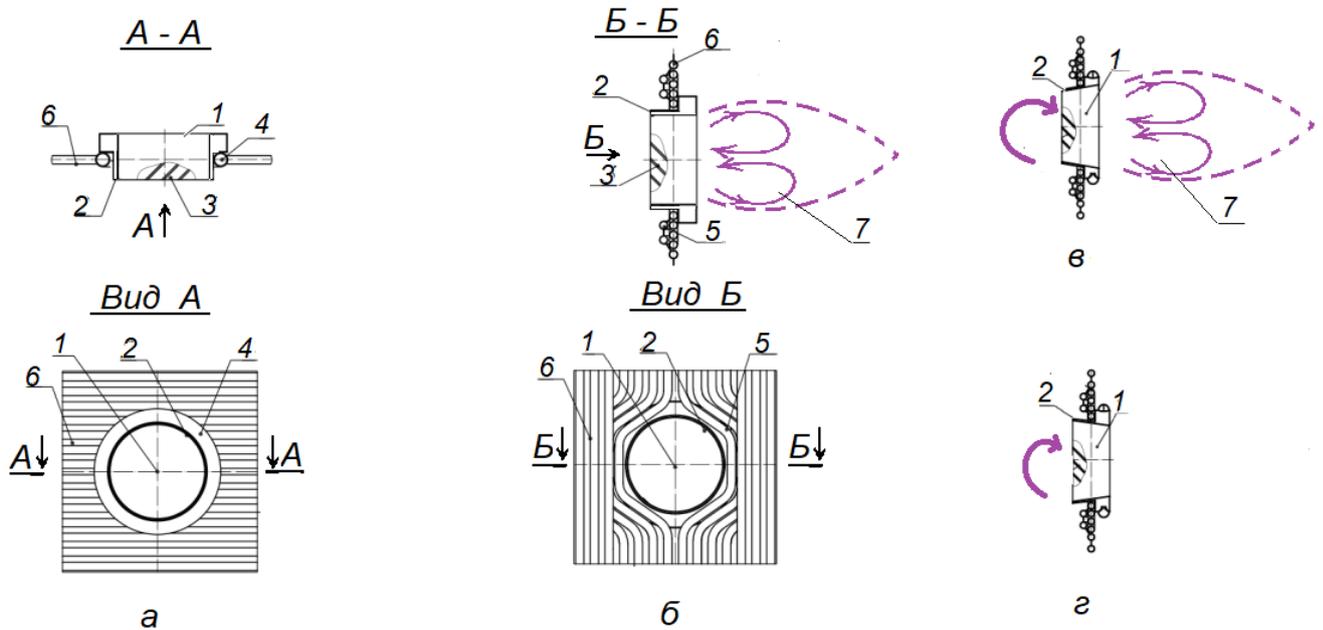


Рисунок 2.13 – Некоторые конструкции ГОО: *а* – в горизонтальном экране; *б* – в вертикальном экране; *в* – расширяющееся; *г* – сужающееся по ходу газов

Новизна рассматриваемых разработок подтверждается патентами [83-85, 88, 93-97, 99, 134, 138, 147-150, 152, 153] (Приложение Б). В патенте [83] предлагается, рисунок 2.13, надежно работающая охлаждаемая конструкция ГОО 1 в виде выступающего в вихревую топку кольцевого сопла 2 дожигающего дутья с закручивающимися лопатками 3, вставленного через кольцевой коллектор 4 или разводку труб 5 топочного экрана, причем экран *б* может располагаться горизонтально *а*) или вертикально *б*), соответственно ориентации оси вихря.

В патенте предложено [84] выполнить кольцевой воздухопровод в виде отрезка конуса (Рисунок 2.13 *в* и *г*), с полууглом раскрытия от +35 до -35 градусов. Это позволяет управлять эффективностью удержания частиц в камере сгорания с уче-

том реакционной способности топлива за счет применения нужного угла раскрытия. ГОО с малым диаметром входа, диффузор (Рисунок 2.13 *в*), позволяет удерживать в камере сгорания более мелкие частицы, что рекомендуется для низкорекреакционных топлив. Во втором случае подача дожигающего дутья в сужающемся канале (Рисунок 2.13 *г*), конфузоре, позволяет дожечь быстро сгорающие частицы высокорекреакционных топлив. Полуугол раскрытия свыше ± 35 градусов не эффективен из-за отрыва потока от стенок в диффузоре и сложности исполнения.

Согласно патенту [85] в камере сгорания предлагается установить на противоположных боковых стенах симметрично два ГОО. Это позволит уменьшить диаметр сопел 2 и этим увеличить эффективность удержания частиц, а также значительно повысит устойчивость вихря за счет его большего поджатия. Процессы удержания частиц в топке и циклоне аналогичны, поэтому камеры с выдвинутым в объем газоотводящим патрубком сопла 2 более эффективны.

Встречно направленное из сопла 2 в камеру сгорания дожигающее дутьё не только отбрасывает удерживаемые частицы, но ещё как бы дополнительно удлиняет патрубок. В монографии [86] приведены опытные данные, которые показывают, что кольцевой поддув встречно развороту потока (Рисунок 2.14 *б*), существенно повышает фракционную эффективность η улавливания частиц, в сравнении с простым разворотом потока (*а*), пролетают только самые мелкие.

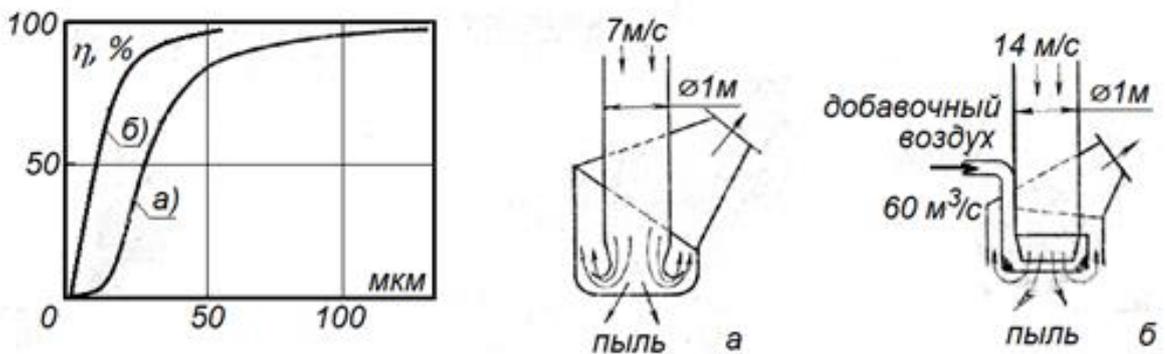


Рисунок 2.14 – Сравнение η для двух вариантов схемы улавливания частиц

[86]

При этом опыты [61] выявили, что пережим в виде обратной воронки не только играет роль своеобразного турбулизатора потока, но и формирует в вихревой камере сложную картину (Рисунок 2.15) течений с возвратными потоками по осевой скорости w_x , которая наложена на общую картину интенсивно вращающегося потока. Более того, здесь, в зоне ГОО и за ним, как показали последующие исследования [60, 61 и 78], формируются интенсивные возвратные турбулентные течения, (Рисунок 2.13 б и в), характерные также для вихревых горелок и прохождения вихря через диффузоры (Рисунок 2.16) (полуугол раскрытия диффузора $31,5^\circ$ измерения внутри диффузора не проводились). Область рециркуляции выделена пунктиром, на выходе вихря из камеры сгорания она существует всегда, и здесь наблюдаются наибольшие значения градиентов скоростей и параметров турбулентности.

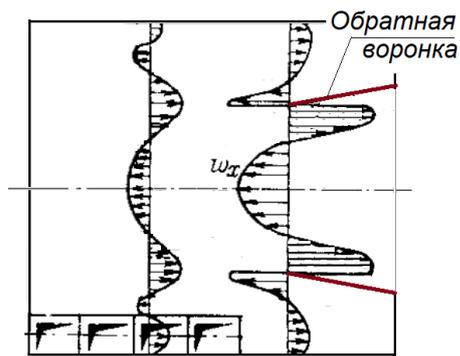


Рисунок 2.15 – Течения в циклоне

[61]

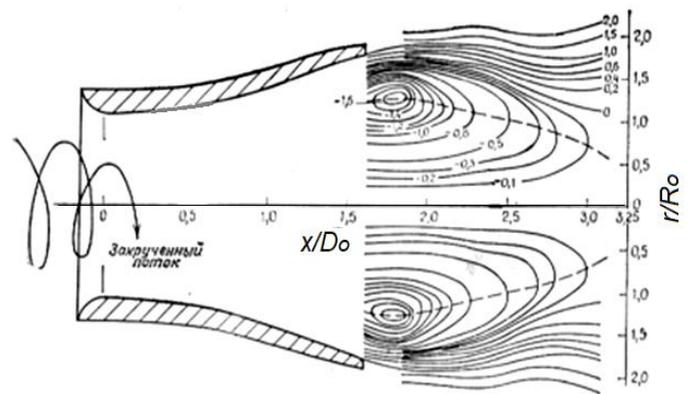


Рисунок 2.16 – Линии тока за диффузором

[78]

В итоге в вихревой камере сгорания, в ГОО и в установленной за ними камере дожигания создаются уникальные условия для наиболее интенсивного массообмена, за счёт предлагаемой в [83 - 85] подачи дожигающего дутья возможно обеспечить экологически и экономически эффективное ступенчатое сжигание с дожиганием недожога при минимальных избытках воздуха на уровне α''_m (1,12...1,15) за топочным устройством. Оценочно в камере сгорания при α''_l (1,05...1,15) сжигается до 80-95 % топлива, причём благодаря низкотемпературному режиму образуются преимущественно топливные NO_x , а оставшееся топливо формирует в камере

сгорания восстановительную зону с α_1 (0,7...0,9), и в ней NO_x восстанавливается. Далее, на выходе из камеры сгорания продукты неполного сгорания перемешиваются с дополнительным воздухом $\Delta\alpha$ (0,2...0,3), поступающим через кольцевое сопло, быстро догорают в описанной выше зоне интенсивной турбулентности и рециркуляции, поступают на охлаждение в конвективный газоход или камеру дожигания с α''_m (1,12...1,15). В итоге предлагаемые конструкции ГОО обеспечивают дополнительное повышение эффективности удержания частиц, охлаждение собственно сопла, а также повышает [87] экологическую и экономическую эффективность топочного устройства в целом.

Работа ГОО и сопел изучалась предшественниками при разработке ВТ первого поколения для лузги [16] путем холодного моделирования в ходе общего исследования аэродинамики вихревых топочных камер на экспериментальном стенде с моделью, которая имела форму прямой восьмигранной призмы (Рисунок 2.17). Такой профиль топки с боковыми экранами можно выполнить как кладкой из шамотного кирпича задней и фронтальной стен камеры сгорания, так и путем введения заднего и фронтального экранов, в том числе газоплотных.

Предварительные продувки показали возможность организации надежного удержания сыпучего материала (древесные опилки, лузга) в этой модели вихревой топки восьмиугольной формы. В модели с четырьмя прямыми соплами и внутренним конусом материал удовлетворительно удерживался во внутреннем объеме в диапазоне расходов подводимого воздуха $Q_0=0,3-0,7 \text{ м}^3/\text{с}$ [16].

Лабораторным исследованием на модели [16] было выявлено:

- Вихревая камера имеет определенную емкость и при достижении критической массы частиц поток «захлебывается», после чего происходит выброс частиц в ГОО и вихрь стабилизируется.
- Удерживающая способность вихревой камеры в этом варианте невысока.
- Зона двухфазного потока ограничивалась сечением входного отверстия обратного конуса.
- При удалении внутреннего конуса наблюдался неприемлемый вынос.

- Материал внутри камеры двигался вблизи передней торцевой стенки в форме тороидального жгута, а также в объеме модели топки в виде двух пересекающихся жгутов меньшей концентрации.
- Приемлемое удержание материала в объеме камеры без внутреннего конуса при диаметре выходного отверстия не более 152 мм ($d_{вых}/D=0,38$).

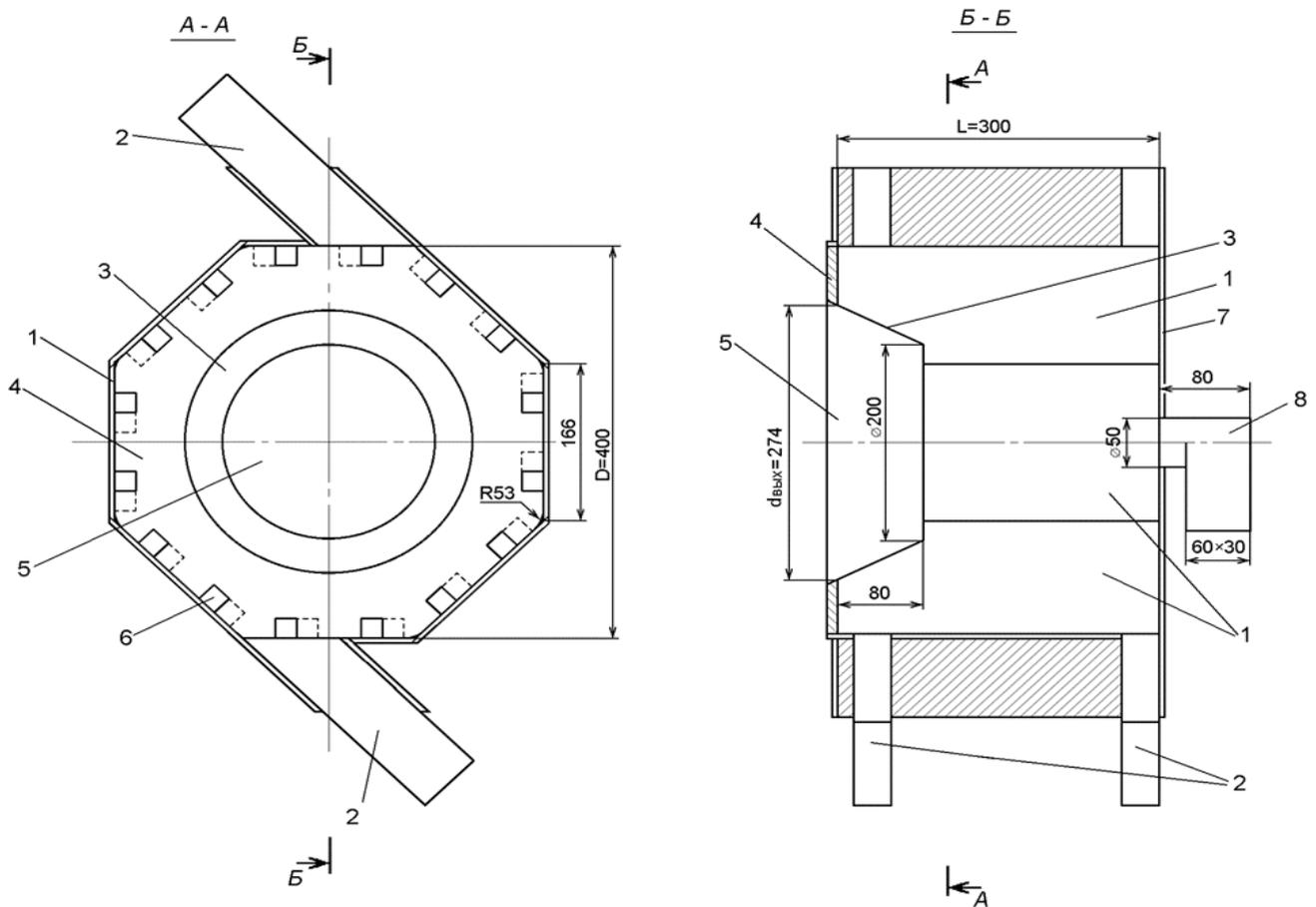


Рисунок 2.17 – Модель восьмигранной вихревой топки и варианты сопел подачи дутья: 1 – боковые прозрачные стенки; 2 – сопловые блоки; 3 – обратный конус; 4 – задняя стенка; 5 – выходное отверстие; 6 – торцевые сопла; 7 – фронтальная стенка; 8 – имитатор горелки [16]

Таким образом проведенные экспериментальные исследования показали хорошее удержание частиц не в цилиндрических, а призматических камерах и при соответствующей организации подачи дутья можно отказаться от использования сложного в производстве обратного конуса, что существенно упрощает конструкцию топки. В дальнейшем конструкции ГОО, в том числе с подачей дожигающего

дутья, хорошо вписывающиеся в конструкцию котлов [83, 88] были улучшены, в том числе с применением численного моделирования [89].

Главным достоинством этих разработок является оригинальное применение в конструкции ГОО охлаждаемых, надёжных в работе кольцевых воздухопроводов, которые увеличивают экономичность благодаря дожиганию, улавливанию и удержанию частиц в камере сгорания и повышают их экологическую эффективность за счёт ступенчатого сжигания и обеспечивают устойчивость вихря.

2.4 Предшествующий опыт сжигания лузги в вихревых топках

Касаясь лузги, следует указать, что Г.Ф. Кнорре первым [60] предложил открытый, неохлаждаемый кирпичный циклонный предтопок с вертикальной осью вращения для сжигания просяной лузги в котельной Сызранского крупяного завода. Лузга засыпалась сверху, по оси циклонной камеры, воспламенялась в предтопке и по тангенциальному выходу поступала в дожигательное пространство котла, где и догорала окончательно. Было отмечено, что цилиндрическая высокая форма камеры при малых скоростях потока не обеспечивает необходимой структуры потока при сильно нагруженных вихревых зонах, в итоге технология не получила практического развития [66].

На отечественных МЭЗ и сельхозпредприятиях сжигание лузги стало широко применяться с начала 90-х годов. Первый опыт использования специализированных паровых котлов производства БИКЗ с применением вихревых топок для сжигания был получен на лузге подсолнечника при пусконаладочных испытаниях [16] нескольких новых котлов: Е-16-21-350 ГМДВ на Урюпинском МЭЗ, 2-х КЕ-10-14 ОГВ, в ОАО «Чишминское», 2-х КЕ 4-14 ОСВ на Барнаульском МЭЗ и реконструированном котле КЕ-6,5-14 в п. Бутурлиновка.

Первые варианты вихревых топок с точки зрения полноты выжигания горючих компонентов из лузги оказались высокоэффективными. Удержание мелких парусных частиц лузги до их глубокого и практически полного выгорания при всех вариантах организации топочных процессов в вихревых топках обеспечивалось

легко. Во многих вариантах вихревых топок ГОО с простым кирпичным пережимом обеспечивало удержание частиц лузги до их полного выгорания (Рисунок 2.18).

Топки легко растапливались путем прямого зажигания лузги. Для прогрева холодной топки и выхода на стабильный режим требуется 30...60 минут. Глубина регулирования, благодаря устойчивому горению лузги, высокая, практически от нуля. Загоревшуюся в топке лузгу трудно потушить до полного догорания [44].

В этих конструкциях вихревых топок стены ГОО и под выполнены из огнеупорного кирпича. В случае работы холодной топки могут наблюдаться значительные пульсации давления и выбросы дыма из котла. Более заметными пульсации становятся с увеличением подачи топлива. Исследование данного вопроса показало, что пульсации связаны с образованием скоплений и куч несгоревшей лузги. Эти скопления периодически взбиваются потоком дутья, вспыхивают, вызывают резкое увеличение объёма продуктов сгорания и пульсации давления. Частота пульсаций «плавает» и обычно находится на уровне 1,5...2 в минуту [44].

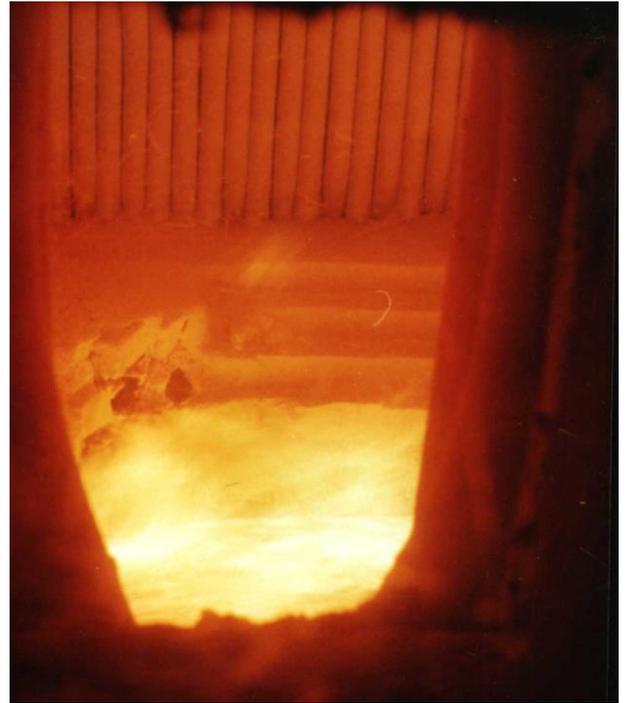


Рисунок 2.18 – Горение лузги в вихревой топке котла КЕ-10-14 с вертикальной осью

Даже редкие пульсации давления по условиям эксплуатации котла требуют поддержания в топке повышенного разрежения. Это вызывает необходимость повышенной загрузки дымососа. В итоге, в том числе из-за увеличенных присосов в тракте дымовых газов, дымосос перегружен, котел не обеспечивает номинальной мощности даже при выборе дымососа с запасом, а обеспечение стабильности работы топки является важным моментом при пусконаладочных работах [44].

Наиболее глубокое выгорание частиц было в теплоизолированной топке с вертикальной осью вращения вихря котла КЕ-10-14 ОГВ, ОАО «Чишминское» (Рисунки 2.18 и 2.19). Однако даже здесь для более стабильного горения потребовалось установить на поде топки вытесняющую призму 1 из шамотного кирпича. В подобной схеме, но менее мощного котла КЕ-4-14 ОСВ Барнаульского МЭЗ с шурующей планкой горение лузги было стабильным. Реконструкция котла КЕ-6,5-14 в п. Бутурлиновка на сжигание лузги в вихревой топке радиального типа с горизонтальной осью вращения обеспечила более высокую стабильность [16].

При пуске котла Е-16-21-350 ГМДВ Урюпинского МЭЗ с удлиненной горизонтальной топкой и повышенной степенью экранирования возникли наибольшие проблемы [90, 44]. В дальнейшем эта схема не применялась. Из-за переохлаждения топочного объёма экранами, заваливания спёками золы сопел нижнего дутья, распределённых по большой длине

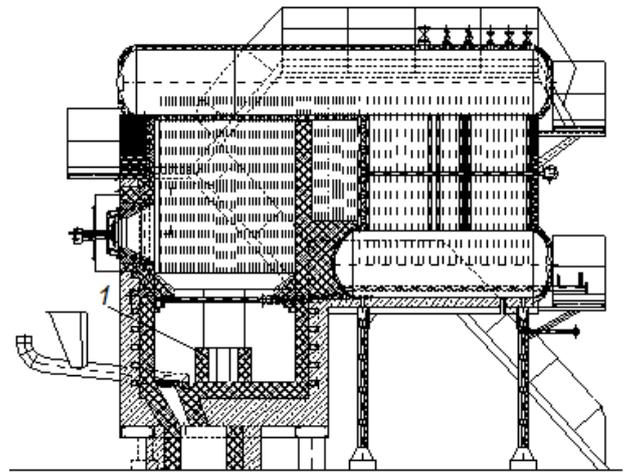


Рисунок 2.19 – Котел КЕ-10-14 ОГВ

топки, при плохой настройке аэродинамики на наклонной части экранов формировались скопления несгоревшей лузги. Скопления периодически обрушались, взбивались потоками дутья, резко вспыхивали, вызывая большие пульсации давления и снопы искр уноса. ГОО большого диаметра, выполненное в виде фестона без центрального сопла дожигающего дутья слабо задерживало унос и его горение распространялось до золоуловителя.

Из-за наличия значительной маслянистости лузга смачивалась смолистыми выделениями и первоначально рыхлые скопления лузги слипались, далее под действием высоких температур коксовались с образованием иногда даже прочных коксовых отложений на трубах экранов. Работа топки характеризовалась плохим охлаждением, теплопередача оказалась примерно в два раза ниже расчетной, но из-за перегрева в локальных очагах горения появилась значительная возгонка золы и её

прочные отложения в пароперегревателе и первом котельном пучке, требовалась частая очистка котла с его остановом [44].

В итоге первоначально очевидное преимущество высокотемпературного сжигания лузги в неохлаждаемых вихревых топках, заключающееся в глубоком выжигании горючих при слабом удержании частиц в камере сгорания только пережимом, предопределило широкое распространение выполненных из кирпича вихревых камер сгорания. Они устанавливались под типовыми водотрубными котлами КЕ, ДКВр и другими, с переводом их с газа, мазута или угля на сжигание лузги. Реконструкцию котлов по такой схеме с различными вариациями стали проводить монтажные предприятия в разных регионах страны.



Рисунок 2.20 – Неэкранированная вихревая топка для сжигания лузги.

Вверху: *слева* – внешний вид; *справа* – нижняя часть топки, видны сопла вторичного дутья. Внизу: *слева* – вид из топки на ГОО; *справа* – вид на ГОО из камеры дожигания

В качестве примера на рисунке 2.20 представлены фотографии котла КЕ-10-1,4 в котельной МЭЗ в г. Сальске Ростовской области. Под блоком котла выполнена кирпичная ВТ с вертикальной осью вращения, пережимом и пневматической подачей лужги. В вихревой топке котла обеспечивалось хорошее выжигание горючих. Обратной стороной неэкранированной топки является высокий уровень температур, при котором большая часть золы выносится из топки в газообразном либо расплавленном виде и осаждается в конвективных пучках. Котлу требовалась еженедельная остановка и расхолаживание для очистки от отложений золы. В дальнейшем котел был реконструирован с установкой низкотемпературной вихревой топки «Торнадо», тем самым была обеспечена возможность малозатратной, длительной безостановочной работы котла [91].

Рассмотренные вихревые топки пригодны для установки в котлах малой и средней мощности благодаря простоте. Пережим на выходе даёт четко выраженный циклонный эффект, позволяют удерживать частицы в виде вращающегося слоя, обеспечивая устойчивое горение и экономичность топочного процесса. Однако неохлаждаемые топочные камеры работают при повышенных температурах, что приводит к интенсивной возгонке золы, шлакованию котлов и повышенной эмиссии NO_x и субмикронных опасных для здоровья золовых частиц в уходящих газах. Для уменьшения этих негативных явлений, топочный процесс должен быть низкотемпературным.

2.5 Анализ схем организации низкотемпературного сжигания

Необходимость разработки схем низкотемпературного сжигания лужги подсолнечника связана с тем, что эта лужга имеет значительную возгонку минеральной части и интенсивно формирует натрубные отложения в топке и котельных пучках.

Для лужги зерновых культур менее характерно золовое загрязнение конвективных поверхностей нагрева, однако шлакование топочной камеры может быть интенсивным. По имеющемуся опыту сжигание овсяной и просяной лужги часто сопровождается спеканием осевшего на поде топки слоя золы.

Оценку свойств золы на шлакуемость принято проводить с учетом температуры t_A , t_B и t_C – начала деформации, размягчения золы и жидко-плавкого состояния соответственно, однако для биотоплив, во-первых, практически нет таких справочных данных, а во-вторых поведение золовых компонентов в реальном топочном процессе гораздо сложнее. Многокомпонентный состав золы и газовой среды вокруг горячей частицы приводит к формированию условий и химических реакций, при которых плавление и испарение компонентов может происходить и при значительно более низких видимых температурах в топочной камере. Подробнее процессы превращения золы рассмотрены в следующей главе.

Опыт эксплуатации котлов на подсолнечной лузге показывает, что температуру на выходе из топочной камеры следует принимать на уровне 1000°C .

Достижение требуемой температуры в ВТ может обеспечиваться разными способами. Традиционно [7] температура на выходе из топочной камеры котла рассчитывается по эмпирическим критериальным уравнениям. Она зависит от тепловосприятия экранов топочной камеры и адиабатической температуры, являющейся функцией теплоты сгорания топлива, температуры и избытка воздуха и доли рециркуляции.

Таким образом, в проектируемой вихревой топке требуемая температура может быть обеспечена несколькими способами:

- выносом избыточного тепла подачей сверх требуемого для горения воздуха;
- рециркуляцией дымовых газов;
- выносом части тепловыделения из топочной камеры (организация двухкамерного сжигания) за счет недостаточной подачи дутья в ВТ и дожигом продуктов неполного сгорания за ГОО.
- тепловосприятием топочных экранов (традиционный в котлостроении);

Кроме того, технологические схемы и конструкции котлов и ВТ могут предусматривать комбинированное использование перечисленных способов.

Сравнение эффективности этих способов ранее выполнялось [16] для котлов первого поколения. Исследователи пришли к выводу о наибольшей эффективности охлаждения топочной среды за счет тепловосприятия топочных экранов.

Ранее сделанные выводы следует уточнить с учетом изысканий текущей работы, основанных на промышленных испытаниях рассчитанных схем.

– Снижение температуры за счет подачи избыточного дутья ($\alpha_1 \sim 2,5$) легко осуществимо, но значительно снижает КПД котла и увеличивает затраты электроэнергии на привод ТДМ.

– Снижение температуры за счет рециркуляции дымовых газов и почти не снижает КПД котла. Недостатками этой схемы являются повышение эксплуатационных затрат на привод дымососа рециркуляции и увеличение аэродинамического сопротивления конвективных поверхностей нагрева котла из-за увеличившегося расхода. Требуется более высокая культура обслуживания оборудования во избежание возможных утечек продуктов сгорания в помещение котельной. Кроме того, способ не рекомендуем ввиду многократного повышения интенсивности возгонки золовых компонентов в восстановительной среде, что усугубляется шлакование котлов.

– Двухкамерное сжигание с выделением 50-80 % тепла внутри топочной камеры и дожиганием оставшихся компонентов за ГОО. Такая двухступенчатая схема обеспечивает снижение температуры и эмиссии оксидов азота, но имеет значительные недостатки. Практическая реализация способа затруднена в части организации полного дожигания продуктов неполного сгорания за ГОО, требуется значительный объем камеры ввиду относительно низкой скорости протекания реакции. Также практический опыт показал интенсификацию шлакованием камеры дожигания и первых по ходу конвективных пучков ввиду усиления процесса сублимации золовых компонентов в восстановительной среде камеры сгорания. Это наиболее характерно для подсолнечной лузги, и для нее двухкамерное сжигание не рационально.

– В котлах типовых конструкций (КЕ-4, ДКВр-4; КЕ-6,5, ДКВр-6,5; КЕ-10, ДКВр-10 и др.) со встроенными в их топочный объем ВТ первого поколения, образованных путем разделения огнеупорной перегородкой с газовыпускным окном на вихревую камеру сгорания и камеру дожигания, достижение температуры низко-

температурного топочного процесса за счёт теплосъёма оставшаяся в камере сгорания половина топочных экранов, позволяет её (900...1100°C) обеспечить только при избытках воздуха $\alpha_l=1,5...1,8$.

Использование полностью экранированных вихревых топков «Торнадо» [24, 92] показало возможность организации низкотемпературного топочного процесса в полностью экранированных ВТ «Торнадо» при оптимальных избытках воздуха $\alpha_l=1,2-1,4$ [7].

По уточненной методике выполнен сравнительный тепловой расчет котлов с ВТ на подсолнечной лузге для разной площади лучевоспринимающей поверхности в вихревой топке, от 5 до 35 м² (с шагом 5 м²) (Рисунок 2.21). Выполнение вихревой топки с такой поверхностью нагрева технически осуществимо и не представляет трудностей. Экранирование стен вихревой топки с лучевоспринимающей поверхностью 5...35 м² снижает температуру на выходе из топки от адиабатического значения до 1198...927°C соответственно (Таблица 2.1). Коэффициент полезного действия при этом изменяется в пределах долей процента (Рисунок 2.22). Площадь экранирования в реализованных котлах с ВТ «Торнадо» такой мощности ~ 25 м².

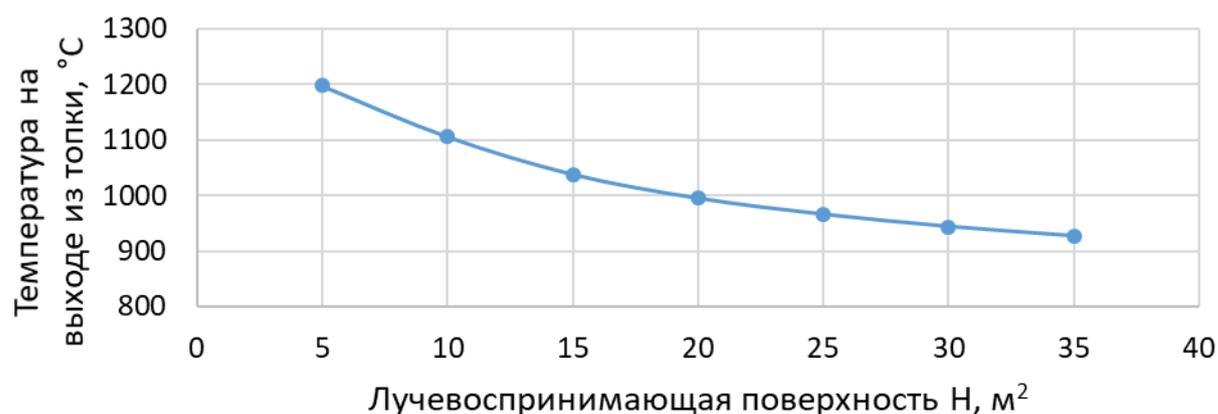


Рисунок 2.21 – Влияние площади лучевоспринимающей поверхности нагрева на температуру на выходе из топки

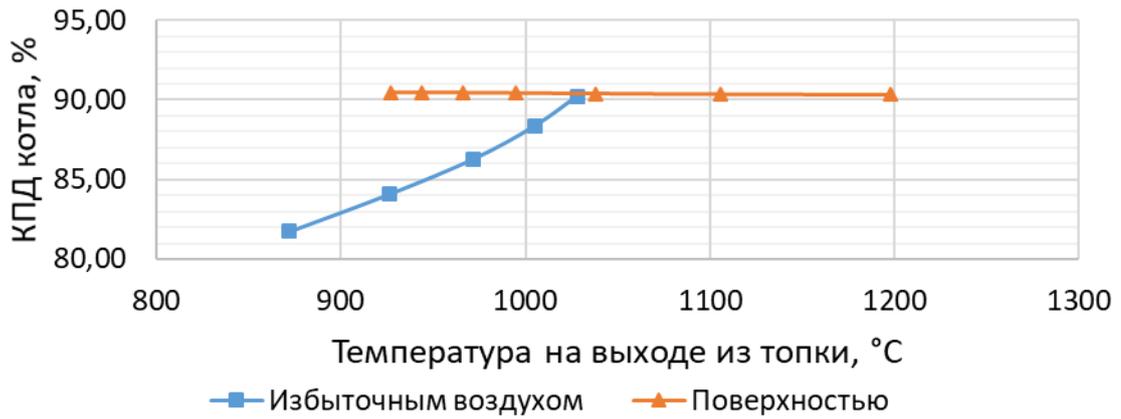


Рисунок 2.22 – Влияние схемы организации НТВС на КПД

Для вновь изготавливаемых котлов этот путь наиболее приемлем и соответствует современной технологии изготовления котлов из газоплотных мембранных панелей с легкой натрубной изоляцией. Газоплотность уменьшает неорганизованные присосы в газовый тракт котла, предотвращая избыточные потери тепла с уходящими газами, а отсутствие обмуровки в зонах высоких температур повышает надежность.

Таблица 2.1 – Результаты теплового расчета котла Е-6,5-1,4 с экранированной вихревой топкой

Лучевоспринимающая поверхность	Н, м ²	5	10	15	20	25	30	35
Температура на выходе из топки	Т', °C	1198	1106	1038	995	966	944	927
КПД котла	η, %	89,32	89,35	89,39	89,41	89,43	89,43	89,44
Удельная тепловая нагрузка тепловоспринимающей поверхности	кВт/м ²	213	143	109	88	74	63	56

Исходя из анализа технологий вихревого сжигания и поведения минеральной части луги (см. п.1.9), автор считает наиболее предпочтительным для сжигания использовать вихревой топочный процесс в циклонных камерах с пережимом и

ГОО, обеспечивающим хорошее удержание частиц. Причем топочный процесс должен быть непременно низкотемпературным с твердым шлакоудалением и проводится в экранированных вихревых топочных камерах со ступенчатой подачей дутья. Распределение дутья необходимо осуществлять с учетом минимизации пребывания коксозольного остатка в восстановительной среде. Эти принципы легли в основу дальнейшей разработки и производства новых котлов, действующих по технологии «Торнадо».

2.6 Разработка конструкции вихревых топков «Торнадо»

При разработке конструкций вихревых топочных устройств камеры сгорания необходимо рассматривать в составе всего комплекса, включая ГОО, системы подачи дутья, топлива, удаления шлака и обеспечения низкотемпературного режима сжигания.

Камеры сгорания и дожигания, классификация и компоновка

В процессе исследования было выделено и запатентовано несколько принципиальных схем компоновки вихревых топков (камер сгорания и дожигания) (Рисунок 2.23).

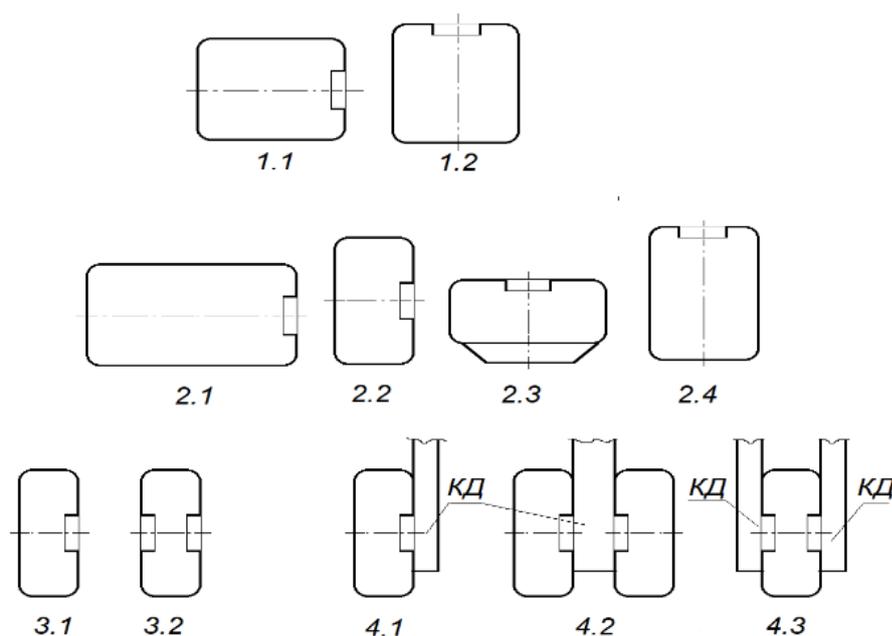


Рисунок 2.23 – Рассматриваемые схемы вихревых топочных устройств

Принципиальные схемы по ориентации оси вихря, геометрии и взаимной компоновке элементов (Рисунок 2.23):

- по ориентации оси вихря, с горизонтальной [84, 85, 93 и 94], схема 1.1 и с вертикальной [88, 95 - 97], схема 1.2, осью вращения;
- по геометрии, удлинённые камеры [88, 95 - 97], схемы 2.1 и 2.4 и узкие, радиальные камеры [84, 85, 93 и 94], схемы 2.2 и 2.3, определенные настоящим исследованием как более эффективные;
- по числу выходов, с односторонним [90 и 91], схема 3.1 и с двухсторонним [93], схема 3.2 выходом;
- по взаимной компоновке радиальных камер горения и камер дожигания (КД): одна вихревая топочная камера с односторонним выходом в одну КД, схема 4.1, дубль топка с двумя топочными камерами с односторонним выходом [85] и одной общей КД, схема 4.2, одна вихревая топочная камера с двухсторонним выходом в две КД, [93] схема 4.3.

При рассмотрении вихревых топочных устройств, как изобретения, полезно ввести понятие «идеальной вихревой топки» – экологически эффективной низкотемпературной ВТ со ступенчатой подачей дутья, которая удерживает до полного сгорания горящие частицы топлива с заполнением её объёма изотермическим вращающимся потоком циркулирующих частиц. По эффективности работы такая топка близка к схеме с циркулирующим кипящим слоем. Можно сказать, что именно разработанный класс вихревых топок промышленно применяющийся под наименованием «Торнадо» [25, 89, 91, 92, 98] наиболее близок к этому определению.

Для систематизации накопленного опыта разработки котлов с вихревыми топками предлагается данная классификация. Среди современных разработок именно топки «Торнадо» имеют принципиально новую, простую и привычную в эксплуатации, но низкотемпературную изотермическую схему [92]. Благодаря интенсивной внутритопочной циркуляции горящих частиц и золы по показателям эффективности топка «Торнадо» аналогична ЦКС технологии. Однако, в отличие от топок ЦКС, в ВТ «Торнадо» нет крупногабаритных циклонов, сложной системы

возврата циркулирующих частиц и донного слоя с большой массой частиц, склонного к спеканию и вызывающего изнашивание в нижней части ЦКС.

Кроме того, донный слой требует больших затрат растопочного топлива для стартового прогрева и больших затрат электроэнергии на привод высоконапорных вентиляторов, значительной высоты и площади, не участвующих в теплообмене ограждающих слой экранов, закрытых обмуровкой, которые заметно увеличивают габариты котла ЦКС [99]. У схемы «Торнадо» нет ограничений по нижней границе, разработаны котлы с паропроизводительностью $D=1$ /час.

Технология «Торнадо» пригодна не только для создания новых, но и для реконструкции имеющихся котлов. Она комплексно решает проблемы организации безшлаковочного, экономически и экологически эффективного топочного процесса и по опыту пригодна для применения, в том числе совместного, широкого круга топлив: от биотоплив, Вio-1, Вio-2 и Вio-3 [100], до углей, включая нерасчетные и углесодержащие отходы при простой системе подготовки топлива. За счёт интенсификации аэродинамики и теплообмена вихревые топки «Торнадо» легко вписываются в топочные объёмы существующих котлов, причём габариты котлов могут, типично на 10...30%, быть снижены с соответствующим уменьшением стройчасти котельного цеха ТЭЦ [100, 101].

Подача топлива и первичного дутья

Топки «Торнадо» универсальны по видам сжигаемого топлива. Согласно имеющемуся опыту для лузги, опилок и других мелких частиц наиболее удобно применять пневмотранспорт, вдув топлива вместе с первичным воздухом. Топливо и газы могут двигаться (Рисунок 2.24) 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: O_2 , продуктов сгорания, частиц топлива и золы.

Практически основными можно считать три варианта ввода (Рисунок 2.24):

- сверху, вдоль потолка топки в сторону заднего экрана;
- снизу вдоль пода топки в сторону заднего экрана;
- вдоль фронтального экрана сверху вниз.

Расположение точки ввода влияет на топочный процесс, а заложенные при проектировании это и другие технические и компоновочные решения сказываются на дальнейшей эксплуатации котла и даже на строительной части котельной.

В вихревой топке «Торнадо» организуется факельно-слоевое сжигание. В этой связи необходимо рассматривать взаимодействие струй первичного дутья с подовым факелом. Приближение точки ввода к слою способствует ускорению этапов сушки и выхода летучих. Отдаление – затягиванию стадий, большей изотермичности топочной камеры, снижению формирования оксидов азота.

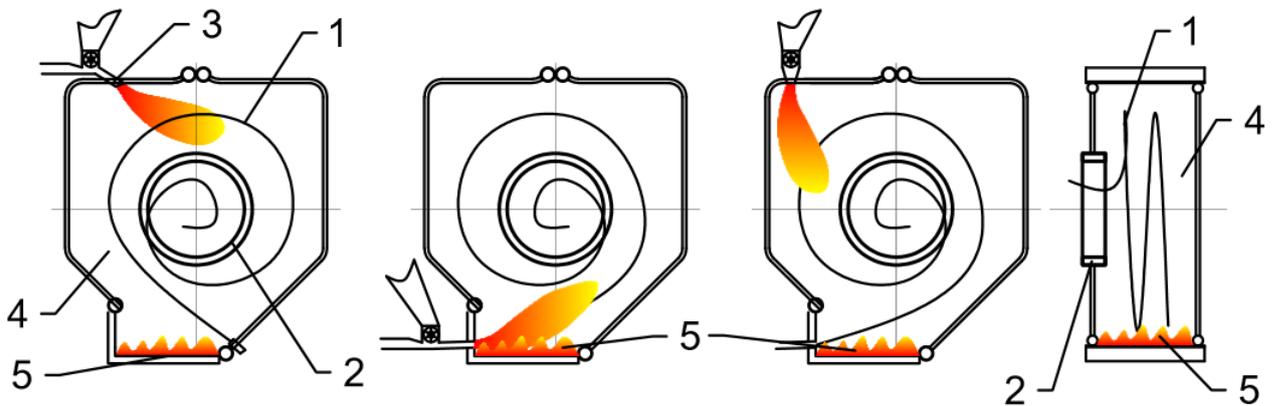


Рисунок 2.24 – Схемы ввода топлива в вихревую камеру

Помимо рассмотренных схем ввод измельченного топлива, например, щепы, угля, может быть выполнен питателем, забрасывателем, шурующей планкой, цепной решеткой прямого хода и т.д.

Подача дутья и организация топочного процесса

Струйная подача через сопла дутья в вихревую камеру в наибольшей степени влияет на формирование вихревого образования в топке. Помимо тангенциального расположения относительно тела вихря сопла могут иметь отклонение вдоль оси вихря. Это влияет на заполнение топки и внутреннюю циркуляцию потоков, необходимую для удержания частиц и стабилизации горения. В целом желаемая картина аэродинамической обстановки, как видно из примеров запатентованных котлов, приведенных на рисунках 2.25, 2.26 и 2.29, предопределяет не только геометрию топочного объема, но и профиль проектируемого котла.

В котле 1 (Рисунок 2.25) радиальная вихревая камера сгорания 2 с ГОО 12 установлена над слоевой топкой 3 [84]. Она имеет сопла 17 дожигающего дутья и сопла 13 вторичного дутья, которые ориентированы тангенциально, к условному телу вихря 14 и направлены по ходу вихря, преимущественно вниз, и это позволяет формировать горячий вихрь с горизонтальной осью, проходящей через ГОО 12. Вихрь 14 активизирует горение слоя 4, очищается за счет центробежных сил от уносимых частиц, а направленное вниз вторичное дутье отбрасывает эти частицы на слой, обеспечивая искровое зажигание топлива в слое 4 [84].

При работе котла 1 топливо дозируется питателем 7 из расходного бункера 8 котла на наклонный колосник 5 слоевого топочного устройства 3. Здесь слой 4 по мере движения проходит стадии сушки, выхода летучих, воспламенения, выгорания и цепной механической решеткой 6 сгружается в тракт 9 выгрузки золы. Крупные частицы сжигаются в слое 4 в потоке первичного дутья, которое подается через колосники 5 и 6, и поддерживают горение в вихре 14

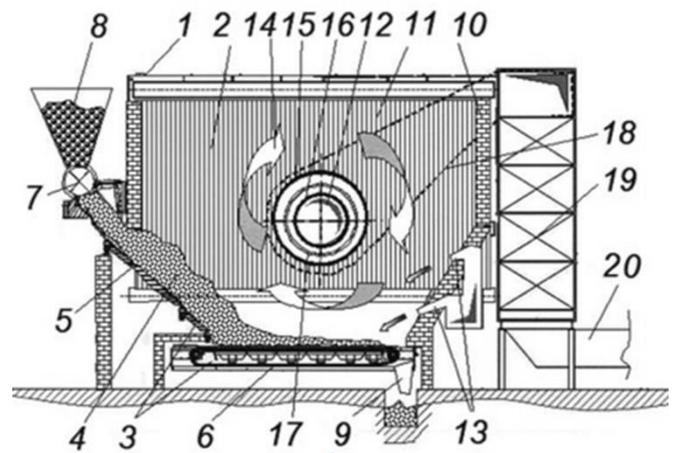


Рисунок 2.25 – Котел с радиальной топкой, схема 2.2 [84]

выносом из слоя 4 частиц и летучих. Вихрь 14 поддерживает и активизирует (раздувает) горение слоя 4 сверху, обеспечивает искровое зажигание свежего топлива. Обмуровка 10 части стен повышает температуру и скорость горения в топке [84].

Вихрь 14 имеет двухсторонний выход в два ГОО 12, установленные на боковых экранах 11, и они обеспечивают его симметрию и устойчивость. Горячие частицы кокса попадают в зону богатого кислородом дожигающего дутья, которое подается через кольцевое сопло 17 и быстро догорают внутри ГОО 12. Выделяющееся от сгорания топлива тепло воспринимается теплоносителем в экранах 11, а продукты сгорания через ГОО 12 по газоходам 18 поступают на охлаждение в конвективный газоход 19 и затем удаляются из котла по патрубку 20 [84].

Рассмотренное в этом примере комбинированное топочное устройство 3 включает наклонный колосник 5 и цепную механическую решетку 6 прямого хода. Такое устройство подходит для сжигания высокорекреационных топлив с высокой влажностью (торф, сырые опилки и КДО), позволяет увеличить экономичность и экологические характеристики котла. За счет равномерного заполнения топки 2 горящим вихрем 14 с потоком излучающих частиц создает интенсивный тепло- и массообмен и обеспечивает глубокое выгорание горючих компонентов топлива. Слое-вое топочное устройство 3 выбирается по характеристикам топлива [84, 98].

Второй пример [95] дан на рисунке 2.26. Слойовой котел 1 имеет вихревую камеру сгорания 2, ограниченную обмуровкой 3, боковыми 4 и потолочным 5 экранами. Сопла 15 и 16 формируют вихрь, показанный условно стрелками 18 и 19 с вертикальной осью 17, выходящий из камеры 2 через ГОО 6 с соплами 23 дожигающего дутья. Вторичное и дожигающее дутье к соплам 15, 16 и 23 подается вентилятором 21 вторичного дутья по воздуховодам 20, и при этом установка сопел 15, 16 ярусами упрощает их подключение.

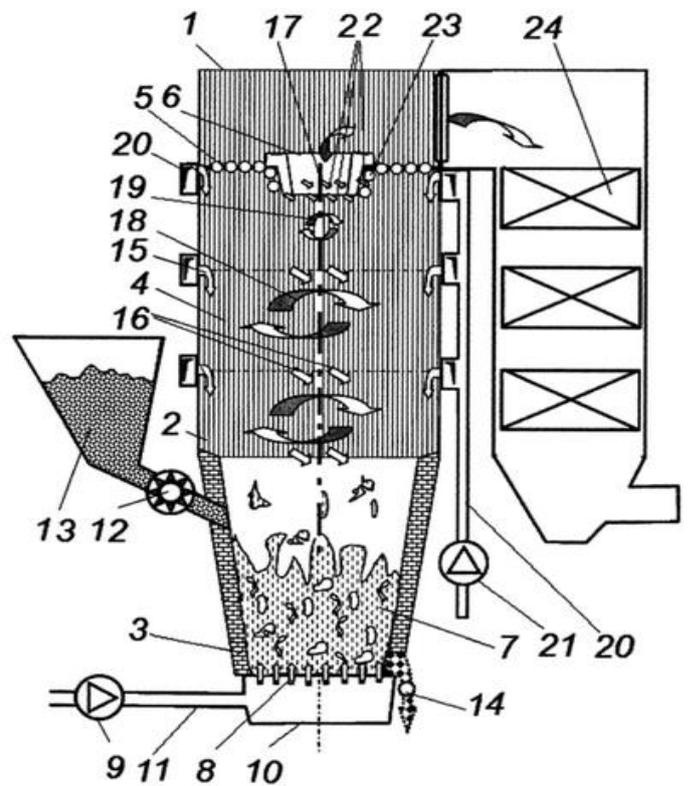


Рисунок 2.26 – Котел с вертикальной топкой, схема 1.2 [95]

Слое-вое топочное устройство выполнено в виде топки 7 кипящего слоя (КС) поддерживаемого воздухораспределительной решеткой 8, которая служит для раздачи первичного дутья, подаваемого вентилятором 9 по воздушному коробу 10 и воздуховодам 11. КС приспособлен для дроблёных углей, щепы, КДО и др, включает питатель топлива 12 с бункером 13 и тракт 14 выгрузки золы.

При работе на лузге, пылевидном топливе и других легко уносимых частицах топливо в вихревую топку 2 согласно [95] предлагается подавать пневматическим эжектором 25 или через горелку 28 (Рисунки 2.27 и 2.28), например, из мельницы 27 вентилятором 9. Топливоздушные струи из горелки 28 и эжектора передают импульс вихрю 18, а топливо непрерывно поступает в слой 7 и поддерживает в нём стабильное горение, а по реверсивной схеме и в камере 2.

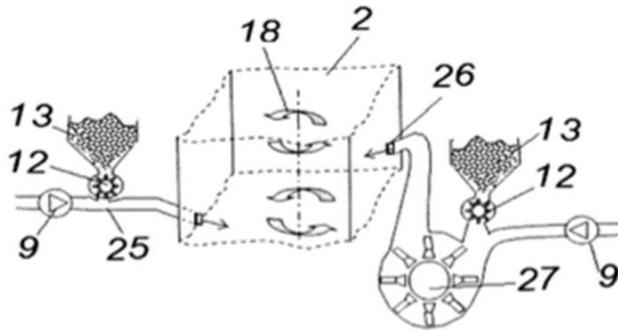


Рисунок 2.27 – Котел с тангенциальной подачей легко уносимых частиц топлива

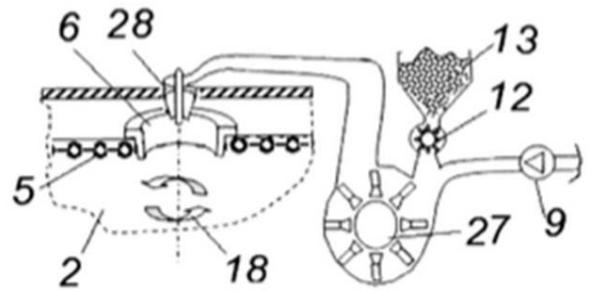


Рисунок 2.28 – Котел с подачей через ГОО легко уносимых частиц топлива

В [85] предложен часто применяемый для утилизации лузги котел 1 с двухкамерной вихревой топкой (Рисунки 2.29 и 2.30). Котёл имеет две радиальные вихревые камеры 2 сгорания с соплами 3 вторичного дутья и эжекторами 4 подачи основного топлива и первичного дутья, которые направлены тангенциально к вихрю 5 с горизонтальной осью, проходящей через ГОО 6 в камеру 7 дожигания. ГОО 6 выполнены в виде выступающих в вихревые камеры 2 сгорания кольцевых воздухопроводов 8. На их торцевых поверхностях расположены группы тангенциально ориентированных, направленных в вихревую камеру 2 патрубков, условно показанных стрелками 9, через которые струями подается встречно выходящему вихрю 5 закрученный поток дожигающего дутья.

Камеры 2 образованы боковыми панелями 10 и расположенными между ними изогнутыми экранами 11. Экраны 11 отогнуты в виде описанного вокруг условной окружности 12 многоугольника, что обеспечивает активную аэродинами-

ческую обстановку, интенсивный срыв рыхлых первичных отложений золы с топочных экранов, их чистоту и эффективный топочный процесс без застойных зон. В вихревой камере 2 установлены горелки 13, аппараты 14 золоочистки, а также слоевое топочное устройство, в данном случае топка 15 ретортного типа со слоем 16, подключенная шнеком 17 подачи топлива к бункеру 18 резервного топлива (угля) и к узлу 19 выгрузки золы. В состав котла входят бункер основного топлива 21 с питателями 22, вентиляторы 23 и другое оборудование котельной. Кроме того, в котле имеются трубы 24 конвективных поверхностей нагрева [85].

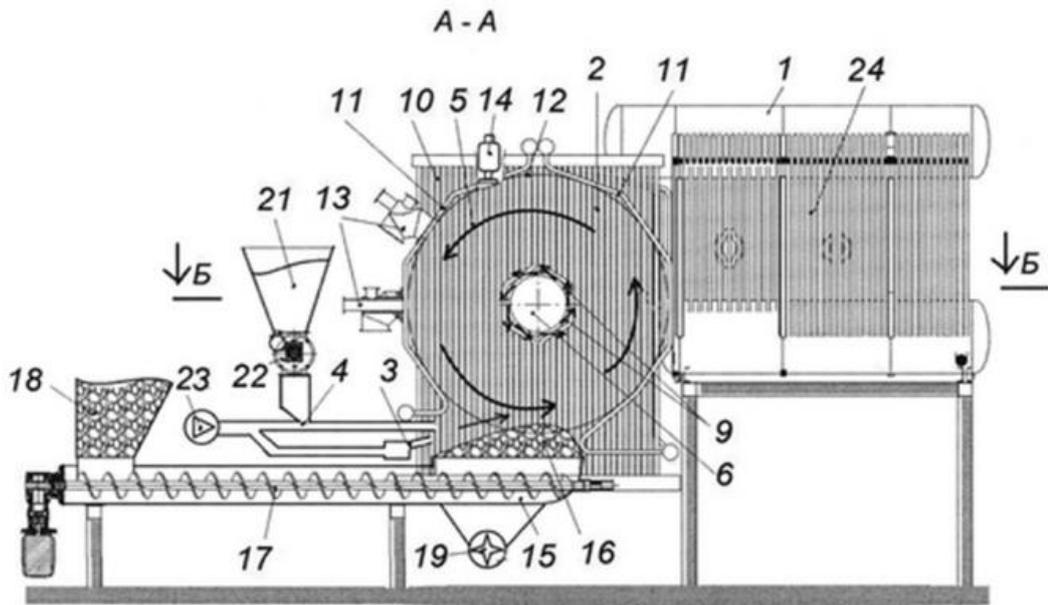


Рисунок 2.29 – Продольный разрез котла [85]

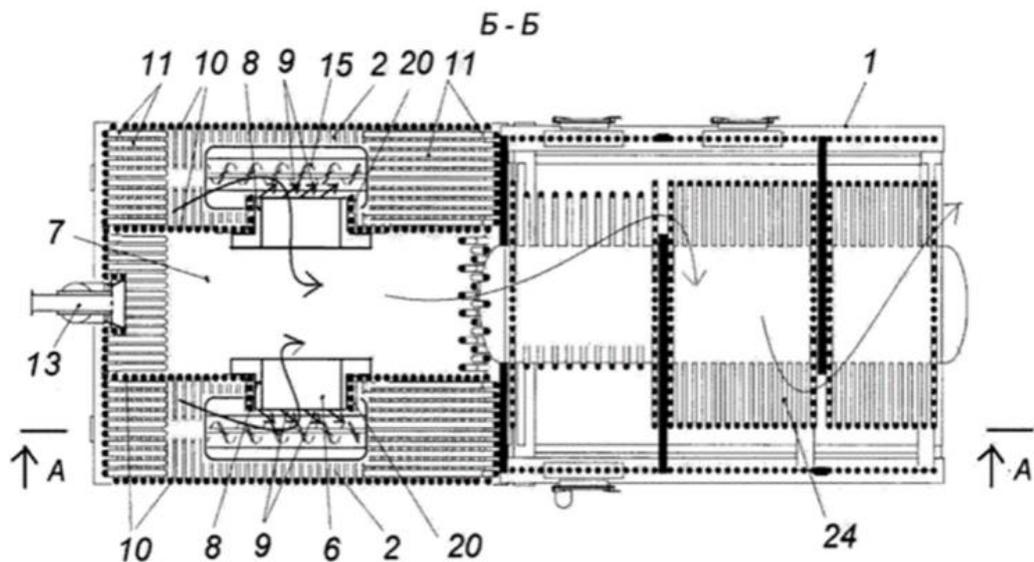


Рисунок 2.30 – Горизонтальный разрез котла [85]

При работе котла 1 благодаря вращению вихря 5 в вихревых камерах 2 осуществляется центробежное удержание и интенсивное выгорание топлива при активной аэродинамической обстановке со срывом отложений золы с топочных экранов, что поддерживает их чистоту и обеспечивает эффективный теплосъем [85].

В котле 1 может использоваться несколько видов топлива. Основное топливо вентилятором 23 подается с первичным воздухом эжекторами 4 и дозируется питателями 22 из бункера 21. Вспомогательное или растопочное топливо (газ или жидкое) сжигается с помощью горелок 13, которые могут располагаться как в вихревых камерах 2 сгорания, так и в камере 7 дожигания, причем установка горелки 13 в камере 7 дожигания защищает ее от высокотемпературного воздействия топочной среды. Резервное топливо (уголь) дозировано подается из бункера 18 шнеком 17 и горит в слое 16 ретортной топки 15 в потоке первичного воздуха. Одновременно ретортная топка 15 удаляет через узел 19 выгрузки золы всю образующуюся золу, в том числе сбиваемую с топочных экранов 10 и 11 с помощью аппаратов 14 золоочистки за счет струйного или ударного воздействия [85].

Слоевые топочные устройства и колосники

Слоевые топочные устройства, применяемые в вихревых топках, относятся к наиболее важным элементам котла и выполняют следующие функции:

- розжиг и разогрев топки за счет горения топлива в слое на колоснике;
- стабилизацию горения, высокую маневренность топки и котла;
- вывод золы из топочной камеры, снижение её возгонки и шлакования;
- подачу топлива и предотвращение образования куч горячей лужги.

Первые образцы котлов на лужге с вихревыми топками не имели слоевого топочного устройства. Это затрудняло их эксплуатацию, приводило к формированию куч тлеющей лужги в топочной камере, сложной и длительной растопке, значительным пульсациям факела при работе. Длительное пребывание золы в зоне высоких температур в свою очередь усиливало возгонку и миграцию золовых отложений. Отсутствие шуровки слоя и механизированного вывода золы приводило к спеканию золы с образованием крупных и прочных агломератов.

Горящий на колоснике слой топлива, лужги стабилизирует горение за счет подсветки вихревого факела, предотвращает образование тлеющих куч, снижает химический и механический недожог, а также положительно влияет на тепловосприятие экранов топочной камеры (Рисунок 2.31). Опыты проводились на котле Е-20-1,5-360. Прикрытие слоевого дутья повышает химический недожог на выходе из вихревой топки. Чрезмерная подача слоевого дутья также ухудшает этот показатель из-за большого выноса частиц из слоя в вихревой факел.

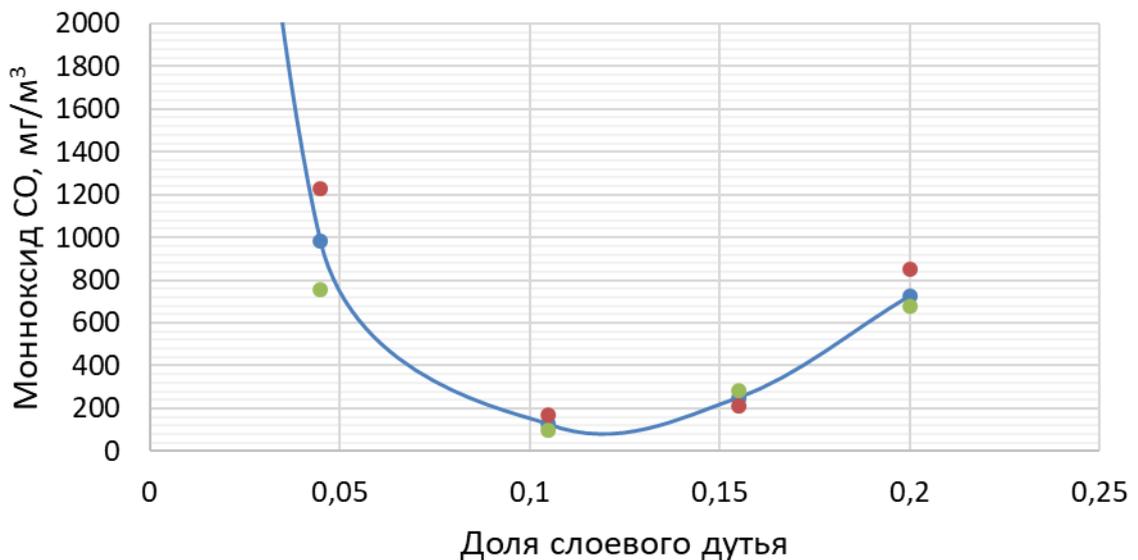


Рисунок 2.31 – Влияние слоевого дутья на содержание СО на входе из топки котла. Е-20-1,5-360 подсолнечная лужга

Влияние слоя на топочный процесс всегда значительно, например, даже удержание горящего непродуваемого слоя в углублении под зоной ввода топливовоздушной струи, по схеме с нижним вводом (см. рисунок 2.24), не только стабилизирует горение, но и в разы [91] снижает эмиссию вредных выбросов СО и NO_x (Рисунок 2.32). Затененные значки соответствуют работе топки при наличии слоя.

Согласно патентам [84, 85, 95] ВТ «Торнадо» может оснащаться рациональным для каждого топлива топочным устройством, в том числе:

- топкой с поворотными колосниками и пневмомеханическим забросом;
- топкой с цепной механической решеткой прямого хода, при встречном её ходе по отношению к току вихря;

- топкой с цепной механической решеткой обратного хода и пневмомеханическими забрасывателями топлива при ходе её встречно вихрю;
- топкой высокотемпературного кипящего слоя с узкой, установленной наклонно цепной механической решеткой при ходе её встречно вихрю;
- переталкивающей решеткой при её рабочем ходе встречно вихрю;
- топкой с шурующей планкой при рабочем ходе её встречно вихрю;
- ретортной топкой;
- топкой с наклонным колосником, причем с его наклоном встречно вихрю;
- топкой с цепной механической решеткой прямого хода и предвключенным наклонным колосником, причем ход механической решетки направлен встречно;
- топкой с шурующей планкой и предвключенным наклонным колосником, причем рабочий ход шурующей планки направлен встречно вихрю;
- топкой с цепной механической решеткой прямого хода и предвключенной ретортной топкой, причем со встречным ходом решетки;
- топкой с шурующей планкой и предвключенной ретортной топкой, причем рабочий ход шурующей планки направлен встречно;
- топкой с переталкивающими колосниками и предвключенной ретортной топкой, причем рабочий ход колосников направлен встречно вихрю;
- топкой кипящего слоя, имеющей воздухораспределительную решетку;
- топкой кипящего слоя с площадью, меньшей площади основания вихревой камеры сгорания, установленной с заглублением и смещенная от оси вихря.

Поскольку горящая лужга не образует шлаковую подушку, использование не охлаждаемых металлических колосников в качестве слоевой решетки ненадежно. Колосники, незакрытые слоем шлака, перегреваются от излучения факела, коробятся и прогорают, необходимо использовать специализированные механизмы.

Опыт эксплуатации показывает, что простыми и надежными являются серийно производимые механизированные топочные устройства на основе охлаждаемой водой колосниковой решетки с шурующей планкой. Установленные между

трубами чугунные колосники надежно защищены от перегрева и исправно работают без износа на протяжении всего срока службы котла. Шурующая планка обеспечивает шуровку слоя и выгрузку золы с пода вихревой топки.

Таким образом, в ходе работы были реализованы и прошли промышленные испытания в различных вариантах, включая рассмотренные [84, 85, 95] (см. рисунки 2.25...2.30) обладающие промышленной применимостью, новизной и изобретательским уровнем инновационные разработки, которые являются решением поставленной задачи – создания топок и твердотопливных котлов на их основе, с повышенными экономическими и экологическими показателями. Причем котлов, универсальных по топливам, с рациональными слоевыми топочными устройствами

для большинства из применяемых топлив, в том числе и трудно сжигаемой лузги подсолнечника.

2.7 Моделирование вихревых топочных камер

При проектировании и наладке котлов и вспомогательного оборудования применение теоретических исследований, основанных в том числе на математическом моделировании, выполняемом в пакетах прикладных программ, с алгоритмами, основанными на физических законах позволяет ускорить проектирование повысить его качество, заменяя и дополняя нормативные эмпирические методики.

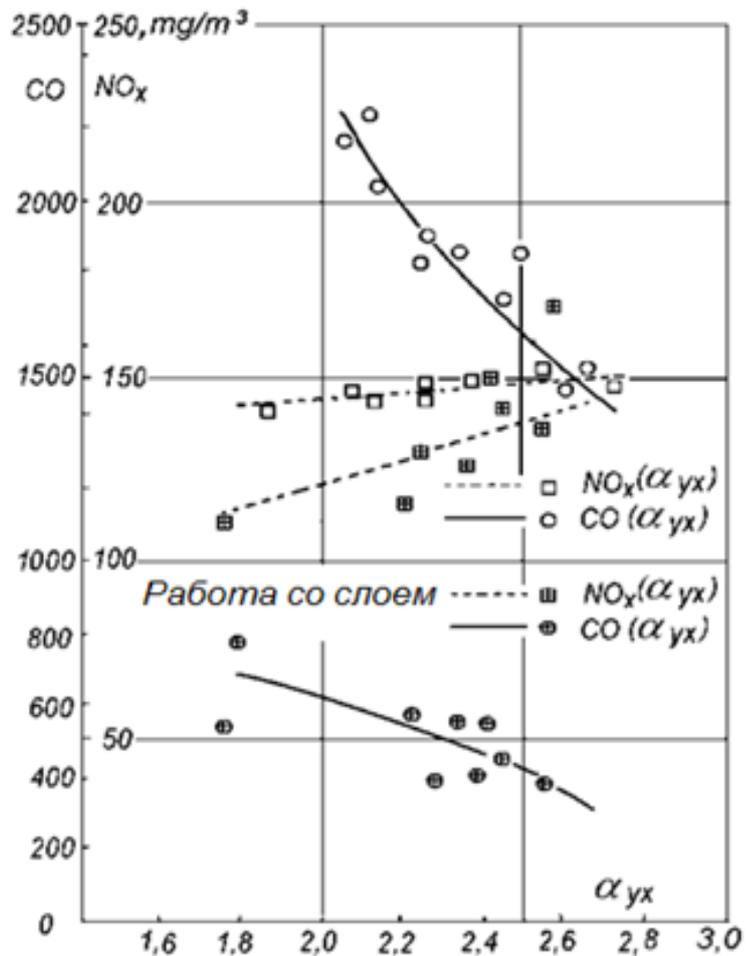


Рисунок 2.32 – Влияние слоя на эмиссию CO, NO_x [101].

Несмотря на прогресс в вычислительных программах и доступности вычислительных мощностей, адекватное численное моделирование невозможно без дополнительной эмпирической информации, получаемой на основе физического моделирования. При этом информации о процессах, проходящих в котлах, сжигающих неэнергетические топлива, в открытых источниках недостаточно. В этой связи наряду с натурными испытаниями важная роль отводилась также лабораторному моделированию, методы которого позволяют исследовать и оптимизировать исследуемый объект с минимальными затратами.

Совместное использование нормативных расчетов, математического моделирования, натурального эксперимента и промышленных теплотехнических испытаний пилотных образцов дает возможность получить наиболее полную и достоверную информацию, необходимую для разработки котлов с вихревыми топками.

Физическое моделирование аэродинамики вихревых камер проводилось в «ПроЭнергоМаш-Проект» с целью улучшения их геометрии для повышения удержания витающих частиц и разработки конструкций, пригодных для технологий, применяемых предприятием при изготовлении паровых и водогрейных котлов.

Типично в промышленности для организации циклонного эффекта и удержания или улавливания частиц используются цилиндрические камеры и циклонные элементы [61, 102, 103, 104]. При этом промышленное изготовление вихревых топок цилиндрической формы, без углов, при этом вписанных в транспортные габариты поставочных мест весьма затруднено. Проведенные исследования на физических моделях показали возможность достаточного удержания частиц в различных вариантах многоугольных призматических камерах при наличии сужения в виде ГОО [91, 101].

Продувки моделей первых вихревых топок проводились в исследовании [16] (см. рисунок 2.17). Камера, как уже описывалось выше, имела форму прямой восьмигранной призмы с основанием в виде правильного восьмиугольника [16]. Такой профиль топки можно достаточно легко изготовить как кладкой из шамотного кирпича прямоугольной формы или путем сочленения газоплотных экранов гибями в 135° для охлаждаемой камеры. Моделирование показало возможность организации

надежного удержания сыпучего материала (древесные опилки) в вихревой камере восьмиугольной формы [16].

Дальнейшие исследования проводились для сечений с четырьмя, пятью, шестью углами с правильной и неправильной геометрией и различным отношением глубины к условному диаметру ($V_{вТ}/D_{вТ}$) [89, 91]. Выявленная возможность эффективного удержания витающих частиц в камерах такой формы позволила сконструировать экранированные вихревые топки и котлы с ними по современной технологии – из водотрубных мембранных панелей [91, 101].

Для всех моделей наличие сужения в виде ГОО обеспечивало хорошее удержание твердой фазы внутри вихревой камеры [91].

Математическое моделирование, широко применяемое в настоящее время при конструировании котлов и топок, позволяет теоретически оптимизировать геометрию вихревых топок и для лужки [24]. При таком моделировании может быть наглядно представлена форма вихревых образований и траектории движения компонентов двухфазного потока, рассчитана удерживающая способность, аэродинамическое сопротивление камеры и необходимые скорости и напор воздушного дутья, а также другие характерные параметры.

Наиболее применяемой в настоящее время является двухпараметрическая модель, включающая дополнительные дифференциальные уравнения переноса локальных характеристик турбулентности k (уравнение переноса кинетической энергии) и ε (уравнение переноса диссипации турбулентной энергии). Ее часто называют $(k-\varepsilon)$ -моделью, предложена она была в начале 70-х годов Лоундером Б.Э. и Джонсоном [24].

В этой модели τ - уравнения для рейнольдсовых напряжений путем аппроксимации сводятся к шести алгебраическим уравнениям, которые добавляются к уравнениям переноса с двумя дифференциальными уравнениями $(k-\varepsilon)$, и их решение определяет характеристики и поле течения [24].

Искомymi переменными являются три компонента вектора скорости u, v, w , являющиеся проекциями вектора скорости на оси координат x, y, z соответственно, а также скорость частиц дисперсного материала [24].

В целом такое математическое моделирование наглядно показывает качественную картину аэродинамической обстановки в вихревых топках и может использоваться для общего понимания процессов, в частности, в вопросах обучения студентов, например, изучать вихри, как особый класс течений.

С другой стороны, как показывает натурное моделирование и опыт наладочных испытаний котлов, компьютерное моделирование не позволяет выявить особенности и характер протекания процессов формирования отложений золы – главной проблемы эксплуатации котлов, сжигающих подсолнечную лузгу [105]. Кроме того, в отличие от ситуации с крупными энергетическими котлами, в промышленной теплоэнергетике имеется большое разнообразие котлов при их почти поточном производстве, что не всегда позволяет организовать сопровождение их проектирования компьютерным моделированием. В качестве примера приводится моделирование аэродинамической обстановки в модели топочной камеры котла с приближенной к простой классической геометрии, в виде восьмигранной призмы, с парным расположением двух вихревых камер по бокам от общей камеры охлаждения (Рисунок 2.33).

Математическое моделирование вихревых камер в пакете прикладных программ выполнялось в рамках НИР на кафедре котло- и реакторостроения в Алтайском государственном техническом университете [24, 105] и в рабочей группе ООО «ПроЭнергоМаш-Проект» [8]. TRAKT АлтГТУ, ANSYS Academic Research.

На картине полей и векторов скоростей (Рисунок 2.30 слева) на продольном вертикальном медианном разрезе модели вихревой топki хорошо видно интенсивное вращательное движение со средней скоростью в сечении около 7 м/с, с увеличением к выходному окну до 9 м/с. Ввод топлива в рассматриваемой схеме осуществляется с первичным воздухом в верхней части. В нижней части дутье подается через два ряда тангенциально расположенных сопел и колосниковую решетку.

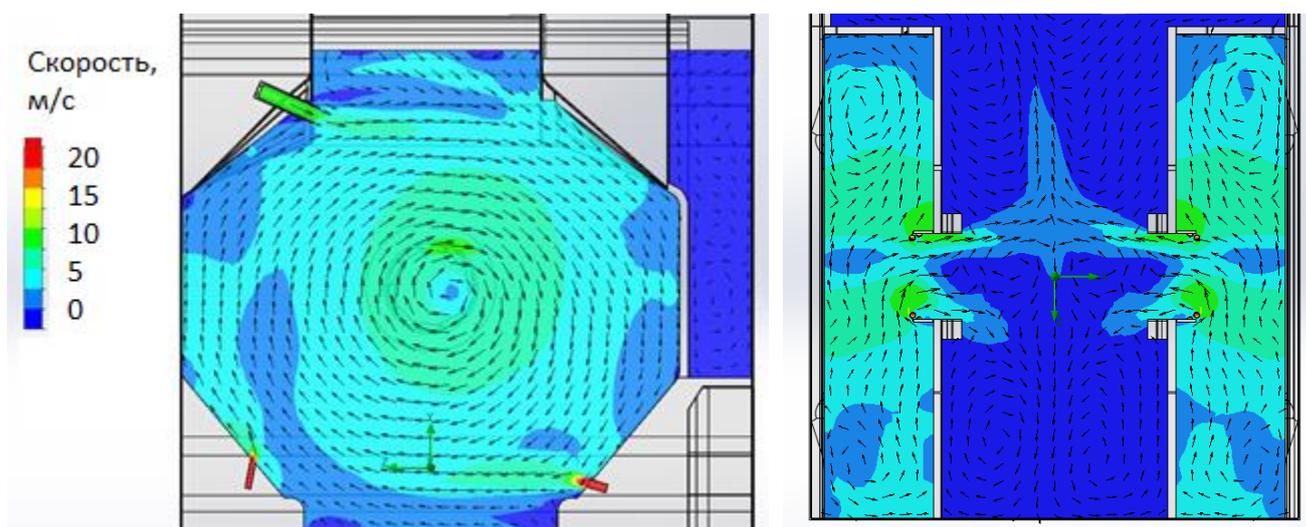


Рисунок 2.33 – Поля течений в модели вихревой дубль-топки. Продольный медианный разрез вихревой камеры и горизонтальный разрез по оси ГОО

Рассмотрение визуализации горизонтального разреза вихревых топков котла по оси ГОО (Рисунок 2.33 справа) показывает наличие интенсивной внутритопочной (две боковые камеры) циркуляции и зону возвратного течения за ГОО в камере охлаждения. Таким образом наглядно демонстрируется сложная, торообразная структура вихревого потока в радиальной топке «Торнадо», где внутри большого вихря осуществляется постоянная крутка на периферии.

По итогам численного моделирования можно рассчитать или оценить следующие показатели:

- время пребывания частиц, эквивалентных лузге (не менее – 5 сек);
- наличие зон с застоем потока;
- наличие зон с набросом факела на стены (зоны шлакования);
- наличие зон с повышенной концентрацией топлива;
- равномерность распределения топливо-воздушных потоков;
- наличие зон абразивного износа;

Моделирование позволяет выявить траектории и определить время пребывания частиц в топке. При необходимости рассчитываются показатели при разном

расположении точек ввода топливоздушной и/или воздушных струй, перераспределение массовых расходов и т.д. На рисунке 2.34 показан пример расчетных траекторий частиц в модели вихревой топки с двумя газоотводящими окнами.

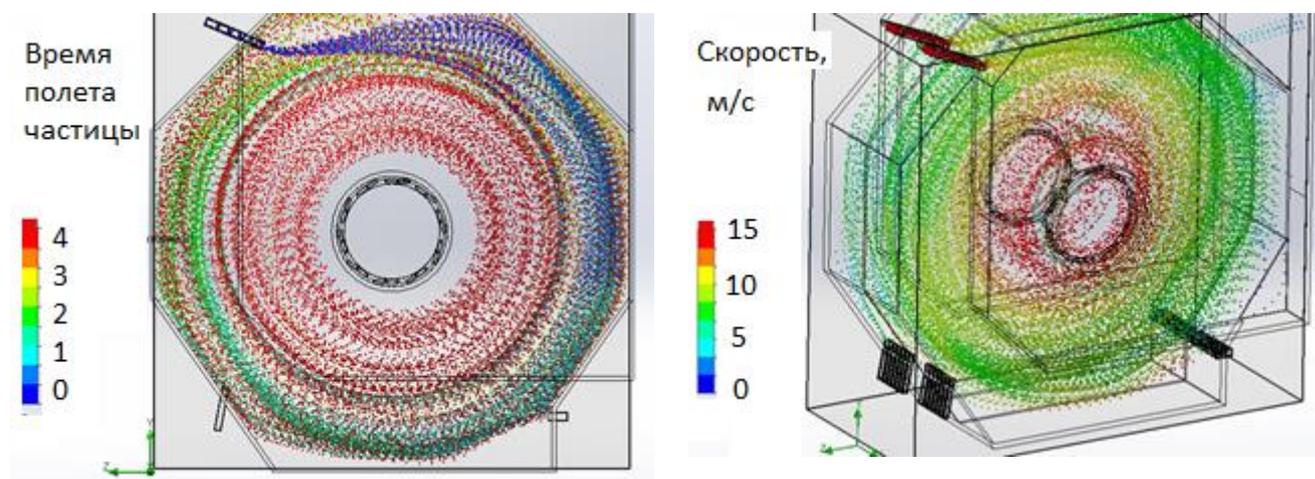


Рисунок 2.34 – Моделирование аэродинамической обстановки и движения частиц в восьмигранной модели вихревой топки

На рисунке 2.34 показаны результаты моделирования аэродинамической обстановки и движения частиц в восьмигранной призматической модели ВТ с двумя круглыми ГОО и разделительным газопроницаемым двусветным экраном. Топливовоздушные струи вводятся в топочную камеру через сопла на верхней фронтальной грани. Подача вторичного дутья осуществляется через тангенциально направленные сопловые группы на нижних гранях и через подовую колосниковую решетку. Третичное дутье подается через направленные в топочную камеру сопла в ГОО. Видно равномерное спиральное движение топливных частиц. Давление в вихревой топке нарастает от центра ГОО к периферии.

На рисунке 2.35 показаны данные по геометрическим соотношениям для выборки из реализованных котлов с ВТ «Торнадо» и некоторых других конструкций, данные по которым собраны в котельных МЭЗ при проведении испытаний.

Соотношение диаметра к глубине у реализованных ВТ «Торнадо» составляет не менее 2, против 0,5...1 у известных конструкций ВТ и предтопок с ЖШУ [61, 64, 66-69, 102].

Сравнение представленных данных по топкам «Торнадо» с альтернативными конструкциями и известными циклонными топками и предтопками показало их заметное отличие, а также и возможность значительного, в 2-3 раза, продвижения схемы «Торнадо» по мощности. И это позволяет сделать вывод о внедрении в энергетику **нового класса радиальных вихревых топков**.

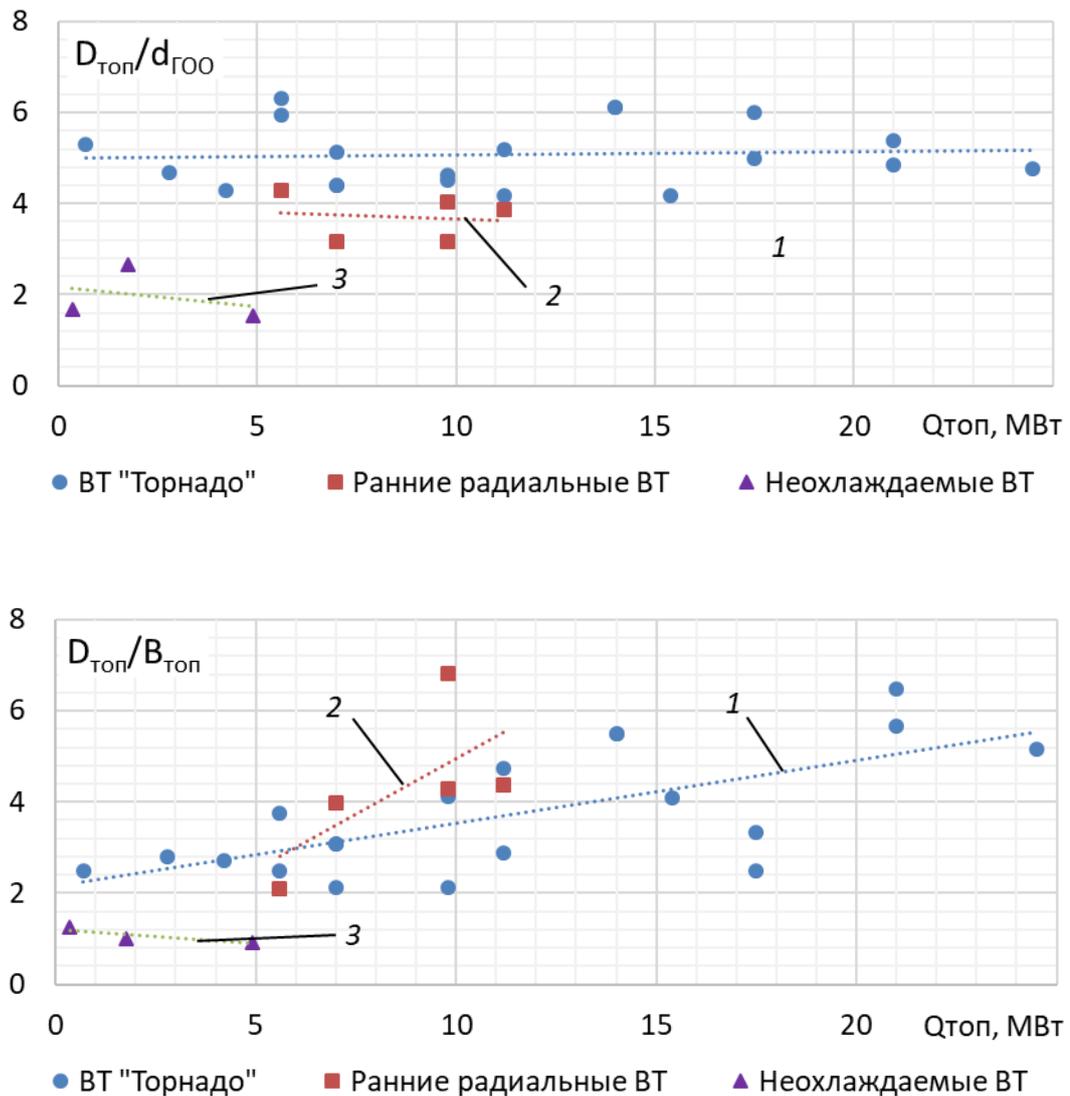


Рисунок 2.35 – Геометрические соотношения: 1 – ВТ «Торнадо»; 2 – Ранние радиальные ВТ; 3 – Неохлаждаемые ВТ

В ходе конструирования и разработки рационального дизайна для практической реализации котлов с вихревыми топками «Торнадо» были выведены соотношения, позволяющие:

- выполнить камеру из газоплотных цельносварных трубных панелей;

- обеспечить надежное удержание витающих частиц в топочной камере;
- вместить необходимую по условиям обеспечения низкотемпературного сжигания, с учетом термического сопротивления загрязняющего слоя отложений, тепловоспринимающую поверхность;
- обеспечить требуемое по условиям горения теплонапряжение объема;
- скомпоновать в вихревой камере слоёвое топочное устройство.

Одновременное выполнение вышеозначенных условий обеспечивается при радиальной многоугольной форме топочной камеры.

Моделирование аэродинамической обстановки позволило подтвердить следующие рациональные соотношения для вихревых топок «Торнадо»:

- диаметр топки условный ($D_{\text{топ}}$)/диаметр ГОО ($d_{\text{ГОО}}$) – 4...6;
- диаметр топки условный ($D_{\text{топ}}$)/глубина топки ($B_{\text{топ}}$) – 2...6;

2.8 Разработка паровых котлов с вихревыми топками

Разработка модификаций конструкций котлов с вихревыми топками «Торнадо» в ходе проектирования сопровождается проведением многовариантных расчётов с использованием собственной методики «ПроЭнергоМаш-Проект», базирующейся на нормативном методе [7] с соответствующими программами и позволяет проводить одновременно полный расчет котельной установки, включая все её отдельные элементы: ВТ, пароперегреватели, конвективные пучки и экономайзеры. Эти расчёты основаны на общих и локальных уравнениях теплового и материального балансов потоков и на уравнениях теплопередачи, включая потери тепла. Они позволяют оперативно проводить полный расчёт как всей котельной установкой, так её отдельных элементов.

Особенностью в расчётах вихревой топки является заметный вклад конвективной теплоотдачи, рассчитываемой по эмпирической зависимости $\alpha_k = 3,95w_{\theta}$, Вт/(м²К), и проявляющейся в НТВС, как из-за снижения лучистого теплообмена при низкотемпературном режиме сжигания, так и за счёт высокой пристенной скорости, задаваемой в ВТ скоростью дутья из сопл w_{θ} , м/с.

Наиболее важная характеристика, детерминирующая процессы шлакования котла – температура газа на выходе из ВТ, T_T'' , K вычисляется как безразмерная величина, отнесенная к адиабатической температуре сгорания T_a , K .

$$\theta_m = T_T''/T_a. \quad (2.1)$$

Она зависит от температуры наружного слоя загрязнений экранов θ_3 топки площадью H , m^2 , расположенных в ВТ:

$$\theta_3 = T_3/T_a, \quad (2.2)$$

параметра f , характеризующего конвективный теплообмен:

$$f = \frac{Q_k}{V_c(T_a - T_T'')}, \quad (2.3)$$

где Q_k – тепло, передаваемое экранам топки конвекцией на 1 кг топлива, кДж/кг; V_c – теплоёмкость продуктов сгорания на 1 кг топлив и критерия Больцмана:

$$Bo^* = \frac{\varphi \cdot B_p \cdot V_c}{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot H \cdot T_a^3}, \quad (2.4)$$

где B_p – полный расход топлива, кг/с, φ – коэффициент сохранения тепла [7].

И определяется по критериальному уравнению:

$$\theta_m = 0,686 \left(\sqrt{\left[\frac{Bo^* (1-f)}{a_k} \right]^2 + 2,92 \left[\frac{Bo^* (1-f)}{a_k} + \theta_3^4 \right]} - \frac{Bo^* (1-f)}{a_k} \right). \quad (2.5)$$

Здесь: a_k – приведенная степень черноты камеры сгорания.

Температура наружного слоя (загрязнения) лучевоспринимающей поверхности определяется по формуле:

$$T_3 = T_{cp} + \frac{\varepsilon \cdot B_p \cdot Q_d}{H_d}, \quad K, \quad (2.6)$$

где T_{cp} , K – средняя температура среды. Если T_{cp} неодинакова, усреднение производится пропорционально лучевоспринимающей поверхности нагрева;

$\varepsilon = \delta_3/\lambda_3$ – тепловое сопротивление загрязняющего слоя на наружной поверхности трубы, $m^2K/Вт$.

Для подсолнечной лужги потребовалось уточнить значение теплового сопротивления загрязняющего слоя. Например, для котлов первого поколения определено $\varepsilon = 0,0018 m^2K/Вт$.

Для новых котлов с вихревой топкой «Торнадо» $\varepsilon = 0,0012 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

Конструктивные и рабочие характеристики при разработке котлов принимались на основе эскизных проектов, а при обработке результатов натурных испытаний по технической документации котлов. Теплотехнические характеристики топлив и состав лужги принимались по собранным данным (см. таблицы 1.3 – 1.7).

Использование программы расчёта по уточненной методике позволяет быстро выполнять конструкционные и поверочные расчёты.

С другой стороны, разработанные методики позволили на основе решения обратной задачи – по данным натурных испытаний и снижению эксплуатационных характеристик оборудования выявлять характеристики и характер влияния на работу котла загрязнений в зависимости от:

- рабочей нагрузки котла;
- конструкции ВТ и элементов котельной установки;
- частоты проведения процедур и качества очистки и др.

При выполнении аэродинамического расчета воздушного тракта учитывается необходимый напор и аэродинамическое сопротивление системы раздачи дутья в ВТ. При расчете газового тракта необходимо учитывать характер формирующихся в котлах отложений, так как они заметно увеличивают реальное сопротивление по сравнению с рассчитанным по нормативной методике. Для примера, применение дымососа с увеличенным на $1...2 \text{ кПа}$ развиваемым напором позволяет заметно увеличить продолжительность безостановочного периода работы ЭУ и/или длительность периода работы котлов между процедурами очистки в безостановочном режиме.

Усовершенствование котельно-топочной техники

Особенности распределения и горения лужги в ВТ, гранулометрический состав и поведение золы, а также формирование в котле ее отложений невозможно рассчитать. Соответственно для успешного решения задачи по созданию котлов для сжигания нетрадиционных топлив и лужги, наиболее важным было участие разработчика в наладочных испытаниях с обеспечением им обратных связей между

эксплуатацией, конструкторским бюро и заводом. В результате такого подхода в сравнительно короткий срок с участием автора было разработано и изготовлено около 50 паровых котлов для сжигания лузги. Непосредственное участие в пуско- и режимно-наладочных работах позволило собрать необходимые для разработки котлов исходные данные. Также эта работа позволила последовательно внедрять усовершенствования в конструкцию действующих котлов.

Вихревые топki разрабатывались преимущественно для паровых котлов МЭЗ и промышленных котельных, что накладывает ограничения на их конструкцию ввиду исходных требований: паропроизводительность (D) от 1 до 25 т/ч, давление пара (P) 0,9...3,9 Мпа. Подходящими под указанные требования являются котлы барабанные с естественной циркуляцией, при этом вихревая топочная камера должна быть сформирована газоплотными экранными панелями. Часть топок предназначалась для реконструкции существующих котлов, а многие котлы устанавливались в существующие котельные, что накладывало дополнительные ограничения на возможность принятия конструкторских решений. Изготовить смоделированную геометрию топki не всегда представляется возможным по конструктивным или технологическим условиям.

Постепенное совершенствование раздачи дутья и геометрии позволило значительно повысить удерживающую способность вихревых топок и вынос горящих частиц, наблюдавшийся в первых конструкциях экранированных вихревых топок (Рисунок 2.33) через ГОО (слева), сейчас отсутствует (справа).

Расчётное время витания частиц в вихревой топке составляет около 5 секунд. Частицы крупнее 60 мкм полностью удерживаются внутри вихревой камеры. Эти показатели достигнуты на реально работающих котлах, что гарантирует отсутствие механического технически значимого недожога в уносе котлов, работающих на подсолнечной лузге во всем диапазоне от пуска до номинальной мощности (Рисунок 2.36 справа).

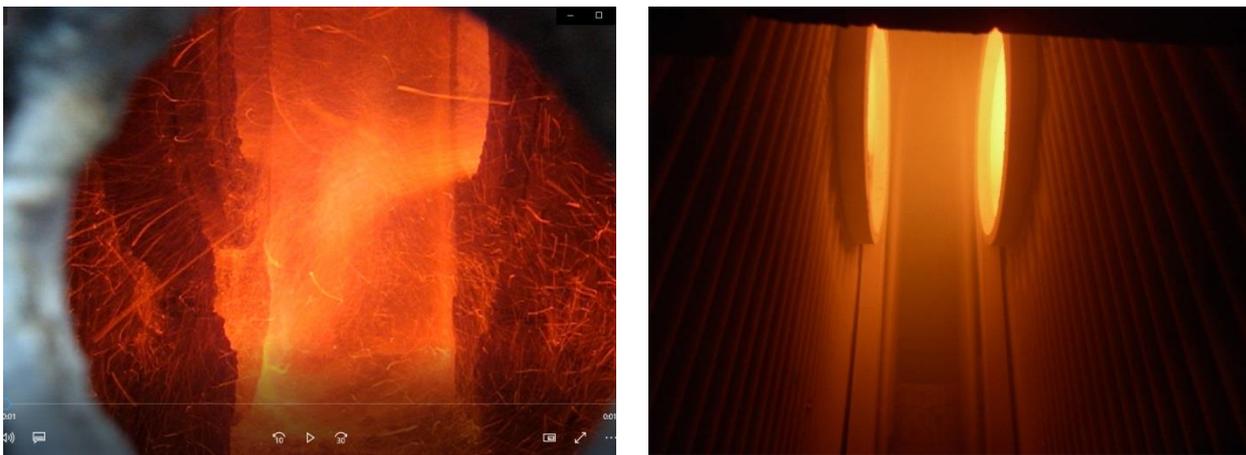


Рисунок 2.36 – Совершенствование конструкции вихревых топок.

Подсолнечная лузга, номинальная нагрузка. Вид факела на выходе из ГОО:

слева – котел ДКВр-20-13, 2006 г.в.; *справа* – котел Е-20-1,4, 2010 г.в.

Компоновочные решения конструкции вихревой топки помимо непосредственно геометрии топочного объема и точек ввода дутья также важны в части устройств ввода топлива и вывода шлака [105]. Зольный остаток необходимо своевременно удалять, поскольку зола, находящаяся в зоне высоких температур, претерпевает изменения и участвует в процессах, способствующих образованию шлаковых отложений на поверхностях нагрева котла.

В ходе развития схемы вихревой топки первоначально котлы с топками «Торнадо» до 2019 года имели нижнюю подачу лузги (Рисунок 2.37 слева). Такое расположение берет свое начало от первых вихревых топок, созданных в НИЦ ПО «Бийскэнергомаш» [46], в которых под и стены выполнены кладкой из огнеупорного кирпича. Топливоздушная струя в таких конструкциях вводится снизу, вдоль пода. В противном случае на поде откладывались большие кучи легких газифицирующихся частиц лузги, быстро поднимающихся потоком дутья, что приводило к сильным пульсациям давления и нестабильному горению. Установка неохлаждаемых колосников для подачи подового дутья в таких котлах [44] была невозможна, поскольку они не закрыты от пламени слоем шлака, как например при сжигании угля, и быстро прогорают. В котлах «Торнадо» (Рисунок 2.37) колосниковая решетка с шурующей планкой водоохлаждаемая, что позволяет подавать воздух под слой и предупреждать образование куч лузги.

Был проведен длительный натурный эксперимент на ряде паровых котлов с целью определения лучшей точки ввода топлива. Несколько изготовленных котлов были спроектированы для подачи топлива через сопло (плоскую горелку), расположенное в верхней части топочной камеры (Рисунок 2.37 справа).

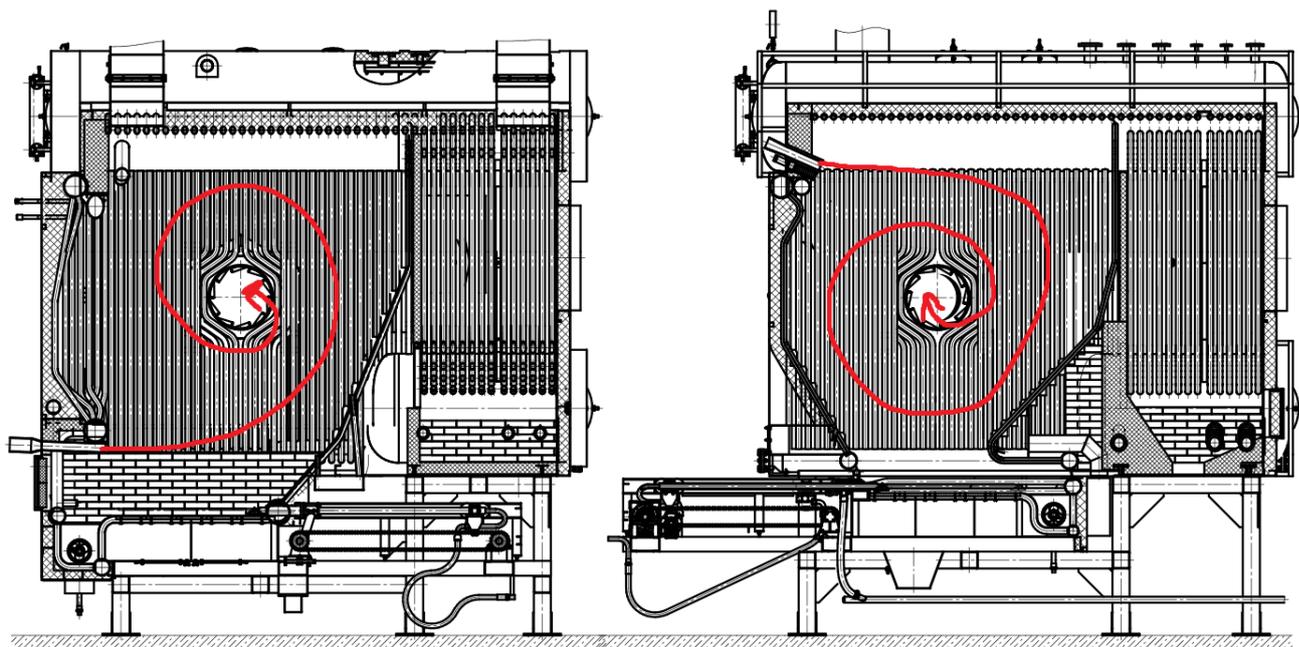


Рисунок 2.37 – Варианты компоновки вихревой топки котла Е-4-1,4: *слева* – нижняя подача топливовоздушной струи; *справа* – верхняя.

Теплотехнические испытания и промышленная эксплуатация их показали улучшения характеристик котлов с верхним вводом топлива:

- возросла скорость растопки при этом в несколько раз сократилась частота и амплитуда пульсаций (со 150 до 30 Па);
- увеличилась видимая полнота заполнения топки факелом (у фронтального экрана и в верхней части ВТ);
- номинальная температура на выходе из топки снизилась с 930...960°C до 850...875°C;
- тепловосприятие экранов топки возросло на 14%;
- скорость загрязнения конвективных пучков уменьшилась на 10...20%.

В итоге сделан вывод о предпочтительности верхней подачи, как обеспечивающей лучшее распределение топливовоздушной смеси и более равномерное заполнение вихревой топки факелом. Лучше организуется подвод дутья, уменьшается зона с недостатком кислорода (восстановительная) над колосниковой решеткой, снижая сублимацию золы (см. рисунок 3.7). Котлы на лузге, производимые компанией «ПроЭнергоМаш» в настоящее время оснащаются вихревыми топками именно с таким вводом топлива.

Двухкамерное сжигание

Работа котлов с вихревыми топками, в которых организуется НТВС за счет ранее рассмотренного принципа неполного сгорания топлива, с частичным тепловыделением в камере дожигания, теоретически имеющая некоторые преимущества перед одноступенчатым сжиганием, такие как снижение эмиссии оксидов азота, на практике показала неудовлетворительный результат.

Опыт промышленной эксплуатации позволяет провести сравнительный анализ работы котлов с двухкамерным сжиганием и с полным сжиганием в низкотемпературной вихревой топке с развитым экранированием (Таблица 2.2, рисунок 2.38). В котле Е-16 с вихревой топкой реализован принцип двухкамерного сжигания с дожиганием факела за вихревой камерой (Рисунок 2.38 слева). В котле Е-14 реализовано сжигание в объеме вихревой топki со ступенчатой подачей дутья.

Фактическая эксплуатационная нагрузка (тепловая мощность) котлов примерно одинаковая. Удельная металлоёмкость котла Е-16 превышает аналогичный показатель котла Е-14 в 1,17 раза.

Вид факела на выходе из вихревой топki в обоих вариантах представлен на фото (Рисунок 2.38). При двухкамерном сжигании факел мутный, пульсирующий, с видимым горением летучих веществ. На выходе из вихревой топki при полном сгорании факел прозрачный, через ГОО видно яркое свечение.



Рисунок 2.38 – Вид отложений и пламени из ГОО: слева – котел Е-16 с вихревой топкой и двухкамерным сжиганием; справа – Е-14 с вихревой топкой «Торнадо»

Дожигание продуктов неполного сгорания за вихревой топкой было сопряжено со следующими трудностями:

- высокотемпературная коррозия кольцевых сопел подачи третичного дутья вследствие интенсивного горения на их поверхности;
- интенсивное шлакование ГОО, вплоть до полного перекрытия окна за несколько суток;
- интенсивное шлакование первых по ходу газов конвективных пучков, сплавление шлака;
- интенсивное шлакование стен и экранов камеры дожигания, засыпание сопел третичного дутья золой;

– высокий химический недожог, содержание СО в уходящих газах доходило до десятков тысяч мг/м³, так как малый объем камеры дожигания не позволяет обеспечить полное выгорание летучих веществ.

Таблица 2.2 – Характеристики вихревых топок с полным (Е-14 «Торнадо») сгоранием факела в вихревом объеме и неполным (Е-16).

Котел	Е-14	Е-16
Паропроизводительность номинальная, тн/ч	14	16
Паропроизводительность фактическая, тн/ч	14	14
Количество топок	2	2
Количество окон	2	2
Диаметр топки условный, м	3,7	3
Ширина топки, м	0,9	0,7
Объем топки общий, м ³	19,35	9,90
Удельный объем топки на тонну пара, м ³ /(тн/ч)	1,38	0,71
Диаметр ГОО, м	0,80	0,95
Площадь выходная, м ²	1,01	1,42
Отношение диаметров: $D_{\text{топ}}/D_{\text{ГОО}}$	4,63	3,16
Отношение: объем топки/площадь ГОО	19,25	6,98
Скорость в ГОО, м/с	19,26	13,65
Площадь тепловоспринимающая вихревой топки, м ²	57,54	37,32
Коэффициент экранирования	0,9	0,9
Удельная поверхность экранов топки, м ² /тн·ч	4,11	2,67
Теплонапряжение объема, МВт/м ³	0,47	0,92
Эффективная толщина излучающего слоя в топке, м	1,21	0,95
Полная поверхность стен вихревой топки, м ²	63,9	41,5

Сильное шлакование котла Е-16 с двухкамерным горением вынуждает проводить ежесменную ручную обдувку топок и камеры дожигания, без обдувки потребуется остановить котел на полную очистку менее чем через неделю.

В котле Е-14 с полным сгоранием в вихревой топке ГОО и стены камеры охлаждения чистые, обеспечивается хороший теплосъём в обеих камерах. Процесс горения завершается в вихревом потоке с интенсивным перемешиванием топливо-воздушных струй. Котел работает без ручной обдувки не менее 30 дней.

Теплотехнические испытания и эксплуатация рассмотренных котлов с полным сгоранием в вихревой камере и двухкамерным сжиганием в вихревой топке и камере дожигания позволяют сделать вывод, что конструкция котла с вихревой топкой, в которой осуществляется полное сгорание топлива в одну стадию, предпочтителен по следующим причинам:

- чистые топочные экраны, интенсивное тепловосприятие в камерах;
- не требуется камера дожигания большого объема с устройствами организованной подачи дожигающего дутья, меньшие габариты котла;
- не требуется организация вывода шлака из камеры дожигания;
- камера дожигания выполняет роль пустого газохода, самоочищается;
- снижение шлакования конвективных труб, нет спекания шлака;
- отсутствие химического недожога во всем диапазоне рабочей нагрузки;
- не разрушается от пережога металл сопел дутья.

Коэффициента избытка воздуха

Как было показано выше, внутри вихревой топки «Торнадо», топки радиального типа с ГОО создаются условия для интенсивного массообмена. Воздух для горения подается ориентировочно в таких пропорциях:

- первичное дутье 20 ± 5%;
- вторичное (тангенциальные сопла) 55 ± 15%;
- ГОО 15 ± 5%;
- слоевое дутье 10 ± 5%.

Такая подача дутья создает зоны с повышенной концентрацией кислорода по периферии ВТ и у ГОО и со сниженной в центре вихревого образования. Инерционная и гравитационная сепарация обеспечивает концентрацию коксо-зольных частиц также по периферии и в слое. Таким образом, для лузги и биотполиив с V^{daf}

около 80% создаются благоприятные условия для глубокого и экологически эффективного их сжигания:

- горение летучих веществ в центральной зоне вихря с недостаточным подводом окислителя снижает выход оксидов азота;
- дожигание коксового остатка, содержащего золу, происходит в зоне избыточного подвода окислителя, что обеспечивает полное выгорание и минимальную возгонку золы;
- подача дожигающего дутья в ГОО обеспечивает полное дожигание летучих при минимальном избытке воздуха.

Понятно, что реальные условия в ВТ гораздо сложнее и характеризуются интенсивным тепломассобменом и зависят от множества факторов, однако теплотехнические испытания подтверждают эффективность предложенных технических решений.

Практические испытания котлов на подсолнечной лузге показали возможность работы с коэффициентом избытка воздуха, α_t , за ГОО топочной камеры 1,15...1,2 (содержание O_2 2,7...3,5%). Стоит отметить что нормативные значения α_t [7] для биотопливных котлов с топками шахтными и скоростного горения, составляющие 1,3...1,4, почти не достижимы при реальной эксплуатации. Эксплуатационные значения как правило выше, и находятся в районе 1,7...2.

Выше проведенное рассмотрение способов снижения температуры показывает, что избыточный воздух значительно снижает КПД котла η . Например, при увеличении избытка с 1,2 до 1,4 η снизится на 1,2% (с 90,2% до 89%), а при $\alpha_t=2$ $\eta=84,7\%$ (снижение на 5,5%) (см. рисунок 2.19).

Выводы по второй главе

1. Рассмотрены предпосылки создания и пути развития новой технологии вихревого сжигания. Выявлены особая роль и необходимость установки на выходе из вихревых топок и камер сгорания пережима, повышающего стабильность и эффективность действия вихря.

2. Проанализирован опыт сжигания лузги в вихревых топках и показана необходимость снижения температуры горения по условиям шлакования.
3. Проведен сравнительный анализ способов организации низкотемпературного топочного процесса, выявлена наибольшая эффективность экранирования.
4. С применением моделирования, натуральных и промышленных испытаний выявлены рациональные геометрия и конструкция ВТ, внедрены и проверены эксплуатацией.
5. Показаны основные отличия предлагаемых ВТ «Торнадо» от известных конструкций – это новые 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.
6. По результатам натуральных испытаний котлов на подсолнечной лузге уточнена нормативная методика теплового расчета с учетом конвективной составляющей и термического сопротивления загрязняющего слоя золовых отложений. Для котлов первого поколения $\varepsilon = 0,0018 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Для новых котлов с ВТ «Торнадо» $\varepsilon = 0,0012 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.
7. Натурными испытаниями выявлена большая эффективность верхнего ввода топлив в вихревую камеру (рост тепловосприятости экранов на 14%).
8. В ходе сравнительных промышленных испытаний разработанных котлов с полным сгоранием топлива выявлено, что котлы со сгоранием лузги в одну стадию непосредственно в ВТ эффективнее котлов с двухкамерным горением и позволяет обеспечить более длительный период безостановочной работы. Дано теоретическое обоснование.
9. 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.

ГЛАВА 3 ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЗОЛОЙ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЧИСТКИ

3.1 Характеристики золы лузги

Биотоплива (растительные отходы) имеют сравнительно стабильные характеристики горючей массы, однако характеристики их золы мало изучены. В целом зольность растительных отходов мала и в собранных данных обычно составляет 1...5% (Таблица 3.1). Состав золы в топливе растительного происхождения различен не только для разных видов растений, но варьируется в широких пределах для каждого вида в силу влияния множества факторов.

Несмотря на малую зольность, из-за особых свойств и реакций, протекающих с минеральными веществами при сжигании, особенно лузги подсолнечника, котлы могут подвергаться интенсивному шлакованию поверхностей нагрева, а уходящие дымовые газы содержат трудноуловимые субмикронные частицы. На современном этапе развития технологий утилизации этих отходов продолжается поиск решений, направленных на устранение последствий выше обозначенных явлений.

Золообразующие вещества в топливе растительного происхождения состоят из:

- органически связанного вещества: ионы металлов, связанные с анионными органическими группами в органических молекулах, составляющих биомассу; обычно K, Na, Mn, Ca, Mg, Fe и Al;
- элементов, связанных с органической структурой, обычно S, P и иногда Cl;
- растворенных солей: ионы металлов и малые – часто неорганические – анионы, растворенные в растительных жидкостях; обычно катионы: K, Na, Ca и анионы Cl, HPO_4^{2-} , H_2PO_4 и $\text{Si}(\text{OH})_4$, если биомассу высушить, эти соли выпадут в осадок, но останутся в растворимой форме;
- включенных минералов: кремнезем (SiO_2), оксалат кальция (CaC_2O_4) и оксиды или гидроксиды железа ($\text{Fe}(\text{OH})_3$);

– посторонних веществ и минералов: почвенные минералы часто загрязняют биомассу; как правило, песок и глинистые минералы, кварц и алюмосиликаты, часто с соединениями калия, натрия и кальция.

Основными видами лузги в России, в порядке убывания выхода, являются: подсолнечная, овсяная, гречневая и рисовая. Рисовая лузга имеет наибольшую зольность, она достигает 20% и представлена преимущественно SiO_2 . Овсяная лузга тоже характеризуется повышенной зольностью и содержит много SiO_2 . Эти золы склонны к спеканию и легко улавливаются. Гречневая лузга с наименьшими зольностью и теплотой сгорания не склонна к шлакованию котлов.

Сжигание подсолнечной лузги связано с наибольшим количеством проблем, которые вызваны особым поведением золы при сжигании. С учетом того, что она более распространена, чем другие виды и широко используется в качестве топлива, подавляющая доля прикладной части работы выполнена именно для котлов, сжигающих подсолнечную лузгу.

Таблица 3.1 – Влажность и зольность лузги и растительных отходов

№	Название	Wp	Ap
1	Лузга подсолнечная	8,8	3
2	Лузга овсяная	11	4,5
3	Лузга гречневая	9	1,5
4	Лузга рисовая	10	19,5
5	Солома льна	11	2,9
6	Кедровый орех	2,4	2
7	Солома пшеница	10	4,5
9	Шелуха просо	8	5

Из-за малой зольности состав золы растительных отходов подвержен значительным случайным влияниям и в первую очередь зависит от характеристик почв и количества привнесенных при уборке и переработке примесей (пыль, песок,

земля и др.). По этой причине и причине малого применения, в сравнении с энергетическими топливами, характеристики золы растительных отходов в справочниках и нормативных материалах [7] не приводятся.

Опыты по растворению в воде золы подсолнечной лузги, собранной из на-трубных отложений и уловленной в золоуловителе, показали, что доля водорастворимых компонентов составляет около 60%, рисунок 3.1.

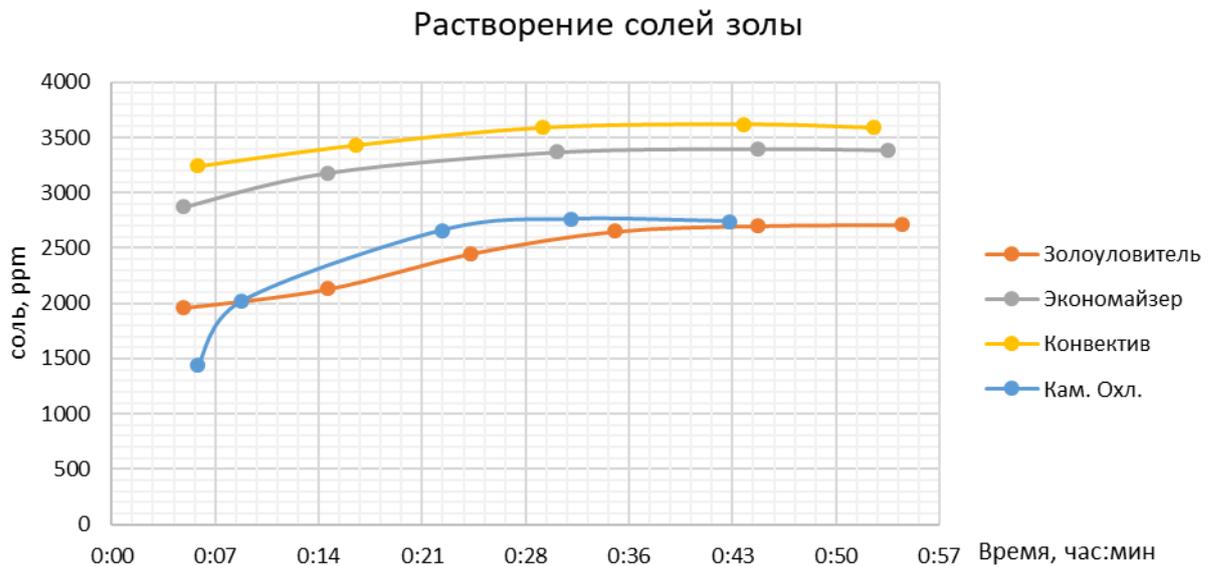
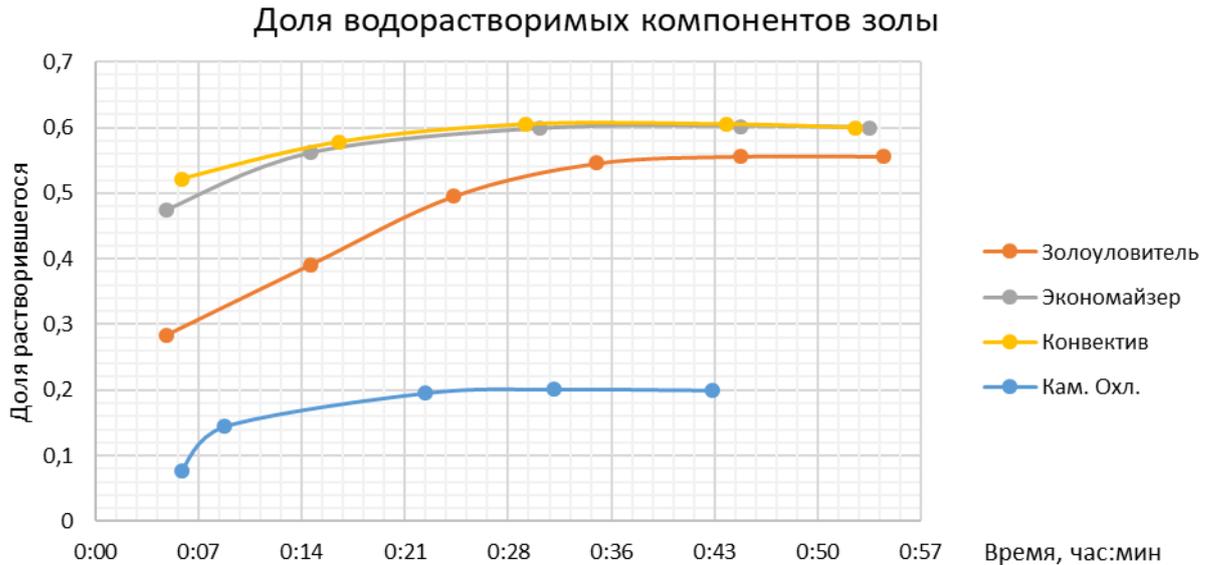


Рисунок 3.1 – Доля водорастворимой золы и концентрации соли в растворе золы подсолнечной лузги

Доля водорастворимых компонентов меняется в зависимости от места сбора золы внутри котла. Так, наибольшая доля водорастворимых компонентов зафиксирована в натрубных отложениях, собранных из зоны средних температур и экономайзера. Наименьшая доля, 20%, наблюдается на стенах камеры охлаждения. Это объясняется улетучиванием водорастворимых компонентов из зольного остатка под воздействием высоких температур и последующей конденсацией на трубах в зонах более низких температур. Зола из золоуловителя менее растворима, около 55%.

Высокая водорастворимость золы лузги отличает ее от золы ископаемых топлив, которые претерпели длительный процесс геоморфизма с вымыванием растворимых компонентов. Таким образом, выявленная здесь корреляция водорастворимости с улетучиванием золых компонентов объясняет более высокую склонность растительной золы к загрязнению поверхностей нагрева котлов, чем у традиционных топлив.

Важными являются характеристики золы и для разработки систем золоулавливания. По данным ЦКТИ [46] подсолнечная лузга содержит 1,2...2% золы с составом, приведенным в таблице 3.2. Более поздние исследования подсолнечной лузги, проведенные в ООО «Благо», (с. Верхняя Хава), а также Казанским и Балаковским МЭЗ [30] показали зольность пробы 2,9% и 2,5% соответственно и следующий состав золы, таблица 3.2. В таблицу для сравнения также включены данные из иностранного источника [106].

В соответствии с данными таблицы 3.2 наибольшую долю в золе подсолнечной лузги составляют соединения калия. Такая зола имеет выраженную щелочную реакцию в силу высокого содержания щелочных металлов. При утилизации зола может найти применение в качестве удобрения и раскислителя почв.

Гранулометрический состав золы, и особенно формирующейся в топочных процессах с интенсивным взаимодействием частиц, предсказать трудно. Для ориентировки можно использовать лабораторные данные, полученные в НПО «Алтай» (Таблица 3.3), видно, что при озолении лузги в лабораторных условиях в тигле с доступом воздуха образуется чрезвычайно мелкая зола, пористая и лёгкая.

Медианный размер золовых частиц лузги (d_m) составляет 5,58 мкм. Для сравнения зола при пылеугольном сжигании [107] характеризуется гораздо большим размером частиц ($d_m \approx 25 \dots 35$ мкм) и имеет высокую плотность 1900...2500 кг/м³. То есть теоретически зола лузги вообще не может задерживаться просто так, при механическом осаждении, ни в котле, ни в вихревой топке.

Таблица 3.2 – Состав золы подсолнечной лузги

Характеристика	ЦКТИ [46]	«Благо»	Казанский МЭЗ [30]	Балаковский МЭЗ [30]	Demirbas, A [106]
Зольность, A _d	1,2...2%	2,5	2,5	2	4
SiO ₂	7,3...10%	2,01	1,6	2,37	29,3
Fe ₂ O ₃	1,2...1,8%	-	0,66	0,87	2,1
CaO	26...11,5%	24,94	15,71	22,67	15,8
MgO	22...11%	15,06	9,01	11,51	6,1
Na ₂ O	0,1...0,86%	1,72	0,85	0,87	1,5
K ₂ O	34...17%	33,32	42,68	43,03	35,6
SO ₂	-	14,22	23,34	11,19	1,3
P ₂ O ₅	-	7,7	5,73	6,67	4,8

Таблица 3.3 – Распределение частиц золы подсолнечной лузги по размерам

Вся зола

Размер частиц, мкм	Доля частиц, %
>60	0,85
60...40	0,16
40...30	0,16
30...20	2,03
20...0	96,8

Зола мельче 20 мкм

Размер частиц, мкм	Доля частиц, %
>20	0,16
18...16	0,16
16...14	0,83
14...12	1,49
12...10	1,49
10...8	20,7
8...6	20,7
6...4	18,8
4...2	16,9
<2	18,5

Важную роль при организации топочных процессов имеют плавкостные свойства золы. Данные по температурам для растительных отходов на сегодня не систематизированы, разрознены и не приводятся в нормативных материалах. Некоторые из имеющихся сведений представлены в таблице 3.4.

С конца прошлого века на многих МЭЗ [108], производство которых связано с выходом лузги, организовано ее сжигание в производственных котельных. С этой целью используют различные модификации котлов со слоевым и факельным сжиганием, а также вихревыми топками. В среднем зольность лузги мала и составляет всего 1...5% и при этом потери тепла с мехнедожогом не превышают нормативных значений $q_4^{yH}=3...5\%$ [7].

Таблица 3.4 – Плавкостные характеристики золы растительных отходов

Зола	Температура, °С			
	Спека- ния	Начала деформа- ции, t1	Размягче- ния, t2	Начала, жидкого сост. t3
Солома	920	950	1170	1215
Лузга подсол- нечника		640	700	
Стебли	880	950	1100	1210
Лигнит	890	965	1245	1395
Торф		1010	1150	1200
Древесные от- ходы		800-1400	1000-1500	1010-1500

По оценкам [109] содержание золы в дымовых газах на подсолнечной лузге мало, до 1000...2000 мг/нм³, но оно требует обязательного применения золоуловителей. При норме выброса твердых частиц за котельными установками по ГОСТ Р 50831-95 до 150 мг/нм³ эффективность золоулавливания должна быть не

ниже 85...92,5%, что соответствует типовой ситуации для твердотопливных котлов.

Однако с учетом гранулометрического состава золы (Таблица 3.3), в типовых сухих циклонных золоуловителях такая эффективность практически недостижима, причем неуправляемая зола хотя и светлая, но дает оптически плотный и хорошо видимый беловатый след, так как составлена из множества очень мелких частиц.

С другой стороны, полное отсутствия горящих частиц в уносе, которое обеспечивают ВТ «Торнадо», позволяет применять высокоэффективные рукавные фильтры, и получить выходную запыленность не более 20 мг/нм³, что соответствует действующим и перспективным требованиям.

В итоге именно зола из-за своих специфических свойств создает разнообразные проблемы при организации огневой утилизации лузги.

Согласно [110] оценка шлакующих и загрязняющих характеристик топлив может проводиться по отношению сумм основных (ΣO) и кислых (ΣK) компонентов (Таблица 3.5).

Расчетное отношение основных и кислых компонентов, для рассмотренных образцов лузги (Таблица 3.2) составляет не менее 2, таким образом, рассматриваемое топливо, по данной оценке, является сильно шлакующим (очень высокий уровень склонности к загрязнению и шлакованию).

Таблица 3.5 – Оценка шлакующих и загрязняющих характеристик топлив

Параметр	Уровень шлакования			
	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
Отношение основных и кислых оксидов $O/K = [Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O]/[SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2]$	<0,5	0.5...1	1...1,75	>1,75
Индекс шлакования по плавкости $RS = [tb_{max} + 4ta_{min}B]/5$	>1343	1232...1343	1149...1232	<1149
Индекс загрязнения $Rr = B/A Na_2O$	$\leq 0,2$	0,2...0,5	0,5...1	>1

Фактически эксплуатация котельно-топочной техники, работающей на лузе, подтверждает данную оценку. Котлы просто не могут полноценно работать без принятия множественных мер по борьбе с золовым загрязнением.

3.2 Поведение золы при сжигании лузги в вихревых топках

Выше было выявлено, что главной проблемой при организации топочных процессов при сжигании лузги подсолнечника является поведение золы. Механизмы переноса золы из топлива на поверхности нагрева определяют интенсивное формирование отложений в котле, препятствующих теплообмену и повышающих аэродинамическое сопротивление газового тракта.

Преимущественным механизмом переноса золы на поверхности нагрева при сжигании подсолнечной лузги, содержащей соединения щелочных металлов является их улетучивание и последующая конденсация или десублимация. Согласно [111] при 1000°С улетучивается (возгоняется) до 40% соединений натрия и 20% калия. Возгонка начинается при более низких температурах и может иметь место также в зонах локального перегрева при общем низком температурном уровне.

Изменения, происходящие с золой лузги в топочном процессе наглядно видны из сравнения гранулометрического состава золы полученной в лабораторных условиях (см. таблицу 3.3) и проб, отобранных из котлов Е-16-21-350 ГМДВ Урюпинского МЭЗ [44] и КЕ-10-1,4 ООО «Донское Золото» (см. таблицы 3.6, 3.7 и рисунок 3.2). Из таблиц видно, что гранулометрический состав золы, взятой из котла значительно грубее, увеличение среднего размера частиц почти до тысячи раз, от полученный в лабораторных условиях (см. таблицу 3.3). Очевидно, в ходе реальных топочных процессов наблюдается интенсивное слипание и укрупнение частиц золы. Таким образом, при сжигании подсолнечной лузги определяющим в процессе формирования гранулометрического состава золы является, прежде всего, характер топочного процесса и его температура.

Пробы золы лузги (Таблица 3.6) из реконструированного котла КЕ-10-1,4 с вихревой топкой «Торнадо», установленного на предприятии ООО «Донское золото» п. Гигант Ростовской области, отобраны после останова и охлаждения котла

[105]. Зола счищалась со стен, топочных экранов и поверхностей нагрева, и соответствующие пробы отложений отбирались из бункеров или с пода под соответствующими зонами. По виду зола имеет цвет от белого до зеленовато-желтого. Далее была проведена рассевка отобранных проб на стандартном наборе сит. Пробы небольшой массы рассеивались в полном объеме, большие пробы усреднялись, перемешиванием и квартованием. Исследование золы на других котлах с ВТ также показало подобные распределения характеристик золы по дымоходам.

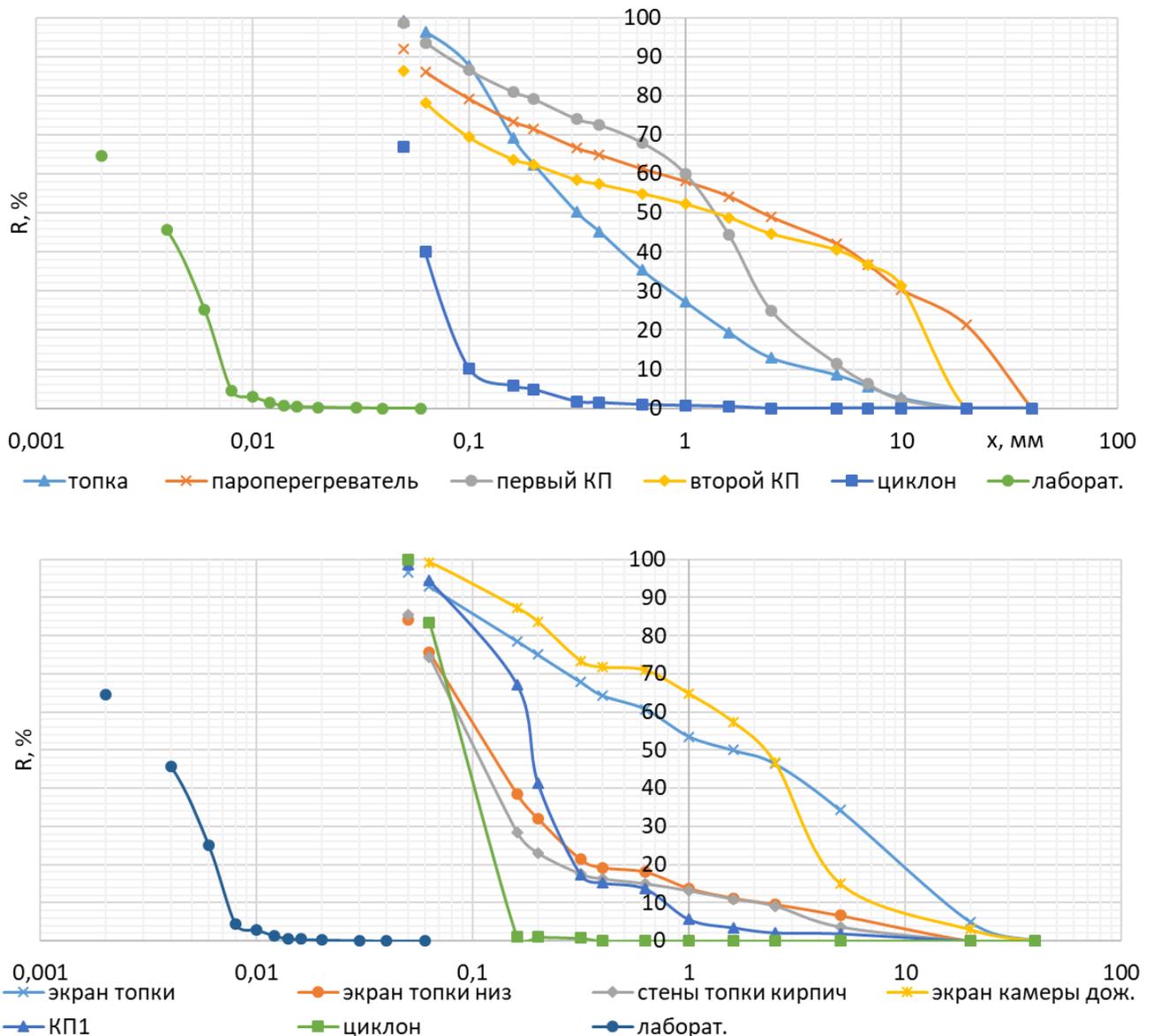


Рисунок 3.2 – Гранулометрические характеристики осаждающейся золы в котлах

Выявлено, что в более поздних модификациях котлов с вихревой топкой «Торнадо», котлах КЕ-10-1,4 в ООО «Донское Золото», п. Гигант и Е-14-1,4 ООО

«АгроСиб-Раздолье» [105], г. Барнаул, характеризующихся большей степенью экранирования и меньшим уровнем температур в вихревой топке, чем котел Е-16-21-350 ГМДВ Урюпинского МЭЗ [44], в конвективных газоходах осаждается заметно более мелкая зола (Рисунок 3.3). Это подтверждает правильность принятой модели поведения золы подсолнечной лузги в котлах.

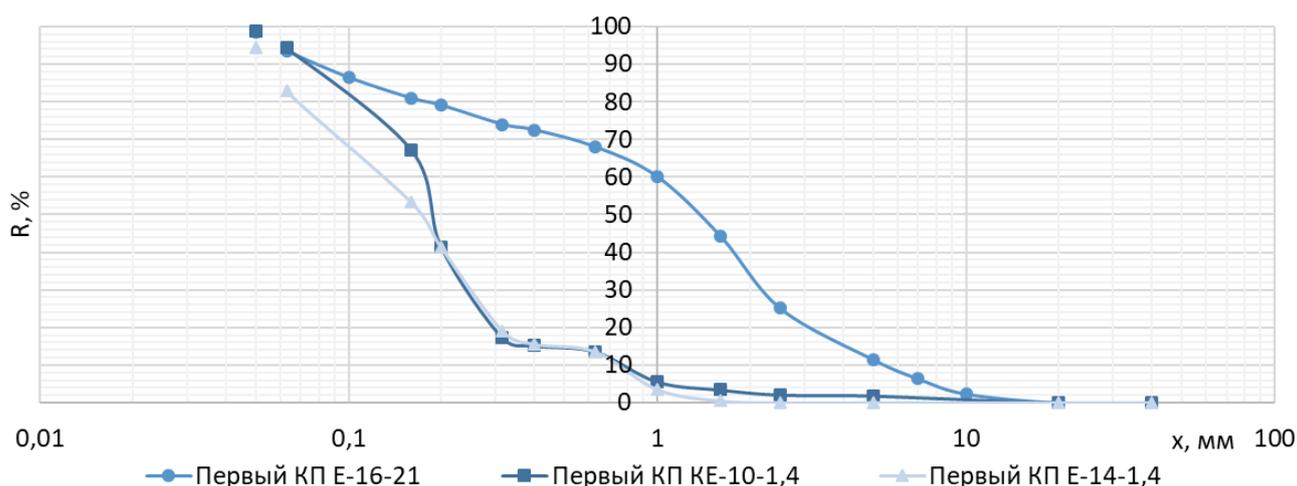


Рисунок 3.3 – Гранулометрические характеристики золы осаждающейся в первом

Таблица 3.6 – Зерновые характеристики золы лузги R , оседающей в элементах тракта дымовых газов котла Е-16-21-350 ГМДВ [44]

Размер сита, мм	топка	Паро П.	первый КП	второй КП	циклон
40	0	0	0	0	0
20	0	21,28	0	0	0
10	2,63	30,35	2,31	31,45	0
7	5,64	36,85	6,34	36,74	0
5	8,57	42,15	11,46	40,61	0
2,5	12,9	48,95	25,07	44,72	0
1,6	19,37	54,21	44,33	48,84	0,42
1	27,27	58,08	60,09	52,32	0,66
0,63	35,43	61,33	68,02	54,98	0,92
0,4	45,29	64,89	72,52	57,34	1,4
0,315	50,23	66,64	74	58,46	1,73

Размер сита, мм	топка	Паро П.	первый КП	второй КП	циклон
0,2	62,4	71,46	79,09	62,3	4,77
0,16	69,11	73,41	80,95	63,68	5,73
0,1	87,72	79,24	86,49	69,39	10,25
0,063	96,34	86,21	93,59	78,25	40,04
0,05	99,07	91,94	98,57	86,3	67,03
0	100	100	100	100	100
Горючие общ., %	7,82	7,66	9,21	8,96	17,94
Насыпная плотность, кг/м ³	883	689	618	821	478

Таблица 3.7 – Зерновые характеристики золы лузги R, оседающей в элементах тракта дымовых газов котла КЕ-10-1,4

Размер сита, мм	Ri					
	Стены топки	Стены топки скаты (низ)	Стены топки кирпич	Камера дож. с труб	КП 2	Циклон
40	0	0	0	0	0	0
20	5	0	0	3	0	0
5	34,3	6,63	3,65	15,03	1,87	0,00
2,5	46,4	9,56	9,12	46,72	2,13	0,00
1,6	50,0	11,22	10,95	57,38	3,47	0,00
1	53,6	13,76	13,14	64,75	5,60	0,00
0,63	60,7	18,05	14,96	70,90	13,60	0,00
0,4	64,3	19,22	16,24	71,72	15,20	0,00
0,315	67,9	21,37	17,52	73,36	17,33	0,66
0,2	75,0	32,10	22,99	83,61	41,33	1,00
0,16	78,6	38,54	28,47	87,30	67,20	1,00
0,063	92,9	75,61	74,45	99,18	94,40	83,39
0,05	96,4	84,20	85,40	99,59	98,67	100,00
0	100,0	100	100	100	100	100

Распределение гранулометрического состава частиц на поверхностях нагрева котлов от большего к меньшему медианному размеру частиц обусловлено испарительно-конденсационным механизмом переноса и спеканием зольных компонентов, этот процесс зависит от температуры.

3.3 Изменение состава золы при сжигании лугги

В ходе топочного процесса претерпевает существенные изменения не только гранулометрический состав золы, но и химический состав отложений. В таблице 3.8. приведены результаты анализа проб, отобранных из котла КЕ-10-14 ОГВ, ОАО «Чишминское» [44]. Для этого котла характерно использование большого топочного объёма над собственно вихревой топкой. В этом объёме топки в ходе испытаний осуществлялось сжигание природного газа с выделением 40...70% тепла.

Таблица 3.8. – Результаты анализа растворимых в воде соединений отложений золы

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7
Место отбора	Под топки	Стена топки	Кам. до-жиг.	Экран топки	КП 1	КП 2	экономайзер
pH	9,95	10,92	12,04	11,23	11,17	10,7	10,85
Прокаленный остаток, %	99,53	99,85	95,7	91,3	89,5	85,45	84,15
Mg, %	0,0	0,0	0,05	0,26	0,42	0,23	0,43
Ca, %	0,04	0,27	0,04	0,16	0,16	0,12	0,08
Na, %	0,93	0,77	0,87	0,46	0,56	0,45	0,48
K, %	2,7	8,21	14,23	26,37	17,33	23,76	19,75
ОН, %		0,07	1,35		0,13		
HCO ₃ , %	1,67			0,72		2,86	2,9
CO ₃ ²⁻ , %	0,47	0,94	2,58	15,07	11,28	10,77	8,58
Cl, %	0,28	0,03	0,31	1,78	0,61	1,52	0,99
SO ₄ ²⁻ , %	2,66	11,77	9,03	12,96	7,5	12,8	12,7
Катионы, %	3,67	9,51	15,91	27	18,47	24,56	20,74
Анионы, %	5,08	12,81	13,54	30,5	19,53	27,95	25,17

На анализ были представлены семь образцов отложений золы по ходу дымовых газов (по мере убывания температуры отложений):

1. со дна топки,
2. с неэкранированной стенки,
3. с пода камеры дожигания,
4. с экрана топки,
5. из лаза под котельным пучком 1,
6. из лаза под котельным пучком 2,
7. под экономайзером.

Все пробы отложений при действии соляной кислоты бурно вскипали кроме проб №1 и №2. Это свидетельствует о наличии карбонатов.

Пробы №1 и №2 со дна топки и с неэкранированной задней стенки вверху топки сформированы при высоких температурах. Остальные пробы образовались на кипяtilьных трубах, т.е. в условиях пониженных температур. Наличие карбонатов в более холодной золе свидетельствует о взаимодействии отложений с потоком дымовых газов и поглощением из них CO_2 . Таким образом, отложения золы претерпевают не только механические, но и химические превращения.

Для анализа растворимых в воде соединений пробы отложений были обработаны горячей водой 1:100 и отфильтрованы. Осадки после фильтрования были высушены и обработаны соляной кислотой. По-прежнему, наблюдалось вскипание, что свидетельствует о присутствии нерастворимых в воде карбонатов [44].

В фильтрате были определены следующие ионы: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , OH^- , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} . Все пробы имеют щелочную реакцию. Результаты анализа представлены в таблице 3.8.

Как показали результаты анализа, растворимые в воде части отложений практически не содержат ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} и содержат незначительное количество Na^+ .

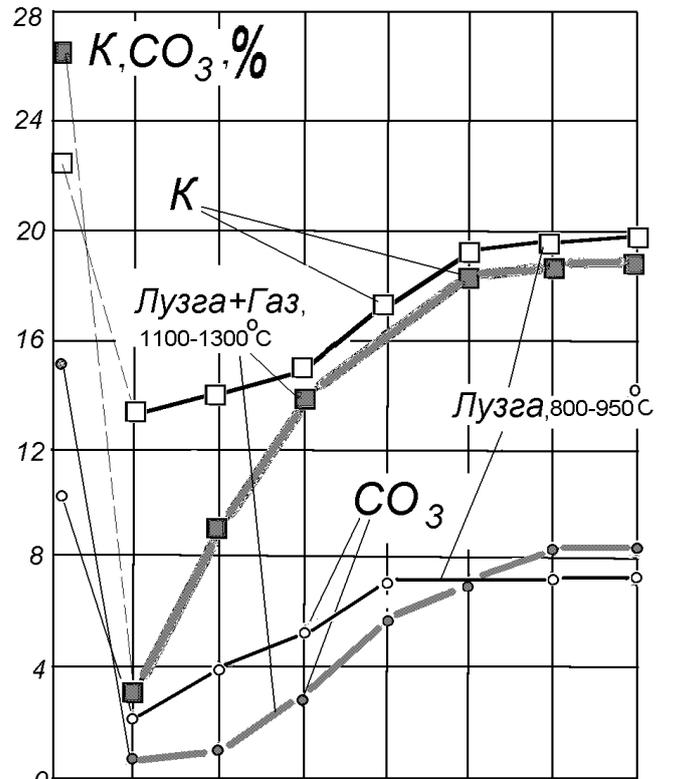
Из таблицы 3.8. видно, что состав отложений по ходу дымовых газов меняется с определенной закономерностью. Отложения, сформированные по конденса-

ционному механизму (на охлаждаемых поверхностях) характеризуются повышенным содержанием калия, карбонатов и сульфатов. Содержание кальция, магния и натрия в них мало. Главный вклад среди щелочных элементов даёт калий.

Отчетливо видно, что отложения в высокотемпературных зонах имеют малое содержание калия, т.е. калий и его соединения подвержены наибольшему высокотемпературным превращениям и возгонке. Карбонаты (CO_3^{2-}), как уже указывалось, присутствуют главным образом в натрубных отложениях благодаря их более низкой температуре. Подобный характер распределения по ходу дымовых газов имеют сульфаты (SO_4^{2-}).

Результаты анализа данных [108] показали, что прокаливание золы оказывает наибольшее влияние на содержания калия K и карбонатов CO_3^{2+} , как это видно на рисунке 3.5 [101].

Щелочные элементы, прежде всего калий и карбонаты, возгоняются из раскаленных частиц золы, лежащих в высокотемпературных зонах ВТ и КД, здесь их содержание минимально. Далее они переносятся и конденсируются в холодных зонах: на экранах и трубах, где их содержание максимально, а также покидают топку с газами. Исследование на котле с подсветкой факела за счет работы газовой горелки с повышением температуры с $800\dots 950\text{ }^\circ\text{C}$ до $1100\dots 1300\text{ }^\circ\text{C}$ показал значительное ускорение переноса золы. Калий и карбонаты интенсивно возгоняются и в первом котельном пучке КП1, где температура достаточно высока, $700\dots 900\text{ }^\circ\text{C}$, а далее они выносятся газами и высаживаются в отложениях на



Экр ВТ КД КП1 1-2 2-3 КП3 ЭКО
Рисунок 3.5 – Изменение доли калия и карбонатов в отложениях золы [101]

хвостовых поверхностях. Следует отметить, что согласно [112], соединения щелочных металлов играют ведущую роль в формировании отложений и при сжигании таких шлакующих топлив, как сланцы и канско-ачинские бурые угли.

Осмотр котлов, сжигающих подсолнечную лузгу показал, что даже проплавленные сверху отложения имеют тонкий слой, первичных отложений прилегающий непосредственно к трубам. Это отложения с низкой плотностью и теплопроводностью [44]. И такие, первичные, отложения имеются на всех трубах. В зоне высоких температур, прежде всего в КП1, над рыхлым слоем формируется слой плотной проплавленной золы. Плотный слой быстро растет со стороны набегания потока газов на трубы и его появление мы объясняем прилипанием прилетающих расплавленных частиц к рыхлому слою первичных отложений.



Рисунок 3.6 – Вид отложений: *слева* – на входе в конвективные пучки (прочные крупные отложения, до 200мм); *справа* – в экономайзере (рыхлые)

Формирование плотных отложений с интенсивной сепарацией липких проплавленных частиц из потока происходит только в высокотемпературных зонах. При закрытии топочных экранов золой температура в топке возрастает и зона повышенных температур смещается вглубь КП1. Процесс налипания золы далее обретает лавинообразный характер.

Крупные отложения обрушаются с котельных труб и заполняют газоходы (Рисунок 3.6 слева), закрывают проход выходящим газам с остановом котла по

отсутствию тяги. В низкотемпературных зонах (Рисунок 3.6 справа) отложения остаются рыхлыми, они выносятся естественным образом и стабильны по толщине.

3.4 Улетучивание минералов из золы

В настоящее время считается, что при образовании слоев золовых отложений на поверхностях нагрева значительную роль играют процессы улетучивания минералов в топочном объеме. Интенсивность улетучивания отдельных компонентов минералов золы топлива зависит, главным образом, от температуры, состава газовой среды и условий диффузии паров внутри частицы.

Улетучивание компонентов минералов изучали экспериментально, например, [112] и преимущественно для энергетических топлив. Исследованию обычно подвергается зола, полученная путем лабораторного озоления топлив при температуре 800°C.

Для определения улетучивания отдельных компонентов навески подвергались нагреванию в контролируемой среде при постоянной температуре. Общие потери массы определялись как разности между первоначальной и конечной массами проб. Количество отдельных улетучившихся компонентов находится по химическому составу остатков. Например, при температуре 1000°C из золы сланцев улетучивается около 40% хлора и натрия и примерно 20% калия. Потеря серы при температуре 1020°C равна 26%, с увеличением температуры непрерывно уменьшается и при 1810°C составляет лишь 7%. Такое поведение серы в золе при нагревании в восстановительной среде вызвано процессом восстановления сульфатов в сульфиды. Соединения щелочных металлов и хлора улетучиваются полностью при температуре 1300°C [112].

Отмечается, что температура начала улетучивания и характер процессов для соединений алюминия, кальция и магния из других топлив и искусственных смесей приблизительно те же.

Важное влияние при улетучивании имеет скорость нагревания частиц топлива в топке. В результате высокой скорости нагревания процессы, протекающие с

неорганической частью топлива, в этих условиях могут отличаться от процессов, наблюдаемых в лабораторных условиях.

Указывается, что углерод, как сильный восстановитель, а также сера способны восстанавливать не только свободные, но и связанные металлы, кремний и др. элементы. Например, при контактно-восстановительном действии углерода и серы из окиси кремния создаются соединения SiO , SiS и SiS_2 . Они являются промежуточными продуктами, которые в потоке снова окисляются, в результате этого образуется очень мелкодисперсный туман с размерами частичек $0,015 \dots 0,25$ мкм. Образовавшиеся таким образом [112] мелкие частицы окиси кремния отлагаются на поверхностях нагрева, способствуя образованию первоначальных слоев золовых отложений на поверхностях нагрева.

Результаты исследования (Рисунок 3.7) качественного влияния температуры ($1000 \dots 1400^\circ\text{C}$) и состава среды (воздух, CO и CO_2) показывают, что скорость улетучивания соединений калия из золы эстонских сланцев сильно зависит от температуры и состава среды. При повышении температуры на 100°C скорость улетучивания соединений калия увеличивается в $4 \dots 6$ раз в воздушной среде и в среде окиси углерода, и в $3 \dots 5$ раз в среде двуокиси углерода. В среде окиси углерода (при одной и той же температуре) соединения калия улетучиваются в 50 раз быстрее, чем в воздушной среде. В среде CO_2 скорость улетучивания в 5 раз выше, чем в воздушной среде [111].

Более интенсивное улетучивание соединений калия в среде окиси углерода объясняется нарушением окисью углерода кристаллической решетки тех минералов, которые содержат щелочные металлы и кислород, так как изъятие кислорода из кристаллической решетки освобождает от связей атомы щелочных металлов. Повышение интенсивности улетучивания щелочных металлов в восстановительной среде отмечается и для золы бурых углей.

При проведении пусконаладочных испытаний [90] котлов КЕ-10-14ОГВ в ОАО «Чишминское» в режиме двухступенчатого топочного процесса с рециркуляцией дымовых газов отмечался ускоренный рост натрубных отложений.

Благодаря схеме сжигания подсолнечной лузги с газификацией и рециркуляцией дымовых газов, температура в топке была понижена, однако котельные трубы быстро покрылись рыхлыми отложениями золы. Этот факт можно легко объяснить в соответствии с рисунком 3.7. Быстрый рост отложений здесь был связан с наличием в вихревой топке восстановительной среды с повышенным содержанием СО и из-за значительного содержания в золе лузги соединений калия, таблица 3.7.

Из составляющих золы наиболее низкие температуры улетучивания имеют хлориды щелочных металлов. Улетучивание NaCl начинается уже при температурах 400°C и резко повышается при 800°C, в то же время улетучивание Na₂SO₄ наблюдается при температурах выше 800°C и становится интенсивным только при температурах выше 1000°C.

Изменение состава золы зависит от состава окружающей среды, это показано на рисунке 3.8 [113] и подтверждает первоочередное улетучивание хлоридов.

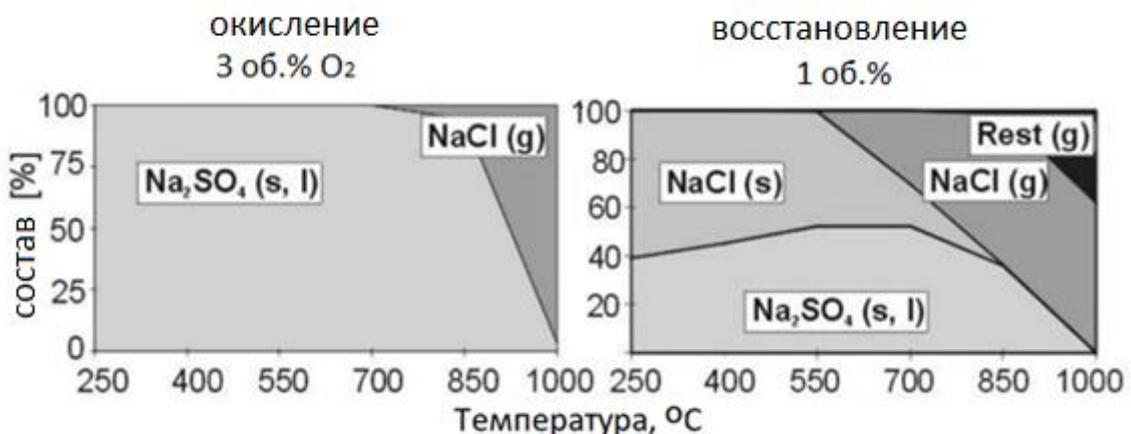


Рисунок 3.8 – Равновесный состав золы в зависимости от содержания O₂ или CO

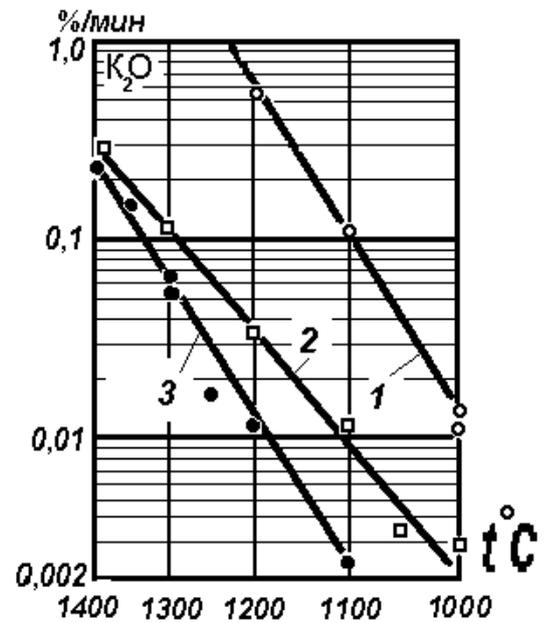


Рисунок 3.7 – Зависимость интенсивности улетучивания соединений калия из золы сланцев от температуры: 1 – CO; 2 – CO₂; 3 – воздух [111]

Особенно значительное и глубокое развитие получили исследования поведения золы при переходе к использованию биотоплив и растительных материалов в возобновляемой энергетике за рубежом [114, 115].

Поведение различных образцов биомассы при плавлении золы (Таблица 3.9) показывает, что зола соломы, злаков и трав, содержащая низкие концентрации Са и высокие концентрации К, начинает спекаться и плавиться [116] при значительно более низких температурах, чем традиционное древесное топливо.

Кальций и магний обычно повышают температуру плавления золы, а калий и натрий снижают ее. Кремний в сочетании с К и Na может приводить к образованию легкоплавких силикатов в частицах летучей золы [117]. Таким образом, желательно иметь низкие концентрации К и Na в топливе. Другими второстепенными элементами, образующими золу, присутствующими в различных видах топлива из биомассы, являются Fe, Al, Mn и тяжелые металлы [116].

Таблица 3.9. – Температура плавления различных образцов биомассы [115]

№	Название	Плавокость			
		начало деформации	сфера	полусфера	растекание
1	Сосна	1190	1200	1220	1280
2	Эвкалипт 1	1160	1170	1190	1230
3	Эвкалипт 2	1150	1230	1240	1260
4	Пробка	1190	1200	1220	1280
5	Ладанник	1360	1360	1370	1390
6	Оливковое дерево	1280			>1400
7	Тополь	>1400	>1400	>1400	>1400
8	Подсолнух	740		1360	1390
9	Пшеничная солома	850	1040	1120	1320
10	Рисовая солома	860	980	1100	1220
11	Чертополох 1	640	660	1150	1150
12	Чертополох 2	1250	1300	1330	>1400
13	Чертополох 3	>1400	>1400	>1400	>1400

№	Название	Плавокость			
		начало деформации	сфера	полусфера	растекание
14	Капуста 1	730			>1400
15	Капуста 2	1280			>1400
16	Миндальная скорлупа 1	700			>1400
17	Миндальная скорлупа 2	750	770		>1400
18	Оливковые косточки	1030		1090	1160
19	Альперухо	1260	1280	1300	1320
20	Орухильо	1260		1320	1330

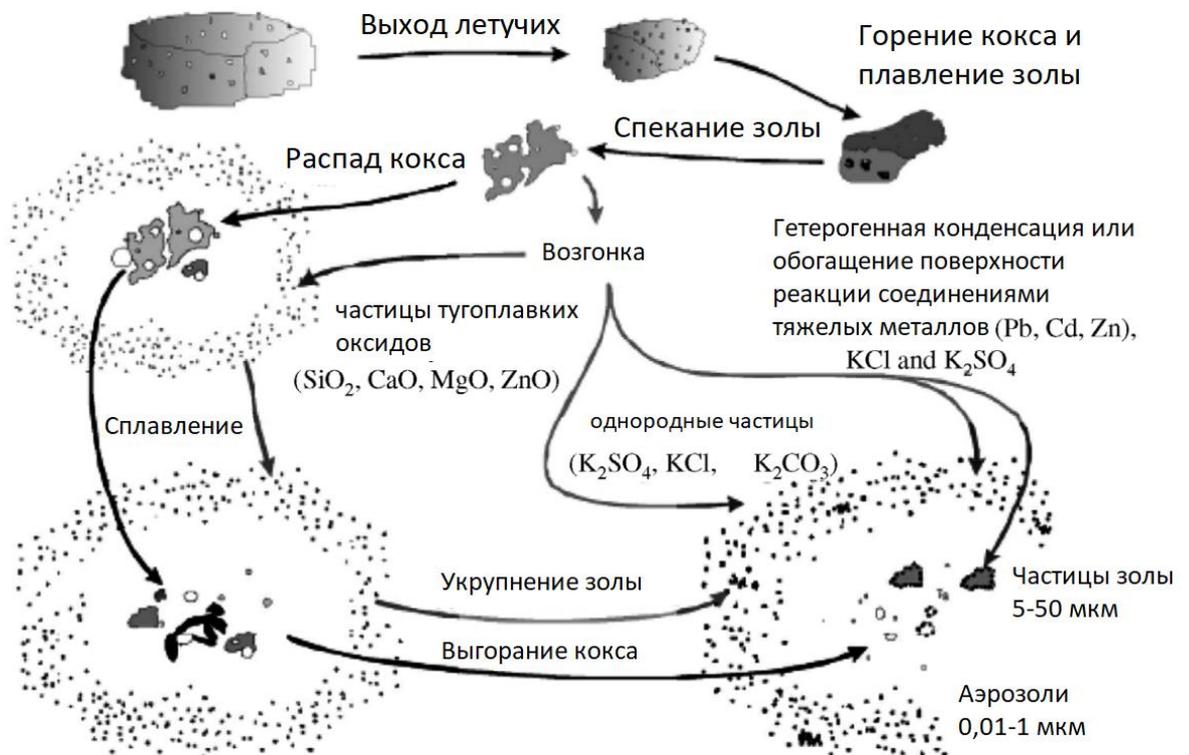


Рисунок 3.9 – Механизмы преобразования золы при сжигании топлива [115]

Как видно из рисунка 3.9 [115], существуют неорганические компоненты материалов биомассы, которые являются летучими при температурах горения, в частности, некоторые соединения щелочных металлов (K и/или Na), фосфаты и некоторые соединения тяжелых металлов. Эти частицы могут выделяться в дымовые газы в виде дыма или конденсирующегося пара. Другие неорганические вещества, главным образом соединения кальция и кремния, могут выделяться из горящих частиц топлива в виде очень мелкодисперсных субмикронных частиц.

Баланс неорганической фракции биомассы претерпевает несколько химических и физических преобразований в зависимости от химического состава, температуры горения и времени пребывания с образованием более крупных частиц остаточной золы. К основным минеральным превращениям и химическим реакциям, которые могут происходить при повышенных температурах, относятся:

- плавление или частичное плавление частиц кварца и кремнезема и при высоких температурах, химическое взаимодействие с другими компонентами золы, в основном с образованием силикатов щелочных металлов;
- плавление или частичное плавление алюмосиликатов;
- разложение карбонатов, оксалатов, хлоридов и т. д. и других неорганических солей;
- улетучивание щелочных металлов и некоторых тяжелых металлов;
- фрагментация частиц тепловым ударом и быстрое выделение газообразных веществ из частиц;
- слияние внутрочастичных минеральных компонентов.

Конкретные детали «механизмов выброса» и «процессов во внутритопочной золе и шлаке» во многом зависят от типа камеры сгорания, т. е. от температуры пламени и времени пребывания при повышенных температурах.

Химический состав крупной летучей золы обычно подобен составу золы в слое. Тонкодисперсные аэрозоли, размер которых обычно меньше микрона, образуются в результате конденсации паровой фазы летучих неорганических соединений. Соединения кальция не считаются летучими в этих условиях, он присутствует в значительной концентрации только при размерах частиц выше примерно 0,8 мкм

[117]. Общие выводы об образовании летучей золы и аэрозолей при сжигании биомассы на колосниковой решетке [118]:

– Распределение частиц летучей золы по размерам обычно бимодальное, с основным пиком крупной летучей золы в диапазоне размеров больше 1 мкм, с максимальным размером частиц до 200...500 мкм и аэрозольным пиком в субмикронном диапазоне.

– В общей концентрации летучей золы в дымовых газах преобладает образование крупной летучей золы за счет уноса частиц золы в дымовые газы. Количество летучей золы зависит от содержания золы в топливе и рабочих параметров колосниковой решетки.

– Концентрация аэрозоля в дымовых газах и состав аэрозольного материала в основном зависят от химического состава топлива, т. е. от содержания летучих соединений (щелочных металлов, свинца и цинка) и очень мелких содержащихся в топливе твердых частиц, богатых кальцием.

Понимание рассмотренных механизмов переноса золы при разработке котлов для сжигания растительных отходов важно, с одной стороны, для предотвращения спекания и плавления золы на колосниковой решетке, а с другой стороны, во избежание зашлаковывания летучей золой стен топки и/или конвективных поверхностях нагрева котла. Кроме того, улетучивание и последующая конденсация летучих металлов приводит к образованию субмикронных частиц летучей золы (аэрозолей), которые образуют отложения с высоким тепловым сопротивлением на трубах котлов, трудно осаждаются в пылевых фильтрах и представляют опасность для окружающей среды и здоровья людей.

3.6 Образование отложений

Образование отложений в котле обычно происходит на поверхностях нагрева. Механизм загрязнения поверхностей нагрева котлов щелочными соединениями мало зависит от их первоначальных форм в топливе. Образование активных в процессах загрязнения и коррозии щелочных соединений [112, 115] происходит обычно в топке, где в результате термического разложения и диссоциации разных

минералов топлива щелочные соединения улетучиваются под влиянием высоких температур и среды.

Из образующихся в топочном процессе соединений щелочных металлов термически наиболее устойчивыми являются пары чистых металлов, которые, передвигаясь в зону более низких температур, переходят в гидроксиды, а затем, реагируя с кислыми компонентами продуктов сгорания (HCl , SO_2 , SO_3 , O_2), образуют хлориды и сульфаты. Сульфаты и хлориды щелочных металлов при благоприятных условиях могут конденсироваться на поверхностях нагрева [119].

Как скорость осаждения золы, так и свойства отложений золы важны с точки зрения работы камеры сгорания. Свойства зольных отложений, наиболее важные для эффективной работы котла, включают такие вопросы, как легкость удаления со стенок камеры сгорания или поверхности теплообменника, вязкость, эффективная теплопроводность, эффективная излучательная способность, прочность отложений, элементный состав.

Формирование твердых отложений можно описать четырьмя наиболее важными этапами:

1. образование частиц золы;
2. перенос частиц золы или золообразующего соединения на поверхность;
3. сцепление с поверхностью;
4. формирование и нарастание отложений.

После образования частицы золы, как описано выше, частица транспортируется к поверхности теплопередачи котла до того, как может произойти осаждение. После того, как частица золы попадет на поверхность, она может прилипнуть к ней. Адгезия может происходить либо за счет сил Ван-дер-Ваальса, либо за счет приклеивания к поверхности. Это возможно, когда присутствует частично расплавленная фаза, которая может действовать как клей между частицей и поверхностью. Когда образуется газообразный зольный состав, он может диффундировать на поверхность и конденсироваться непосредственно на более холодной поверхности.

Плавление золы следует считать гораздо более сложным по сравнению с плавлением одной соли. В то время как отдельная соль может иметь одну точку

плавления, смеси зольных соединений следует рассматривать как многокомпонентную систему, имеющую температурный диапазон плавления. Этот температурный интервал между температурой начала плавления и температурой полного плавления, также называемый температурой жидкоплавкого состояния, может составлять от нескольких до сотен градусов, см. таблицу 3.9.

Липкость частиц золы сильно зависит от температуры и физического состояния. Присутствие расплава в частице золы действует как связующий агент для частицы. С точки зрения клейкости золы большое значение имеет температура, при которой присутствует достаточное количество расплава, чтобы приклеить частицу золы к поверхности.

Если толщина отложений увеличивается, профиль температуры внутри отложений изменится. При критической толщине температура со стороны дымовых газов может повысится настолько, что количество расплава в отложениях станет таким, что отложения начнут течь (шлакообразование) и отложения больше не будут увеличиваться в толщину.

Температурные пределы и интенсивность конденсации щелочных соединений на поверхностях нагрева зависят, главным образом, от их парциального давления в продуктах сгорания. Опыты, проведенные Бишопом и др. [119], показали, что в процессах конденсации щелочных металлов определяющей является точка росы соответствующего соединения. Ниже этой температуры интенсивность конденсации соединения зависит, в основном, лишь от его парциального давления в продуктах сгорания и почти не зависит от температуры поверхности. Если температура поверхности поднимается выше температуры точки росы, то интенсивность конденсации резко падает до нуля. Было также показано, что интенсивность отложения NaCl из потока продуктов сгорания на охлаждаемую поверхность зависит прямолинейно от массовой скорости конденсирующегося вещества.

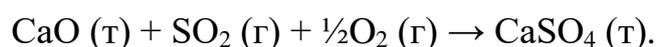
Аналогично щелочным хлоридам ведут себя и пары щелочных сульфатов. Разница состоит лишь в том, что они начинают конденсироваться при более высоких температурах, чем щелочные хлориды, т. е. имеют более высокие температуры точки росы. Опыты Бишопы при сжигании английских углей Вест-Мидлэндского

месторождения с высоким содержанием хлора и щелочных металлов ($\text{Na}_2\text{O}=6,6\dots7,3\%$ и $\text{K}_2\text{O}=1,0\dots1,1\%$ в низкотемпературной золе) показали, что интенсивная конденсация паров Na_2SO_4 начинается в области температур поверхности $900\dots930^\circ\text{C}$, а точка росы NaCl находится в интервале $720\dots740^\circ\text{C}$.

Поскольку температура металла поверхности нагрева обычно ниже температуры точек росы щелочных хлоридов и сульфатов, то первоначальные отложения золы при сжигании топлив с высоким содержанием щелочных металлов и хлора обогащаются этими соединениями. Очевидно, что с повышением температуры наружных слоев отложений за счет роста их теплового сопротивления роль щелочных сульфатов в процессе образования отложений падает [115]. Из сказанного следует, что механизм загрязнения поверхностей нагрева из-за непрерывного роста толщины отложений может меняться.

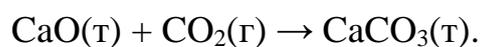
В процессе загрязнения немаловажную роль играет температура продуктов сгорания. Очевидно, что конденсация соответствующего соединения может произойти тогда, когда температура газов выше температуры точки росы [115].

Как указывалось выше, при сжигании биомассы выделяются золообразующие вещества, которые вступают в реакцию с компонентами дымовых газов и друг с другом. К наиболее важным реакциям при сжигании лузги относятся сульфатирование:



Эта реакция имеет большое значение для остальной части химии дымовых газов, поскольку она удаляет свободную двуокись серы, SO_2 , из дымовых газов. Следовательно, SO_2 не будет так легко доступен для других конкурирующих реакций, таких как сульфатирование хлоридов щелочных металлов.

Рекарбонизация может быть важной реакцией в некоторых случаях загрязнения:



Эта реакция может вызвать спекание частиц CaO , осевших на некоторых поверхностях в системе дымовых газов, в твердые отложения (реакционное спекание). Это происходит, когда температура дымовых газов падает ниже примерно

800 °С, но реакция становится очень медленной при температурах ниже примерно 600 °С, следовательно, эта реакция возможна между этими двумя температурами.

Анализ результатов режимно-наладочных испытаний и работы котлов на лузге с вихревыми топками «Торнадо» [91, 92, 101, 105] подтверждает, что образование твердых отложений характерно именно для первых по ходу конвективных поверхностей нагрева, находящихся в выше обозначенном температурном диапазоне. Более подробно этот механизм применительно к котлам, работающим на подсолнечной лузге, рассмотрен в разделе 3.3 текущей главы.

Сера присутствует в биомассе как в виде неорганических анионов сульфата, так и в виде органической серы. Согласно последним исследованиям, примерно 3/4 серы в биомассе находится в органически связанной форме и 1/4 в виде растворимых сульфатов щелочных металлов [120]. Органическая сера будет полностью высвобождаться при сгорании, главным образом в виде H_2S и других восстановленных газообразных частиц, которые затем окисляются до SO_2 .

При сжигании подсолнечной лузги, практически вся высвободившаяся сера вступает в рассмотренную выше реакцию с кальцием и образует сульфат кальция ($CaSO_4$), инертный при дальнейшем движении по газовому тракту котла. Во множестве результатов, полученных автором, при газовом анализе уходящих газов за котлами, сжигающими подсолнечную лузгу в вихревых топках, диоксид серы не обнаружен.

При анализе опытного сжигания лузги подсолнечника в пылеугольном котле [30] исследователи заключают: «поскольку зола лузги преимущественно состоит из оксидов калия и кальция и содержит хлор 3800...5400 мг/кг, загрязнения поверхностей нагрева котла обусловлен не ее плавкостными характеристиками, а склонностью простых солей и органически связанных металлов к выпариванию из топлива во время горения и переходу в газовую фазу с последующей конденсацией в виде хлоридов в зонах с пониженными температурами».

Осмотр и исследование отложений в котлах на подсолнечной лузге (см. рисунок 3.6) показывает, что все трубы покрыты тонким светло-серым налетом [91], преимущественно состоящим из соединений калия. В исследовании ВТИ [30]

также утверждается что: «во многих случаях при сжигании биомассы на конвективных поверхностях нагрева обнаруживаются чистые кристаллы KCl, формирующие тонкий налет светло-серого или серо-желтого цвета».

Причина интенсивной возгонки золы подсолнечной лузги еще и в том, что в ней содержатся одновременно разные щелочные металлы, что приводит к формированию эвтектических соединений, имеющих более низкие температуры фазовых переходов чем отдельные компоненты. Так «температура плавления тройной эвтектики NaCl–KCl–CaCl₂ составляет 465°C» [30].

3.7 Формирование отложений

Формирование зольных отложений на поверхностях теплообмена в котле представляет собой сложное явление. Это результат ряда физических и химических процессов и их исследование преследует две цели: выяснить механизм засорения и определить влияние зольных отложений на теплообмен.

Применительно к котлам с вихревыми топками, работающим на лузге, раскрытие механизмов образования отложений и поиски способов борьбы с ними направлены на обеспечение технического результата, включающего:

- поддержание низкотемпературного экологически эффективного топочного процесса с обеспечением поглощения серы;
- предотвращение повышения температуры уходящих газов;
- предотвращение повышения аэродинамического сопротивления газового тракта;
- обеспечение на основе этих мероприятий длительного периода работы котла без остановок для очистки его поверхностей нагрева.

Как было рассмотрено выше в подразделах 3.5 и 3.6, золовые загрязнения происходят при переносе частиц золы из газовой среды на поверхность труб котла и конденсации компонентов дымовых газов из паровой фазы на трубах при соответствующих условиях. Химический и минералогический состав зольных отложений на трубах котла закономерно отличается от состава летучей золы, проходящей

через поверхность теплообмена. Это различие обусловлено селективным отложением частиц золы на поверхности, химическими реакциями, спеканием и другими процессами внутри слоя.

Отложения золы на трубах котла подавляют передачу тепла от дымовых газов к нагреваемой среде за счет термического сопротивления.

Радиационный теплообмен между топочной средой и трубами котла зависит от излучающей способности и структуры поверхности отложений золы и концентрации золы в топке. Излучающая способность образовавшегося зольного отложения уменьшается с повышением температуры, однако абсолютное значение может варьироваться в широких пределах (0,20...0,95) [115].

На основании ряда исследований грубые оценки теплопроводности (Вт/м×К) различных типов зольных отложений следующие:

- рыхлые и слабосвязанные – 0,1;
- связанный и спеченный осадок – 1;
- шлаковый осадок – 2;
- богатый железом шлаковый осадок – 3.

Обрастание является как физическим, так и химическим явлением, в котором преобладают или действуют вместе с химическими процессами физические силы. В первом случае образуются рыхлые отложения. Во втором случае нагар прилипает к металлу трубы. Часто физические и химические процессы продолжаются внутри отложенного слоя.

По механизму загрязнения теплообменных поверхностей зольные отложения можно классифицировать следующим образом:

1. Рыхлый осадок: образуется, когда твердые частицы соединяются друг с другом на поверхности под действием механических сил. Рыхлый осадок обычно быстро стабилизируется и приобретает форму, определяемую условиями течения газа.
2. Связанный осадок: образуется, когда твердые частицы связаны с поверхностью и друг с другом за счет химических сил. Одновременно может происходить конденсация или десублимация паров. В результате неограниченного роста осадка,

он может покрывать поверхность толстым слоем. Наиболее распространены залежи связанной золы сульфатного типа.

3. Шлаковые отложения: образуются из твердых, размягчающихся и плавящихся частиц золы. Его свойства зависят от химического состава золы, температурных условий и состава дымовых газов. В отложениях могут происходить химические реакции. При подходящих условиях шлаковые отложения разрастаются очень быстро и в первую очередь покрывают поверхности нагрева топки.

На рисунке 3.10 схематически показана форма рыхлых и связанных зольных отложений, образующихся на трубе с поперечным омытием [115]. Перенос частиц из газового потока на поверхность и их способность к прилипанию определяют зольное обрастание поверхности теплообмена котла.

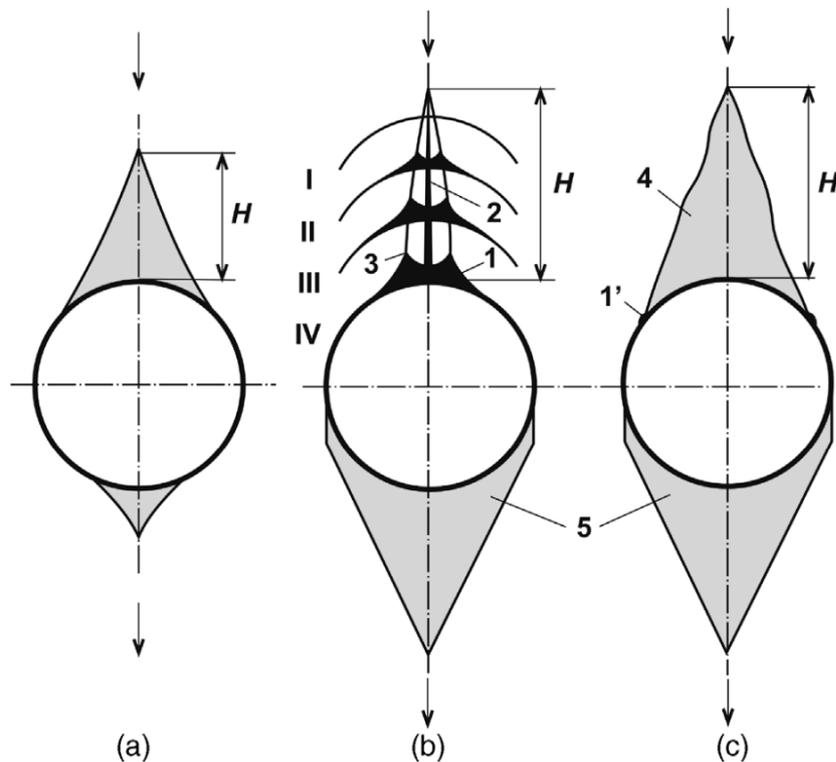


Рисунок 3.10 – Отложения, образовавшиеся на трубе с поперечным омытием: *a* – рыхлый осадок; *b* – связанный осадок (твёрдый осадок на лицевой стороне и слабо связанный на обратной стороне); *c* – слабо связанный рыхлый осадок на передней и задней сторонах; *1* – основание; *2* – средний гребень; *3* – боковой гребень; *4* – рыхлый гребень; *5* – рыхлый осадок на тыльной стороне; *1'* – тонкий твёрдый боковой слой; *I-IV* – стадии образования твёрдого осадка [115]

Среда внутри газоходов котла обычно находится в турбулентном движении. Образуется буферный или переходный слой, отделяющий ламинарный пограничный слой вдоль поверхности трубы от турбулентной среды. Мелкие частицы в ламинарном пограничном слое движутся вместе с потоком газа и способны покидать слой под действием поверхностных сил. Частицы, тормозной путь которых больше толщины пограничного слоя и, следовательно, имеют достаточный запас кинетической энергии, проходят слой и налетают на поверхность.

На частицы золы действуют различные физические силы: броуновское движение (молекулярная диффузия), термофорез (тепловая диффузия), электрофорез (электростатическая диффузия), сила инерции и силы, вызванные вихрями, и т. д. Важна также прямая конденсация или десублимация компонентов из дымовых газов на поверхность.

Рыхлый осадок образуется в результате переноса частиц золы в твердом состоянии из дымовых газов на трубы теплообменной поверхности. В этом типе отложений частицы связаны друг с другом и с поверхностью трубы межмолекулярными (механическими) силами.

Крупные частицы (обычно $> 10...20$ мкм), находящиеся под влиянием в основном инерционных сил и сил сопротивления, переносятся на поверхность по инерции. Сила инерции пропорциональна массе частицы; сила сопротивления пропорциональна поверхности проекции частицы. Более крупные частицы имеют больше шансов соприкоснуться с поверхностью. Более мелкие частицы стремятся пройти трубку, и вероятность их осаждения заметно меньше.

Связанный осадок образуется на трубах поверхности теплообмена в результате переноса частиц на поверхность труб и за счет реакций частиц с металлом труб или между самими частицами под влиянием компонентов дымовых газов. Необходимым условием образования связанного осадка является достаточная концентрация активных соединений в дымовых газах и твердых частиц золы определенного химического состава.

В отличие от рыхлых отложений, рост связанных отложений не прекращается со временем. На скорость роста и прочность связанного осадка в первую очередь влияют температура, скорость дымовых газов и гранулометрический состав золы. Связанный осадок, образующийся на лицевой стороне трубы, может иметь как плотную, так и пористую структуру. Однако на тыльной стороне трубы образуется слабосвязанный осадок пористой структуры, так как эта сторона экранирована от действия более крупных частиц золы, обладающих высокой кинетической энергией.

На рисунке 3.11 показана скорость роста отложения золы $\Delta H/\Delta \tau$ (H – высота отложения, τ – время), образующегося на трубе в зависимости от скорости и температуры дымовых газов (ϑ) при сжигании сланцевого топлива [121, 122]. Зола уноса сланцевого топлива содержит (мас.%): $\text{CaO} = 41$ в качестве активного компонента и $\text{SiO}_2 = 30$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 8$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 6$ как нейтральные компоненты. Кривые соответствуют интервалу температур дымовых газов $560 \dots 700$ °С. Средняя концентрация летучей золы в дымовых газах составила 10 г/м^3 , средний размер частиц $d_m = 35 \text{ мкм}$, а диаметр наибольшей частицы около 250 мкм . В этом диапа-

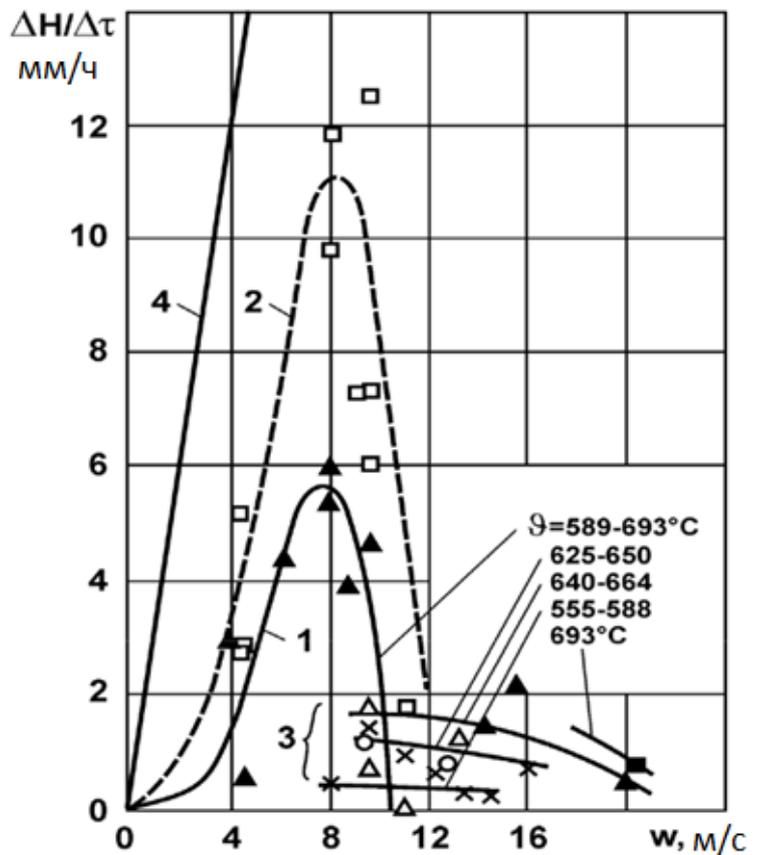


Рисунок 3.11 – Зависимость скорости роста связанного осадка, образующегося на передней стороне трубы, от скорости и температуры дымовых газов; 1, 2 – средняя и максимальная скорость роста слабо связанного осадка; 3 – скорость роста сильно связанного осадка (1-3 – $d_m 35 \text{ мкм}$); 4 – $d_m 5 \text{ мкм}$ [122]

зоне температур газа соединения щелочных металлов находятся в твердом виде и их конденсация на поверхности невозможна.

Результаты, представленные на рисунке 3.11, согласуются с теоретическим объяснением образования отложений связанной золы и дают возможность сравнить результаты и определить критические скорости дымовых газов, обусловленные механизмом образования отложений. До скорости $w = 8$ м/с скорость роста слабосвязанного осадка увеличивается. Однако между скоростями 8 и 12 м/с скорость загрязнения быстро падает, и вместо образования слабосвязанного осадка начинает формироваться твердосвязанный осадок. Первая критическая скорость $w_{кр1}$ дымовых газов составляет 10...12 м/с.

Правая часть рисунка 3.11 соответствует твердосвязанным отложениям. Скорость роста слабосвязанного осадка может во много раз превышать скорость роста жесткосвязанного осадка. Последняя уменьшается с увеличением скорости дымовых газов. Вторая критическая скорость $w_{кр2}$, выше которой образование отложений становится невозможным, превышает 20 м/с. Экспериментальные результаты показывают важность температуры дымовых газов для образования твердосвязанных сульфатных отложений. Скорость роста отложений увеличивается с повышением температуры газа, что обусловлено в основном возрастающей скоростью сульфатации внутри отложений (главным образом сульфатации CaO).

При отсутствии более крупных частиц золы в газовом потоке натрубные отложения могут расти очень быстро, так как отсутствуют более крупные частицы, тормозящие рост отложений (кривая 4 на рисунке 3.11). При сжигании подсолнечной лузги именно такая тончайшая зола очень быстро покрывает поверхности нагрева котла критически повышая сопротивления теплопередачи и аэродинамическое.

По результатам исследования [123] распределение частиц золы по размерам и химический состав топлива играют важную роль в формировании и росте отложений, увеличении прочности и удалении отложений. Отложения на задней по ходу газов стороне трубы в основном образованы частицами золы размером менее

10 мм из-за вихревого удара в то время, как частицы золы размером более 10 мм вносят больший вклад в отложения на передней стороне (Рисунок 3.12).

При анализе эффективности режимов обдувки экранов топки котла исследователи пришли к выводу, что более частая обдувка (раз в 1,5-2 часа) паром с низким давлением (1,2 МПа) более эффективна, чем обдувка раз в три часа паром с давлением 3 МПа, поскольку не сбитые отложения постепенно упрочняются [123].

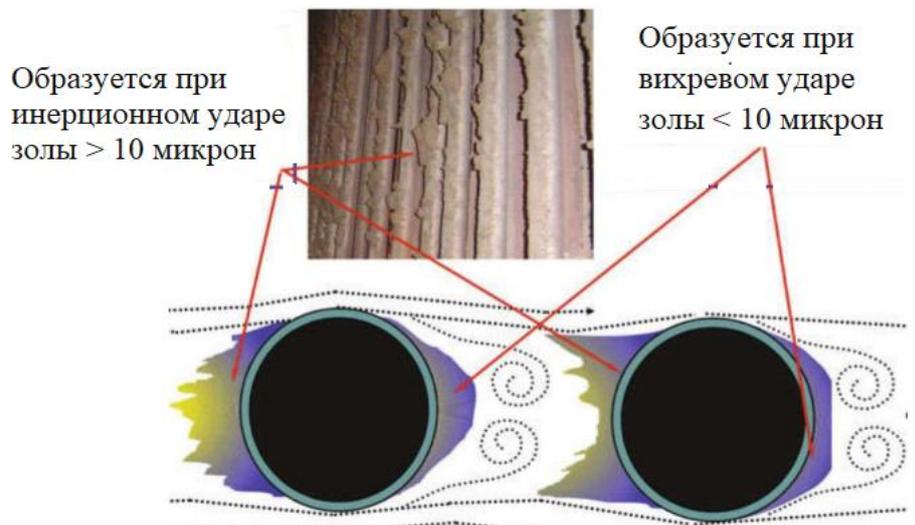


Рисунок 3.12 – Формирование отложений золы на трубах

Понимание механизмов формирования отложений и представление о характерных местах шлакования и золового загрязнения котлов на сильношлакующих биотопливах необходимо для разработки эффективных способов и технических решений для борьбы с негативными последствиями поведения золы в котлах.

Поверхности нагрева котлов, работающих на посолнечной [91] покрываются отложениями различной формы, каждая из которых характерна для определенной температурной зоны газового потока. Помимо температуры газов в месте формирования отложений на их внешний вид, форму и содержание влияют скорость и компонентный состав газовой среды, температура поверхности осаждения, аэродинамика потока.

Внешний вид значительно меняется в зависимости от места расположения в одном котле, но остается характерным в целом для всех котлов, работающих на подсолнечной лузге. Характерные формы представлены на рисунке 3.13.

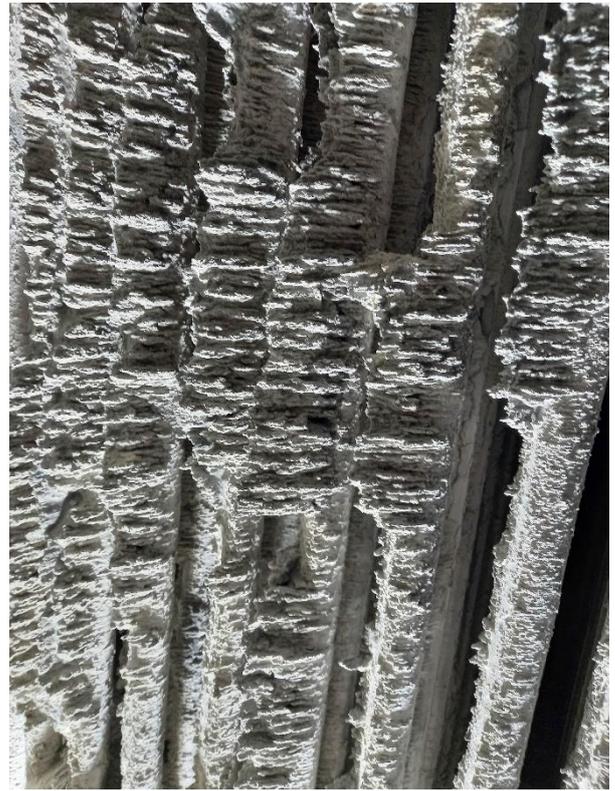
*a**б**в**г*

Рисунок 3.13 – Внешний вид отложений на поверхностях нагрева котлов, сжигающих подсолнечную лузгу: *a* – равномерный белый слой на экранах и толстые отложения в зонах турбулентности; *б* – корообразные хрупкие отложения на входе в конвективные пучки; *в* – прочные гребневидные отложения в зоне высоких температур в топке; *г* – занос горизонтальных труб рыхлой золой.

Характерный вид отложений в котлах на подсолнечной лузге (Рисунок 3.13):

- Равномерное покрытие теплообменных поверхностей котла – экранов топочной камеры и всех конвективных пучков ровным слоем рыхлой белой золы со стабильной толщиной в несколько миллиметров (*а*). Далее температура поверхности повышается до значений, препятствующих конденсации золовых компонентов.
- Нарастание корообразных и гребневидных хрупких отложений на трубах топки в зонах турбулентности (на выступающих частях) и первых рядах конвективных труб по ходу газов после топочной камеры (*а, б*). Сила трения задерживает частицы на поверхности.
- Постепенное уплотнение и упрочнение отложений в зонах локальных максимумов температур и скоростей в топочной камере (*в*). Температурные пульсации способствуют фазовым переходам и формированию прочных связей внутри отложений.
- Постепенное уплотнение и упрочнение отложений на трубах первых по ходу газов конвективных пучках после топочной камеры при температурах выше 700 °С с возрастанием скорости процесса при повышении температуры;
Занос мелкой (0...50 мкм) рыхлой золой горизонтально расположенных труб и полостей в газоходах с низкими скоростями (*г*). На вертикальных трубах такие отложения практически не формируются.

3.8 Спекание отложений

Интенсивность образования гребневидных отложений на конвективных поверхностях увеличивается с возрастанием температуры продуктов сгорания и уменьшением избытка воздуха в них [124].

При благоприятных условиях гребневидные отложения могут расти со значительной скоростью, стать причиной быстрого забивания газоходов и привести к ограничению мощности и резкому уменьшению продолжительности работы парогенераторов до останова на очистку [124]. Эксплуатация котлов на лузге, особенно подсолнечной, показала, что продолжительность работы котлоагрегатов, в конструкции которых не было предусмотрено мер для уменьшения шлакования и

очистки труб, на номинальной мощности составляет 5...14 дней. Более продолжительная работа невозможна по причине зарастания межтрубных проходов для дымовых газов в котельных пучках, зашлаковки топки и сопутствующих проблем [46].

Соединения щелочных металлов имеют низкую температуру плавления (625...885 °С). Обладая высокой текучестью, некоторые низкотемпературные расплавы этих соединений могут диффундировать к поверхности золовых частиц с последующим испарением и переходом в продукты сгорания. В конвективных газоходах десублимация щелочных соединений может привести к загрязнениям на трубах поверхностей нагрева. С повышением температуры увеличивается степень сублимации соединений щелочных металлов и соответственно их осаждения в конвективных газоходах [124].

Исходя из этого, с целью сокращения образования связанных отложений для энергетических котлов был разработан [70] способ низкотемпературного сжигания топлив с повышенным содержанием соединений щелочных металлов в золе, сланцев, торфа и бурых углей. Несмотря на достигнутые успехи в повышении бесшлаковочной нагрузки парогенераторов, использование ряда сортов бурых углей и сланцев все еще затруднено из-за интенсивно протекающих процессов шлакования и образования связанных отложений. Поэтому при создании новых образцов мощных парогенераторов на сильношлакующих углях бесшлаковочную номинальную производительность при высокой надежности их работы стремятся достигнуть снижением температурного уровня газов в топочной камере. Последнее может быть обеспечено увеличением количества воспринимаемого тепла. Именно этот механизм борьбы со шлакованием и использован автором при создании котлов с вихревыми топками для сжигания лузги [125].

Упрочнение отложений золы наблюдается при эксплуатации котлов на подсолнечной лузге (см. рисунок 3.13 б,в). В котлах со слабо экранированными вихревыми топочными камерами с высоким уровнем температур формируются очень прочные отложения. В этих котлах из-за высокой температуры ввиду низкого теп-

ловосприятия топочных экранов прочные отложения формируются в камере дожигания и в первых по ходу газов конвективных пучках. Эксплуатирующий персонал для очистки трубных пучков и топок таких котлов применял отбойные молотки и пилы [108]. В дальнейшем проблема разрастания и упрочнения отложений была решена за счет увеличения степени экранирования вихревых топок и применения механизированных устройств для регулярной автоматической выгрузки шлака из топок [88].

3.9 Удаление золы из вихревой топки

Загрязнение поверхностей нагрева котлов, работающих на лузге, является одной из основных проблем, с которой сталкивается персонал котельных. Подробно причины этого явления рассмотрены в предшествующих разделах настоящей главы. Кратко механизмом, играющим ведущую роль в процессе формирования натрубных отложений, является вынос щелочных элементов золы из топки в газовой фазе и последующая их конденсация. Вынос крупных твердых частиц золы оказывает отрицательное влияние на динамику формирования отложений на трубах, обеспечивая своего рода абразивную очистку.

ВТ обеспечивает наилучшее удержание топливных и золовых частиц внутри и полное выгорание горючих веществ. Вынос частиц крупнее 50 мкм почти отсутствует. Побочным эффектом инерционного удержания является образование условий, благоприятных для интенсивного формирования отложений:

- крупные частицы длительно удерживаются в топочной камере, подвергаются воздействию температур, превышающих температуры выхода летучих компонентов из золы;
- вылетающие из топочной камеры тонкая пыль и возгоны (см. рисунок 3.13) наиболее склонны к формированию отложений и не обеспечивают их абразивного разрушения;
- длительное пребывание частиц золы в топке приводит к их спеканию.

По результатам исследования [111] скорость улетучивания соединений калия из золы сильно зависит от температуры и состава среды. Зола, находящаяся в слое

горящей лузги, подвергается воздействию высоких температур и пребывает в среде с высоким содержанием СО. Результаты исследования показали, что нахождение золы в среде СО ускоряет улетучивание соединений калия в 50 раз, а повышение температуры на каждые 100 °С ускоряет процесс в 5 раз. Поэтому очень важно своевременно удалять зольный остаток из зоны высоких температур и восстановления (активного горения).

На основании анализа работы котлов и процессов переноса золы автором разработаны и предложены технические решения для минимизации неблагоприятных процессов шлакования. Конструкция вихревой топki оснащается механизмом (Рисунок 3.14) для регулярного и полного вывода золовых отложений [88, 89] не допуская их спекания и возгонки.

Своевременное удаление золы из вихревой топki позволяет сократить время ее нахождения и спекания в зоне высоких температур с соответствующим сокращением преобразований золы и выходом возгонов из нее. Подробно механизмы улетучивания минералов из зольной части топлива были рассмотрены в разделе 3.4. Механизированное удаление



Рисунок 3.14 – Шнек золоудаления и спекшиеся зольные отложения в нижней части вихревой топki

зола с пода топочной камеры будет способствовать уменьшению шлакования стен топki и формирования натрубных отложений в конвективных пучках.

На практике автором эта задача решалась при конструировании котлов с вихревыми топками путем установки в нижней части вихревой топочной камеры устройства для шуровки слоя и вывода золы. [84]

В реализованных объектах применено несколько компоновочных вариантов таких устройств. Это горизонтальное или наклонное колосниковое полотно с шурующей планкой (Рисунок 3.15) или шнеками. Все элементы, расположенные в зоне горения, выполнены охлаждаемыми водой или включенными в пароводяной контур котла для обеспечения надежности конструкции.

Шурующая планка за счет возвратно-поступательных движений по колосниковой решетке ворошит горящий слой топлива и обеспечивает механизированную выгрузку очаговых остатков в транспортер удаления шлака. Таким образом, механизация слоя помимо решения основной задачи по выводу выгоревшей

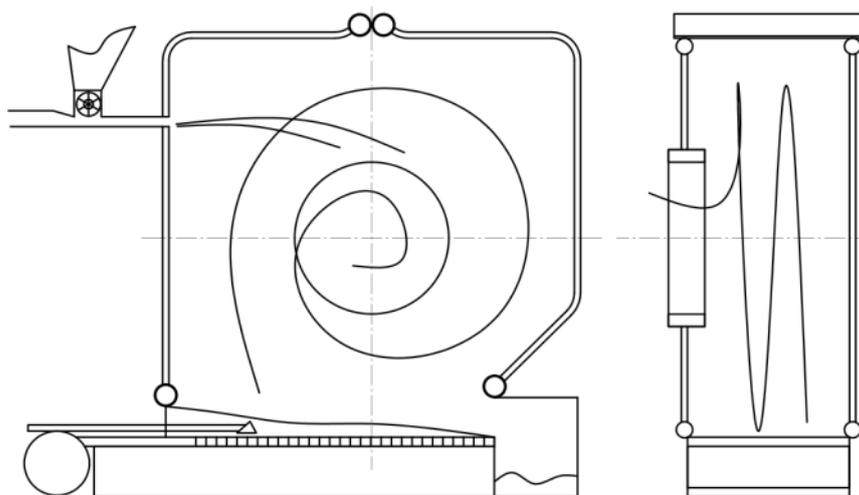


Рисунок 3.15 – Схема установки шурующей планки в вихревой топке котла

зола из топки, дополнительно обеспечивает легкий розжиг котла и стабилизацию горения путем разравнивания слоя. Горизонтальные водоохлаждаемые шнеки обеспечивают примерно тот же результат.

Анализ результатов эксплуатации котлов с вихревыми топками показал значительные преимущества котлов, оборудованных вихревыми топками с устройствами шлако-золоудаления в сравнении с более ранними прототипами, таких устройств не имевшими:

- Продолжительность безостановочной работы котла увеличивается в несколько раз.*
- Формирующиеся на трубах первых конвективных рядов отложения не упрочняются, оставаясь хрупкими и рыхлыми.**

– Не требуется ежедневное удаление спёков золы из вихревой топки вручную, обеспечивается безостановочная работа.***

* Продолжительность безостановочной работы котлов с ручным выводом шлака в большинстве случаев составляет в среднем 7 суток (5...15).

** В котлах с топками, в которых выгоревшая зола продолжительное время лежит на дне, формирующиеся отложения в первых по ходу газов конвективных пучках характеризуются высокой прочностью, для очистки используют перфораторы, пилы и т.п.

*** К примеру, для котла паропроизводительность 10 тонн пара в час количество золы, удаляемой из вихревой топки, составляет около 250 кг в сутки. Кроме того, для ручной очистки вихревой топки от золы прекращается подача топлива на это время (фактически на 10-20 минут прекращается работа котла при отсутствии резервной газовой горелки).

В свою очередь, на трубах конвективных пакетов котлов с вихревыми топками, оборудованными устройствами вывода золы по разработанным автором схемам, формируются только рыхлые и хрупкие отложения. Даже котлы, не оборудованные устройствами автоматизированной очистки поверхностей нагрева, позволяют работать продолжительное время без остановов, более месяца. А трудоемкость очистки сократилась в несколько раз [126].

Таким образом, основным техническим результатом применения устройства шлако-золоудаления в вихревой топке, является снижение скорости формирования и упрочнения отложений за счет регулярного вывода золы из зоны активного горения, который обеспечивает также повышение сопутствующих показателей. Упрощается обслуживание котла, повышается эффективность и надежность работы.

3.10 Очистка поверхностей нагрева

Рассмотренный выше процесс переноса золы в котлах, работающих на подсолнечной лузге, приводит к формированию золовых отложений на поверхностях нагрева. Применение вихревых топок с устройствами золоудаления привели к сни-

жению скорости нарастания и прочности отложений. Однако, в силу высоких шлакующих свойств подсолнечной лузги, для обеспечения эффективной работы котла, внимания требуют следующие зоны:

- на трубах топки в зонах турбулентности формируются корообразные и гребневидные отложения;
- на трубах первых по ходу газов конвективных пучках формируются хрупкие корообразные и гребневидные отложения;
- горизонтально расположенные трубы и полости в газоходах с низкими скоростями заносятся мелкой (0...50 мкм) рыхлой золой.

Методы автоматизированной очистки котлов, широко применяемые и рассмотренные в учебниках и нормативных документах [127-130], такие как: паровые обдувочные аппараты, газо-импульсная очистка, пневматические, дробеочистка, водяная обмывка по разным причинам не пригодны или неэффективны для котлов малой и средней мощности, работающих на лузге. Поэтому потребовалась длительная работа по разработке, адаптации и опробованию очистительных устройств для котлов на лузге.

Устройства паровой обдувки

Методические указания ВТИ по очистке котлов [128] рекомендуют применять для эксплуатационной очистки конвективных поверхностей нагрева глубоководвижные аппараты паровой обдувки с вращательно-поступательным движением обдувочной трубы. В качестве рабочего агента следует использовать перегретый пар с температурой не менее 350 °С и давлением 1...4 МПа. Для установки аппарата по соображениям защиты труб от абразивного износа необходим пустой газопровод шириной не менее 800 мм (400 мм от оси обдувочной трубы).

Паровые котлы Бийского котельного завода имеют штатные приборы паровой обдувки, но при их работе на лузге они показали плохие результаты. Эти приборы имеют длинную перфорированную с двух сторон трубу, которая имеет возможность поворачиваться. При этом большое количество отверстий, входящих в междурядье труб по всей длине котельных пучков, приводит к очень большому расходу пара. Соответственно, при открытии задвижки пар быстро расходуется с

понижением давления и уровня воды в барабане из-за её вскипания с соответствующей потерей возможности обдувки труб паром.

Более того, зачастую используется насыщенный пар, сильно увлажняющий отложения и дымовые газы, а падение уровня воды в барабане ниже установленного предела блокирует работу котла по условию упуска воды. В итоге опытный персонал может использовать эту штатную паровую обдувку, но, как правило, её работа неэффективна. Также имеются вопросы с накоплением конденсата в паропроводе и другие проблемы.

В то же время для котлов малой и средней мощности, в которых сжигается на предприятиях лузга, характерны низкие параметры пара: 0,9...2,4 МПа с температурой 170...250 °С, и небольшие размеры конвективных газоходов, сторона сечения которых не превышает трех метров, а трубные пакеты плотно упакованы, без широких пустых проходов.

Для обеспечения надежной и бесперебойной работы котлов, работающих на подсолнечной лузге и других шлакующих топливах компанией «ПроЭнергоМаш», с участием автора, разработана и внедрена система очистки поверхностей нагрева, состоящая из глубоко выдвижных устройств паровой обдувки – УПО-250 (Рисунок 3.16) технические характеристики которых приведены в таблице 3.10.



Рисунок 3.16 – Устройства паровой обдувки УПО-250 первой серии

УПО предназначено для очистки конвективных труб паровых котлов и экономайзеров от золошлаковых отложений струей пара или сжатого воздуха. Диаметр сопла принят меньше рекомендованного ВТИ и рассчитан под сниженный до

250 кг/час, по условию недопущения просадок давления на котлах малой и средней мощности, расход обдувочного агента. Ввиду малых размеров газопроводов струя большей мощности на данных устройствах не требуется.

Таблица 3.10 – Технические характеристики УПО-250

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Рабочий агент	-	пар
Рабочее давление	МПа	0,9-2,4
Тип пара	-	насыщенный
Температура пара	°С	170-220
Расход пара	кг/ч	до 250
Время полного цикла	сек	40-60
Продольный ход сопловой головки	мм	650-1950*
Число оборотов сопловой головки	об/мин	28
Скорость поступательного движения сопла	м/мин	4,6
Эффективный радиус действия струи	мм	800
Мотор-редуктор (вращение)		
Число оборотов двигателя	об/мин	1400
Мощность двигателя	кВт	1,5
Мотор-редуктор (поступательное движение)		
Число оборотов двигателя	об/мин	900
Мощность двигателя	кВт	1,1
Габариты	мм	2700×700×750*
Масса	кг	270-360*

* зависит от типоразмера установки.

В качестве рабочего тела для очистки паровых котлов используется насыщенный пар из отбора от барабана с давлением не более 2,4 МПа. Также опробовано использование в качестве обдувочного агента сжатого воздуха с давлением 0,8 МПа. Экономически более эффективным является использование насыщенного

пара из барабана парового котла. Паровая обдувка поверхностей нагрева котлов, работающих на биотопливе, экономически более выгодна, поскольку не требует установки компрессоров и ресиверов, затрат электроэнергии на привод компрессора, а сжигаемое топливо является отходом и имеет отрицательную стоимость. Побочным эффектом использования насыщенного пара в качестве обдувочного агента является его высокая влажность, поскольку после сброса давления в сопле Лавалья его значительная часть конденсируется. При выборе места установки обдувочного аппарата необходимо учитывать этот эффект.

Аппарат работает циклически. Рабочий цикл аппарата включает возвратно-поступательные ходы на заданную глубину выдвижения с одновременным вращением сопловой головки. Число повторных циклов может быть различным и выбирается при пусконаладке оборудования. Режим работы устройства паровой обдувки зависит от типа сжигаемого топлива и интенсивности топочного процесса, может определяться временным интервалом на основании опыта эксплуатации или в привязке к температуре уходящих газов. Например, при превышении температуры дымовых газов на выходе из котла заданной уставки, производится автоматическая очистка поверхностей нагрева котла.

Работа установленных на ряде котлов аппаратов УПО-250 показала достаточную их эффективность, однако был выявлен ряд особенностей, которые необходимо учитывать:

- Внутри подводящих трубопроводов во время простоя аппаратов скапливается конденсат.
- Насыщенный пар при сбросе давления во время прохода через сопло Лавалья охлаждается до температуры ниже точки росы и сопровождается конденсацией пара в струе.
- Выделившаяся из пара капельная влага может вызывать слипание и упрочнение содержащих кальций отложений.

Таким образом, для нормальной работы аппаратов необходимо:

- Организовать перед каждым циклом очистки предпусковую продувку подводящих паропроводов.

– Не использовать аппараты в тех местах, где сброшенная обдувочной струей зола может сбиваться в кучи.

С учетом вышеизложенного, рекомендовано использование аппаратов на насыщенном паре для обдувки топочных экранов и первых рядов труб первого конвективного пакета, расположенных в зоне наиболее высоких температур (первые за топкой). Кроме того, геометрия газоходов в районе обдуваемых трубных пучков должна обеспечивать свободный вывод сбитых с труб отложений из котла, не допускать образования куч золы. Для других мест допустима работа аппаратов УПО-250 на сжатом воздухе.

По отзывам эксплуатирующих предприятий (ООО «Нива», Самарская область, ООО «Товарное Хозяйство», Саратовская область и др.) аппараты на сжатом воздухе с давлением 0,8 МПа обеспечивают эффективную очистку конвективных пучков от натрубных отложений.

Газо-импульсная очистка

Одним из распространенных способов автоматизированной очистки поверхностей нагрева является газоимпульсная очистка (ГИО) [128]. Физические основы ГИО заключаются в периодических генерациях волн сжатия и потока продуктов сгорания различных горючих газоздушных смесей в специальных импульсных камер (ИК).

Генерируемые таким образом избыточные импульсы давления и потоки продуктов сгорания, направленные через сопла ИК на очищаемые поверхности, обеспечивают удаление с поверхностей нагрева образующихся в процессе эксплуатации сажевых и золошлаковых отложений [129].

Однако, широкое внедрение ГИО в энергетике несмотря на эффективность не получило должного распространения [129]. Работа системы очень шумная, при срабатывании происходит громкий хлопок.

Эксплуатация котлов, оборудованных аппаратами ГИО на подсолнечной луге (Рисунок 3.17) показала следующие особенности:

- Узкая рабочая зона, необходимость установки множества рабочих сопел, что увеличивает сложность и стоимость ГИО;
- Расшатывание уплотнений в газоходах котла, выбивание золы и пыли при работе, шум;
- Технически значительный эффект ГИО оказывает в экономайзерах – в плотных пучках, заносимых рыхлой тонкой золой.



Исходя из вышесказанного, автор считает устройства ГИО ограниченно применимыми для котлов на лузге.

Рисунок 3.17 – Работа газо-импульсной очистки. Ширина очищаемой зоны много меньше ширины конвективного пучка труб

Пневмо-импульсная очистка

Применение пневмоимпульсных устройств обеспечивает возможность создания высокоэффективных, безопасных, дистанционно управляемых систем очистки [131].

Работы по исследованию возможностей применения пневмоимпульсных устройств для очистки котельных агрегатов были начаты в ИТПМ СО РАН с 1992 г. Установлено, что эффективность воздействия в значительной мере определяется ориентацией ударной волны относительно образца. Были разработаны реальные конструкции дистанционно управляемых пневмоимпульсных генераторов с запасаемой энергией сжатого газа до 100 кДж [132].

По сведениям разработчиков созданный пневматический импульс сжатого воздуха воздействует на отложения следующими путями:

- Создание термического напряжения на поверхности шлаковых отложений проявляется главным образом в хрупком растрескивании слоя. Температурное

напряжение между шлаком и струей тем больше, чем выше температура шлака и чем ниже температура обдувочной струи в зоне контакта со шлаком.

– Динамическим напором потока дискретных ударных волн, (механическим встряхиванием конструкции) пневмоимпульс в полосе набегания теряет свою скорость и кинетическую энергию, которая преобразуется главным образом в потенциальную энергию напряженного состояния шлаковых бугорков. Под воздействием струи бугорки приобретают мгновенные изгибающие моменты. Они опрокидывают и срывают шлаковые бугорки.

– Прохождением акустической волны, взаимодействие ударных волн и сопутствующих резонансно-акустических колебаний с отложениями.

– Абразивное воздействие, ударная волна пневмоимпульса, врезаясь в газовый поток, увлекает частицы летучей золы и насыщает ими свою оболочку. Струя разгоняет эти частицы до значительных скоростей. Это вызывает пескоструйный эффект.

Компанией «ПроЭнергоМаш» с участием автора разработана подобная конструкция пневмогенераторов ПГ 25/8. Изделия изготовлены и успешно эксплуатируются на котлах, сжигающих лузгу. Пневмоимпульсный генератор ПГ - 25/8 (далее пневмогенератор) накапливает энергию сжатого воздуха и по команде с управляющего устройства происходит резкий выброс. Основные технические характеристики представлены в таблице 3.11, общий вид на рисунке 3.18.

Пневмогенератор состоит из корпуса цилиндрической формы, установленного в нем подвижной мембраны, выхлопного патрубка и установленного на нем подрывного электромагнитного клапана.

Заполнение пневмогенератора сжатым воздухом происходит через штуцер, установленный на корпусе. После выравнивания давления в магистрали и в объеме ПГ пневмогенератор готов к работе. Для осуществления пневмоимпульса необходимо подать управляющее напряжение на электромагнит клапана, который в свою очередь соединит с атмосферой объем хода мембраны. Под действием давления из рабочего объема мембрана открывается и сжатый воздух выходит через выхлопной патрубок, создавая ударную волну.

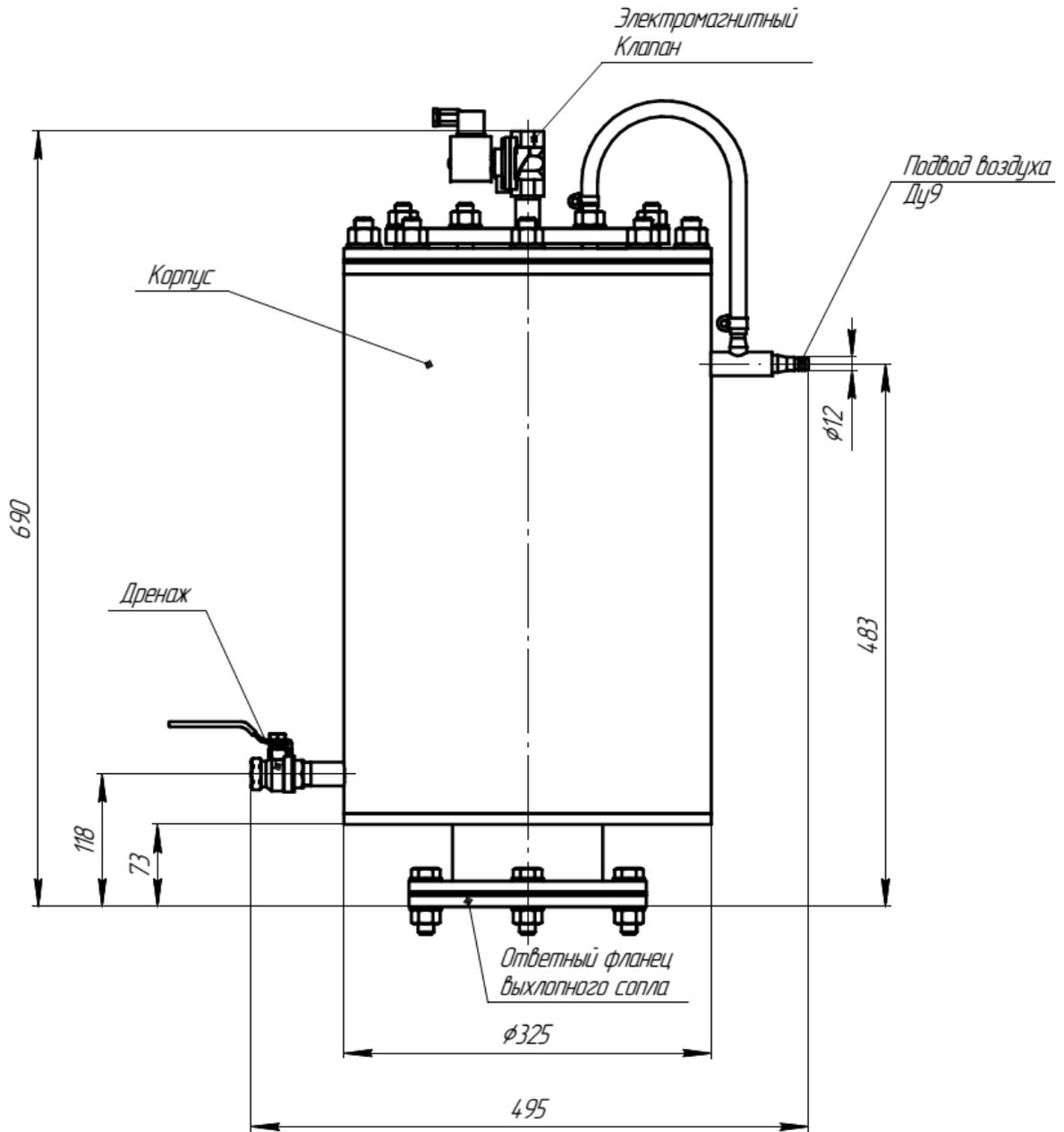


Рисунок 3.18 – Пневмогенератор ПГ-25/8

Опыт эксплуатации показал целесообразность установки пневмогенераторов на котлах, сжигающих лузгу, для очистки подверженных росту отложений локальных зон. Например, направленная струя из сопла ПГ достаточно эффективно очищает двухсветные экраны в топках. Двухсветный экран расположен внутри топочной камеры и с обеих сторон омывается продуктами сгорания, поэтому скорость роста первичных золовых отложений здесь особенно высокая. Установка пневмо-

генераторов с направленными на зоны наибольшего роста отложений соплами, позволяет достаточно эффективно подавлять их рост, периодически сбивая растущие отложения с труб поверхности нагрева.

Таблица 3.11 – Технические характеристики ПГ-25/8

Наименование параметров	Значение	
	ПГ-25/8	ПГ-25/8-1
Объем форкамеры, дм ³	25	
Минимальный период срабатывания, с	40-60	
Диаметр выхлопного сопла, мм	124	
Рабочий агент	Сжатый воздух	
Рабочее давление, атм	5-10	
Запасаемая энергия, кДж	12,5-100	
Потребляемый расход сжатого воздуха, м ³ /мин	Не более 0,3	
Рукав подачи воздуха, мм	8-10	
Продолжительность выхлопа, с	0,05	
Габаритные размеры, DxL, мм	325x690	
Масса, кг	Не более 60	
Требования к сжатому воздуху по ГОСТ17433-80:		
Ниже 5° С	Кл.5	
Выше 5°С	Кл.10	
Среднее время наработки на отказ, циклов	10000	
Срок службы, лет	10	
Тип электромагнитного клапана*	СК-11-15	СК-11-15
Управляющее напряжение, В	220	24
Тип тока	переменный	постоянный

* Тип электромагнитного клапана может быть изменен на аналогичный

Самообдувка трубных пучков

Трубчатые теплообменники обычно выполняют в виде пучка трубок. Расположение трубок в этих теплообменниках может быть разнообразным. Наиболее распространены шахматные и коридорные пучки, рисунок 3.19 [130]. Обтекание трубы в пучке отличается от обтекания одиночной трубы тем, что расположенные рядом трубы оказывают взаимное влияние на этот процесс.

Протекая между трубами, поток сужается, вследствие чего изменяется поле скоростей, и место отрыва пограничного слоя перемещается в направлении потока. Трубы, расположенные во втором и последующих рядах, попадают в вихревой след от предыдущих рядов, что не может не отразиться на формировании отложений. Плотность расположения труб в пучке обычно характеризуется относительными поперечным S_1/D и продольным S_2/D шагами [130]. Это взаимное расположение труб влияет на движение в газовом потоке.

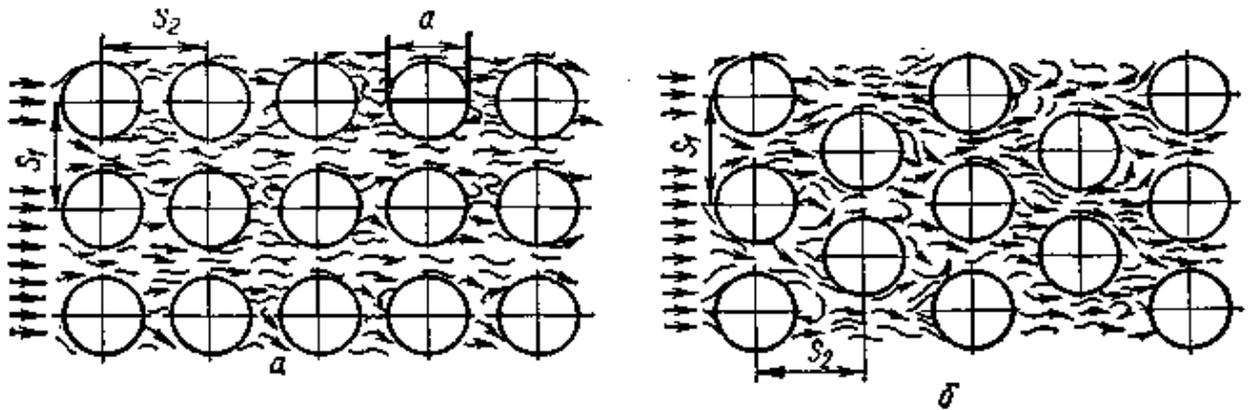


Рисунок 3.19 – Схема обтекания пучков труб: *a* – коридорных; *б* – шахматных [130]

На частицы золы, осевшие на трубах, действуют одновременно различные силы, часть из которых может отрывать частицу от слоя отложений или непосредственно от поверхности нагрева. Это силы гравитации, аэродинамического воздействия потока и эрозионные.

Известно, что для сыпучих отложений сила, удерживающая частицы, зависит от площади ее соприкосновения и пропорциональна квадрату линейного размера. «Аэродинамические силы, воздействующие на частицу, изменяются пропорционально квадрату линейного размера.

Силы инерции и тяжести, зависящие от массы частицы, увеличиваются пропорционально линейному размеру частицы в третьей степени. Следовательно, если для какого-либо размера частиц указанные выше противоположные силы окажутся одинаковыми по величине, то для частиц меньшего размера преобладающими будут силы притяжения, а для частиц большего размера – отрывающие силы инерции и тяжести. Этим объясняются оседание на трубах преимущественно мелкой золы и стабилизация слоя отложений во времени». [130]

Характер отложений на трубе в зависимости от скорости и направления газопылевого потока. В качестве примера показаны отложения золы подмосковного угля на расположенных в шахматном порядке $S/d=2$ трубах $d=38$ мм испытательного стенда (Рисунок 3.20) [130]. Причем количество стабильных отложений не зависит от концентрации пыли в газовом потоке, а лишь от его скорости и направления.

Также известно, что на формирование отложений рыхлой золы в трубных пучках влияет взаимное расположение труб. При уменьшении шагов количество отложений снижается. Кроме того, в шахматных пучках количество отложения значительно меньше чем в коридорных.

Исследования Кузнецова Н.В. [133] проведенные на пылевом стенде с макетами трубных пучков, выявили очень сильную зависимость коэффициента загрязнения ε от диаметра труб (Рисунок 3.21). Например, уменьшение диаметра трубы от 38 до 25 мм для шахматного пучка снижает коэффициент загрязнения в 2,2 раза.

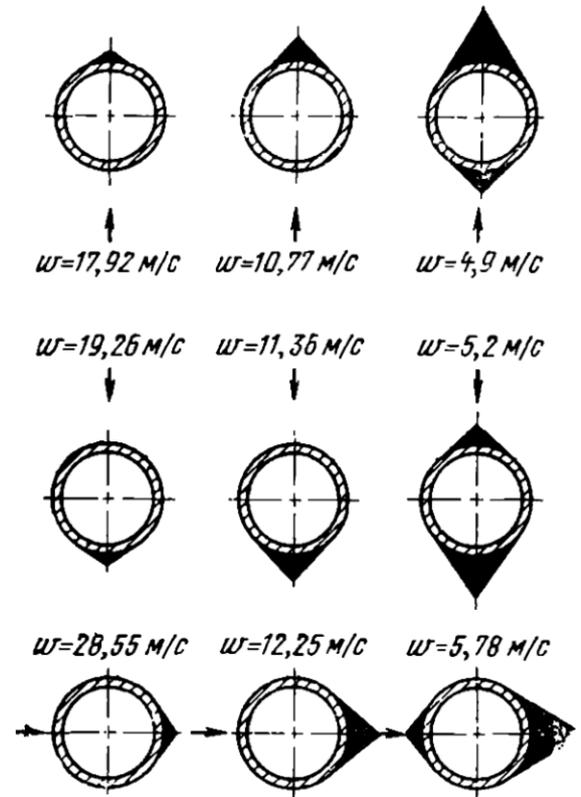


Рисунок 3.20 – Загрязнение труб, сверху вниз: восходящий поток, нисходящий поток, горизонтальный поток, вертикальные трубы [130]

Для коридорного пучка такое же уменьшение снижает коэффициент ε еще значительнее – в 2,5 раза. С уменьшением диаметра труб увеличиваются центробежные силы, действующие на частицы золы, так как обтекание труб происходит по более изогнутой траектории.

Как было показано выше, скорость нарастания характерных для экономайзеров котлов на подсолнечной лужге (см. рисунок 3.13 з) мелких сыпучих отложений на поверхностях нагрева, преимущественно зависит от геометрии трубного пучка и скорости газового потока, следовательно, можно прогнозировать на нее влиять, закладывая рациональную геометрию трубных пучков поверхностей нагрева с учетом опыта эксплуатации и результатов испытаний.

Поскольку при сжигании подсолнечной лужги образуется очень мелкая и легкая зола, наблюдается особенно интенсивное загрязнение горизонтально расположенных труб экономайзеров (см. рисунки 3.6 и 3.13) Для уменьшения негативного влияния этого явления на эффективность работы котлов на лужге стояла задача подобрать расположение труб в пучках для лучшей их самообдувки. Для исследования эффекта самообдувки в реальных условиях эксплуатации были проведены испытания модели трубного пучка на действующем котле.

Для проведения натурных испытаний эффекта самообдувки в конвективных пучках с шахматным и коридорным расположением труб был изготовлен макет. Макет в натуральную величину изготовлен из стальных труб и предназначен для

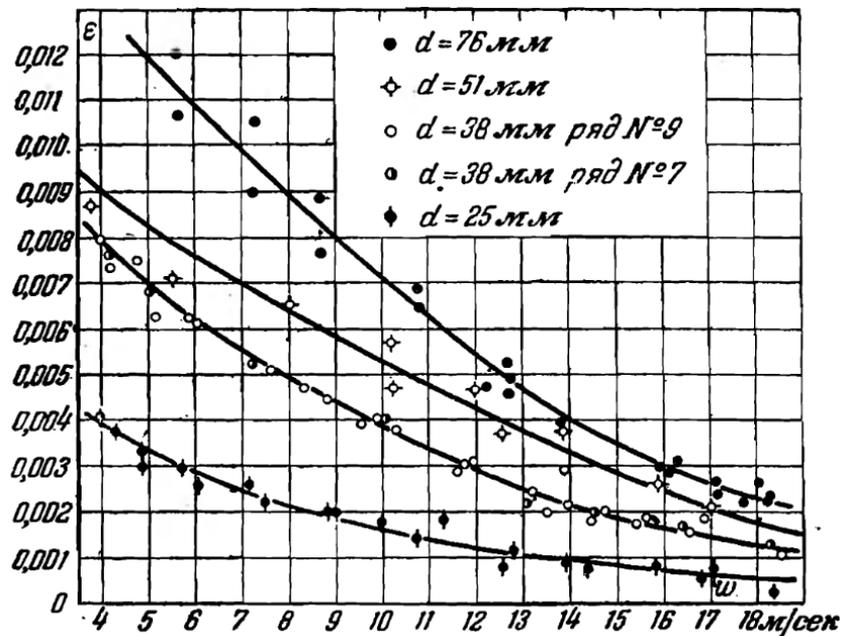


Рисунок 3.21 – Зависимость коэффициента загрязнения шахматного пучка от скорости газов для разных диаметров [133]

размещения в технологическом просвете экономайзера, установленного за паровым котлом Е-14-1,4 ОИ, работающем на подсолнечной лузге.

Типовым экономайзером для паровых водотрубных котлов низкого давления типа КЕ являются стальные водотрубные экономайзеры типа БВЭС. Экономайзер изготавливается из бесшовной стальной трубы 28х3. Трубы в конвективных пучках расположены в коридорном порядке. Шаги S_1 и S_2 (поперек и вдоль омывающего потока) составляют 70 и 50 мм соответственно. Для первых серий паровых котлов на лузге использовались серийные экономайзеры именно этого типа [46].

При работе котлов на подсолнечной лузге происходит интенсивный занос хвостовых поверхностей нагрева, экономайзеров в особенности, слоем рыхлых отложений (Рисунок 3.22) вплоть до полного перекрытия межтрубных просветов продольных рядов. Теплообмен при этом снижается, а аэродинамическое сопротивление значительно возрастает.



Рисунок 3.22 – Занос стального экономайзера с коридорным расположением труб золой подсолнечной лузги

Для улучшения теплообмена и уменьшения отложений рыхлой золы в экономайзерах котлов, сжигающих лузгу, был разработан трубный пучок с шахматным расположением труб диаметром 28 мм в конвективном пакете. Шаги S_1 и S_2 (поперек и вдоль омывающего потока) составляют 70 и 50 мм соответственно. Первые натурные испытания были проведены на макете пучка.

Изготовленный макет был установлен в экономайзере действующего парового котла Е-14-1,4 ОИ паропроизводительностью 14 тонн в час, установленного в котельной Барнаульского маслоэкстракционного завода (Рисунок 3.23).

Испытания проводились в течение двух недель непрерывной работы котла. Регулярный осмотр и фиксация вида и формы натуральных отложений показали высокую устойчивость труб с принятым взаимным расположением к формированию толстого слоя налета (Рисунок 3.24).

По положительным результатам испытаний конструктивное исполнение экономайзера для растительных отходов было принято в производство. Промышленные испытания экономайзеров с шахматным расположением труб в конвективных пучках проводились в котельной ООО «Масло Ставрополя». В составе котельной ячейки с котлом Е-14-1,4 установлено два экономайзера типа ЭС-120. Экономайзеры расположены последовательно по ходу газов. Вода в поверхности нагрева подается противоточно.

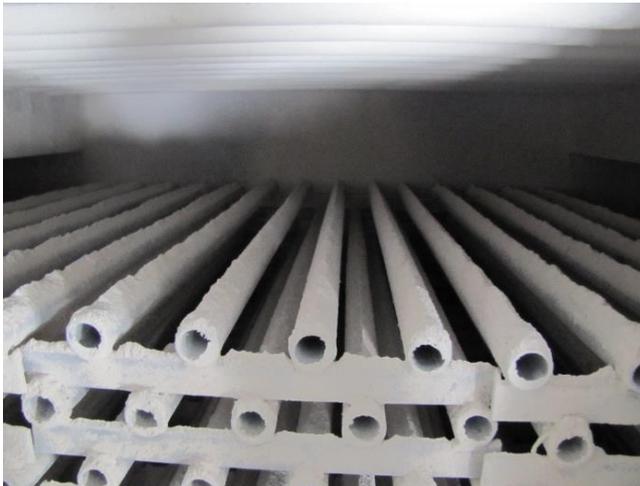


Рисунок 3.23 – Макет шахматного трубного пучка в экономайзере



Рисунок 3.24 – Внешний вид отложений, закрепившихся на трубах

Сравнение показателей работы котла Е-14-1,4, оборудованного экономайзерами с шахматным расположением труб, проведено с показателями аналогичного котла Е-14-14 с экономайзерами с коридорным расположением труб, установленного на Барнаульском маслоэкстракционном заводе. Компонировки котельной ячейки аналогичны. Результаты теплотехнических испытаний показали лучшую тепловую эффективность экономайзеров с шахматным расположением труб, таблица 3.12.

На трубах в пакетах с шахматным расположением скапливается меньше отложений. Пучки просвечиваются по диагонали (Рисунок 3.25).

Экономайзер с шахматным расположением имеет большее аэродинамическое сопротивление, однако следует отметить что реальное эксплуатационное сопротивление пучков при работе на топливах с сильно загрязняющей золой, в частности на подсолнечной лузге, может значительно превышать рассчитанные по нормативной методике значения и увеличиваться с ростом отложений. Ввиду этого влияния эксплуатационный перепад давлений для более «чистого» шахматного пучка может быть близок, или даже ниже чем у загрязненного коридорного.

По результатам работы пилотных образцов в компании «ПроЭнергоМаш», г. Барнаул, принято решение начать серийное производство таких экономайзеров для котлов на растительных отходах (Рисунок 3.26).



Рисунок 3.25 – Вид натрубных отложений в экономайзерах с шахматным расположением труб



Рисунок 3.26 – Экономайзеры с шахматным расположением труб для котлов, сжигающих растительные отходы

В последствии были внедрены предложения по применению вибровстряхивания для очистки экономайзеров. В настоящее время испытания продолжаются.

Таблица 3.12 – Показатели работы экономайзеров с шахматным и коридорным расположением труб

Параметр	коридорный экономайзер (2 ступени)	шахматный экономайзер (2 ступени)	Ед. изм.
Паропроизводительность	14	14	т/ч
Температура газов на входе в ЭК 2ст.	390	373	°С
Температура газов на выходе из ЭК 1ст.	250	215	°С
Температура воды на входе	102	102	°С
Температура воды на выходе	155	172	°С
Избыток воздуха на входе, α	1,4	1,4	
Тепловая мощность, Q	863	1140	кВт
Поверхность теплообмена, F	240	240	м ²
Температурный напор вход Δt_1	235	201	К
Температурный напор выход Δt_2	148	113	К
Средний температурный напор Δt	188	153	К
Коэффициент теплопередачи эксплуатационный			
k	19,1	31,1	Вт/м ² ·К
Коэффициент теплопередачи расчетный			
k _р	83	105	Вт/м ² ·К
Коэффициент полезного использования			
ψ	0,244	0,314	
Сопротивление газового тракта расчетное			
Значение	1400	2436	Па
Коэффициент	24,64	44,8	

Обдувка рыхлых отложений воздушной струей

Как было рассмотрено выше, на поверхностях нагрева котлов, использующих в качестве топлива подсолнечную лузгу и ряд других горючих растительных отходов со схожими характеристиками золы, интенсивно осаждается зола. Осадок представлен тонкодисперсным порошком, образующимся преимущественно из оксидов щелочных металлов конденсационным путем. При этом золовые отложения на входных трубных пучках и пароперегревателе, расположенных в зоне температур выше примерно 700°C , склонны к росту и упрочнению, а в зонах более низких температур, в выходных трубных пучках котла и трубах экономайзера, отложения типично рыхлые и, как правило, не уплотняются.

Следовательно, очистка труб более холодных конвективных пучков и экономайзеров может эффективно осуществляется путем вибровстряхивания ударно-волновым воздействием либо струйной обдувкой воздухом.

Сравнение энергозатрат на проведение обдувки паром, сжатым воздухом и струями воздуха от высоконапорного вентилятора (давление близкое к атмосферному) показало возможность снижения эксплуатационных расходов за счет обдувки низкопотенциальным воздухом [134].

Как ранее указывалось, низкие параметры пара и малые размеры газоходов котлов для промышленной теплоэнергетики затрудняют размещение паровых обдувочных аппаратов и использование в соответствии с рекомендациями [126]. Использование же в качестве рабочего агента насыщенного или слабо перегретого пара сопровождается конденсацией и выбросом с паром капельной влаги, приводящей к эрозионному износу труб, либо к слипанию и упрочнению отложений. Опыт эксплуатации таких устройств показал вероятность обоих проявлений одновременно, в зависимости от удаленности участка от обдувочной трубы. Кроме того, работающее устройство паровой обдувки потребляет значительную долю вырабатываемого котлом малой мощности пара, что приводит к понижению при этом давления пара в барабане котла и перерасходу топлива.

Применение сжатого воздуха в качестве рабочего агента показало высокую эффективность обдувочных аппаратов при очистке рыхлых отложений и пригодно

также для водогрейных котлов, однако приготовление сжатого воздуха требует существенных эксплуатационных затрат.

Была поставлена задача – создание устройства, пригодного для установки на котлах с любым теплоносителем, обеспечивающего снижение эксплуатационных затрат при очистке конвективных поверхностей нагрева, заносимых рыхлой золой.

Разработанное и запатентованное устройство [134] (Приложение Б) обеспечивает технический результат в виде повышения эффективности очистки и экономический в виде снижения затрат достигается за счет того, что устройство для обдувки поверхностей нагрева котла, содержащее снабженную сопловой головкой обдувочную трубу с механизмами ее подачи и вращения, размещенными на подвижной каретке, содержит установленную на этой же каретке воздуходувку для подачи в обдувочную трубу воздуха с избыточным давлением от 20 до 50 кПа через вращающееся уплотнение. В качестве воздуходувки может использоваться, например, «вихревая воздуходувка», «турбовоздуходувка» или высоконапорный вентилятор с высокой скоростью вращения рабочего колеса, обеспечивающий обозначенный напор и необходимый расход обдувочного воздуха при малых габаритах самого устройства, позволяющих его установить на подвижной каретке обдувочного аппарата [134].

Снижение эксплуатационных затрат достигается за счет замены рабочего агента с перегретого пара или сжатого воздуха, подаваемого в аппарат по трубопроводу снаружи, на воздух, подаваемый с избыточным давлением (20...50 кПа) воздуходувкой, установленной внутри аппарата. Испытания показали, что для очистки поверхностей нагрева от рыхлых несвязанных отложений достаточно скорость обдуваемой поверхности струи от 25 м/с. К примеру, такую скорость на расстоянии 1 метр от сопла Лаваля диаметром 6 мм обеспечивает подача сжатого воздуха с давлением 8 атмосфер (800 кПа). Такая же скорость обеспечивается и при подаче воздуха через сопло диаметром 25 мм с начальным давлением 20 кПа. Расход обдувочного агента составляет при этом 0,055 и 0,085 кг/с соответственно, обеспечивая тот же очистительный эффект. При этом расход электроэнергии на по-

дачу сжатого воздуха будет в 6-9 раз выше в зависимости от эффективности непосредственно используемых компрессора и воздуходувки. Кроме того, предлагаемому устройству не требуется оборудование и обслуживание трубопроводов с арматурой для подачи обдувочного агента, что дополнительно сокращает эксплуатационные расходы [134].

Рекомендуется подача воздуха с давлением в диапазоне от 20 до 50 кПа исходя из доступности и массогабаритных показателей промышленно выпускаемых воздуходувок и рационального покрытия конвективных поверхностей нагрева котлов малой и средней мощности рабочей зоной обдувочных устройств. Указанное давление обеспечивает радиус уверенной обдувки рыхлых отложений 1...1,5 метра, чего достаточно для большинства котлов указанных выше типов.

Проводилось численное моделирование обдувающей струи в пучке труб. Например для труб диаметром 51 мм с поперечным шагом 110 мм, продольным – 90 мм. Воздух в обдувочную турбу подается с давлением 24 кПа, диаметр сопла 25 мм. Начальная скорость струи составит 185 м/с, скорость на расстоянии 1000 мм – 16,5 м/с.

Конструкция обдувочного устройства схематично изображена на рисунке 3.27. Устройство содержит корпус 1, обдувочную трубу с сопловой головкой 2, подвижную каретку 3, установленный на корпусе 1 привод 4 возвратно-поступательного движения каретки 3, установленные на каретке привод вращательного движения 5 обдувочной трубы 2 и воздуходувку 6, напорный патрубок которой подключен трубопроводом со свободно вращающимся уплотнением 7 к обдувочной трубе 2.

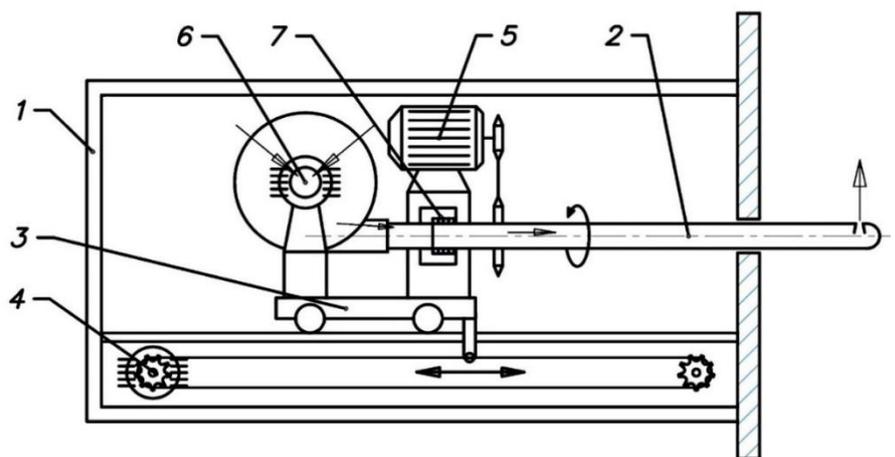


Рисунок 3.27 – Схема устройства для воздушной обдувки

Устройство работает следующим образом. При включении электродвигателей приводов 4, 5 и воздуходувки 6 начинается вращение обдувочной трубы с сопловой головкой 2, поступательное движение каретки 3 с закрепленными на ней узлами и подача воздуха для обдувки. Обдувочная труба вводится в газоход котла и обдувочный агент через сопловую головку струей подается на очищаемые поверхности нагрева котла. После завершения поступательного движения каретки 3 привод 4 переключается на возвратное движение. При этом обдувка поверхностей нагрева продолжается. После завершения возвратного движения в исходном положении все электроприводы отключаются [134].

Описанные конструктивные преимущества устройства позволят найти ему широкое применение для автоматической очистки поверхностей конвективных труб паровых и водогрейных котлов малой и средней мощности от рыхлых золовых отложений со снижением эксплуатационных затрат.

Эффективность мер по борьбе с загрязнением котлов

Как было сказано в первой главе, для котлов, работающих в условиях интенсивного загрязнения золой наиболее значимым качественным показателем эксплуатации является максимальная продолжительность безостановочной работы.

Рассмотрим на примере как разработанные меры влияют на этот показатель.

Данные, собранные до и после проведения реконструкции котлов типа КЕ-10-14 в котельной маслозавода в Сальске, позволяют сделать оценку практического эффекта от проведённых мероприятий [91, 135]. Оценка выполнена по количеству отложений, накапливающихся в котле при его работе, отнесенному к поверхности нагрева соответствующего участка. Зола собиралась после остановки котла при его очистке и измерялся объем собранных отложений. Это условное значение, однако его удобно использовать для оценки эффективности различных принятых мер.

До реконструкции котлы были оборудованы вихревыми неохлаждаемыми топками и не имели механизированных устройств для очистки поверхностей нагрева и вывода золы и шлака. Рабочая кампания составляла 7 суток, после чего требовался останов и охлаждение котла для ручной очистки. При реконструкции

было организовано низкотемпературное сжигание в вихревой топке «Торнадо» и установлены аппараты паровой обдувки. Оценка эффекта в виде осредненной толщины отложений на поверхностях котла представлена на рисунке 3.28.

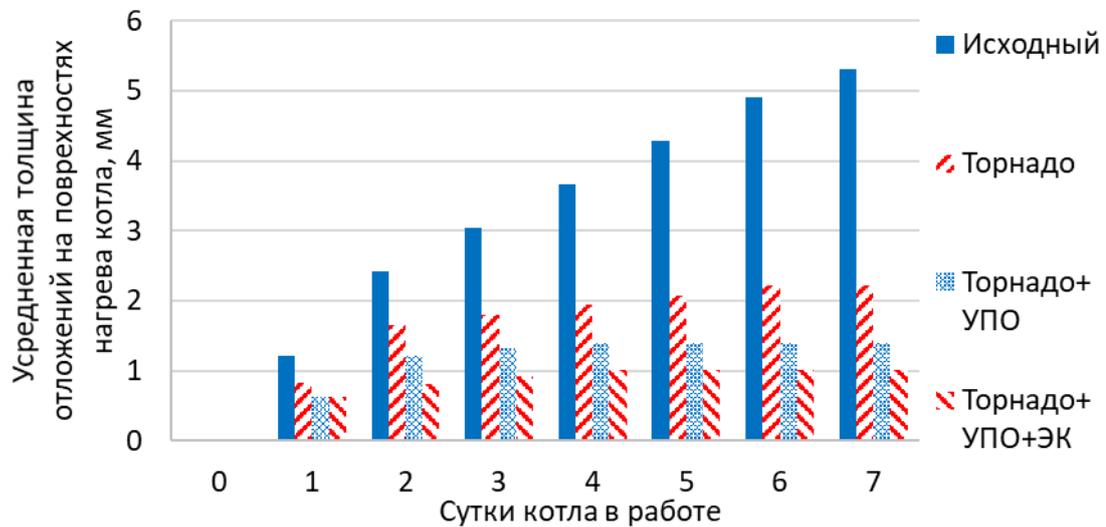


Рисунок 3.28 – Толщина отложений в котле с неохлаждаемой ВТ, в ВТ «Торнадо» и с учетом работы обдувочных аппаратов в конвективном пакете и экономайзера с шахматным пучком

Поскольку одним из наиболее важных требований к работе котла на лузге является возможность продолжительной работы без остановов на очистку, приведенная оценка позволяет наглядно видеть, что в котле без устройств вывода золы и шлака их накопление происходит практически линейно и быстро достигает критического количества.

Применение разработанного комплекса мер позволяет стабилизировать накопленное количество отложений на определенном уровне и обеспечить безостановочную работу котла, исключив таким образом достижение лимитирующего фактора – остановка по причине падения разрежения в топке котла из-за критического количества отложений золы в межтрубных проходах и на поверхностях нагрева котла.

Разработанный золоочистной комплекс для котлов на подсолнечной лузге включает:

- устройства выгрузки шлака из топочной камеры;

- выдвижные обдувочные аппараты на насыщенном паре для экранов камеры охлаждения и радиационного пароперегревателя;
- глубоководвижные обдувочные аппараты на сжатом воздухе для первого по ходу газов конвективного пучка;
- глубоководвижные обдувочные аппараты обдувки воздушной струей для последующих конвективных пучков (заносимых рыхлой золой);
- виброочистка, ударно-волновая, газоимпульсная для экономайзеров.

3.11 Очистка дымососов

При работе котла на лузге в силу своих характеристик летучая зола может оказывать негативное влияние на работу дымососа. Мельчайшие частицы налипают на тыльной стороне лопаток колеса, слипаются и укрупняются, образуя наросты толщиной до 20 мм (Рисунок 3.29). Несмотря на низкую плотность летучей золы образующиеся отложения вносят существенный дисбаланс в работу дымососа. Например, для дымососа ДН-13Х-1500 виброскорость при наличии отложений достигала 8 мм/с, при норме не более 6,3.

Причиной появления отложения на тыльной стороне лопаток является характер распределения сил, действующих на частицу (Рисунок 3.30) [136]. На твердую частицу 1, показанную утрированно больших размеров, действует центробежная сила Z , которую можно разложить на нормальную Y и тангенциальную T составляющие.

Твердые частицы, неуловленные в газоочистном оборудовании, как правило, очень мелкие и соотносятся с параметрами шероховатости поверхности лопаток, что способствует слеживанию частиц пыли.

В пограничном слое поток газа имеет ламинарное течение. Непосредственно у стенки скорость потока равна нулю. Таким образом, поток



Рисунок 3.29 – Золовые отложения на тыльной стороне лопаток дымососа ДН-12,5

газа не сообщает оседающим частицам пыли кинетической энергии и скольжения твердых частиц вдоль поверхности лопатки не происходит. Это также способствует отложению частиц пыли.

В попытках решения возникшей проблемы был разработан ряд мер:

- Установка неподвижных сопел для обдувки лопаток дымососа сжатым воздухом с наружной стороны колеса без его останова.
- Установка неподвижных сопел для обдувки лопаток дымососа сжатым воздухом с внутренней стороны колеса без его останова.
- Установка регулируемого соплового аппарата, рисунок 3.31, для обдувки лопаток дымососа сжатым воздухом с наружной стороны колеса без его останова.
- Колеса, с лопатками, на поверхности которых изменено распределение сил, действующих на частицы.

Промышленные испытания установленных неподвижно сопел показали недостаточную эффективность. Очистка проводилась путем открытия клапанов подачи воздуха один раз в 12 часов. Лопатки за счет такой обдувки очищаются не полностью. В результате основной негативный фактор – дисбаланс оставался.

Установка неподвижных сопел для обдувки лопаток с внутренней стороны колеса не была проведена в силу трудности размещения сопел в указанном месте на существующем дымососе. Доступ к всасывающему патрубку возможен только со вскрытием боковой стенки улитки и непосредственно всасывающего конуса, что весьма проблематично. Предполагаемый эффект от обдувки колеса по ходу газового потока мог быть лучше, чем при встречной обдувке снаружи за счет большего импульса струй, не тормозящихся сбегаящим с лопаток газовым потоком.

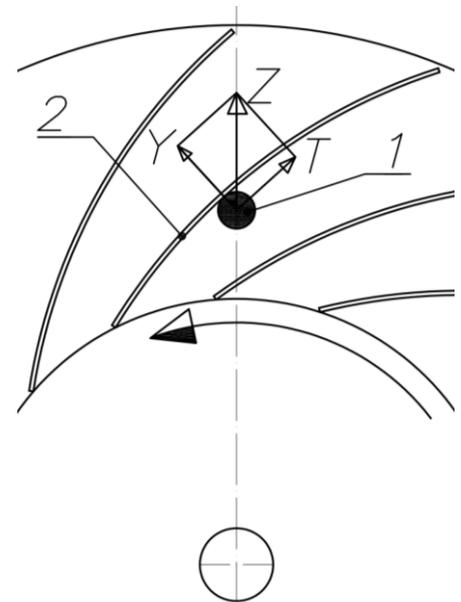


Рисунок 3.30 – Схема действующих сил, способствующих развитию отложений пыли на лопатках

В продолжение развития конструкции соплового аппарата была разработана конструкция с возможностью регулирования угла установки обдувочных сопел, рисунок 3.31.

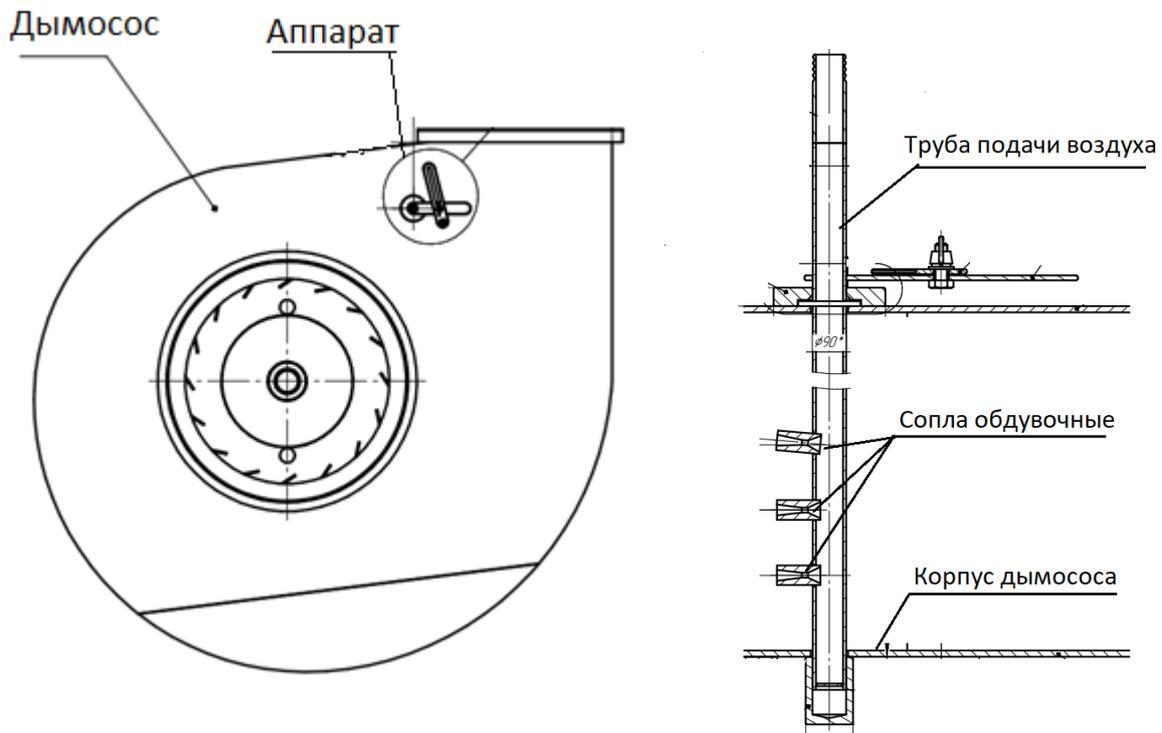


Рисунок 3.31 – Регулируемый сопловой аппарат для обдувки рабочего колеса дымососа. Место установки на улитке и его схема.

Испытания такого обдувочного аппарата на дымососе ДН-13Х-1500 показали более высокую его эффективность, чем неподвижных сопел. Полная очистка колеса достигалась за 3 минуты непрерывной работы сопел без остановки дымососа. Необходимая периодичность очистки установлена один раз в 8 часов. Этого достаточно для предотвращения развития виброскорости сверх 4 мм/с. Устройство эксплуатируется на Барнаульском маслозаводе.

Самообдувка рабочего колеса дымососа

Поскольку причиной появления отложений на тыльной стороне лопаток является характер распределения сил, действующих на частицу (Рисунки 3.30, 3.32), чтобы частица не задерживалась на тыльной стороне лопатки 2 произведение $f_{тр}T$ должно быть больше произведения $f_{тр}Y$ (где $f_{тр}$ – коэффициент трения). Очевидно, что чем меньше угол β_n , тем меньше сила T и больше сила Y , следовательно, для

уменьшения отложений нужно выбирать лопатки с углом β_l , близким к 90° , что и предложено автором реализовать в рабочих колесах новых образцов дымососов для котлов, работающих на растительных отходах.

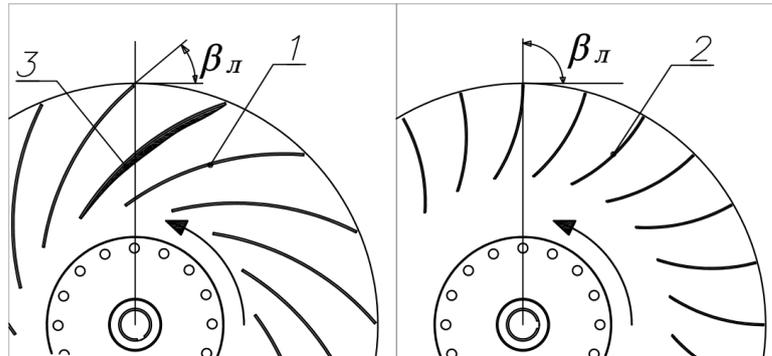


Рисунок 3.32 – Схема образования отложений на лопатках дымососа. 1 – лопатки колеса дымососа ДН; 2 – лопатки предлагаемого колеса; 3 – слой отложений; β_l – угол лопатки

Твердые сухие частицы не образуют отложений на нерабочей стороне лопатки, если выполняется следующее условие:

$$\operatorname{tg} \beta_l \geq f_{\text{тр}} \pm 0,75 c_x \frac{\gamma}{\gamma_s} \cdot \frac{r}{d_s} \cdot \frac{(w/u_2)^2}{\cos \beta_l}, \quad (3.1)$$

где β_l – текущий угол лопатки; $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; c_x – функция числа Re; γ и γ_s – плотности соответственно газа и частиц; r – радиус лопатки в месте соударения частиц о лопатку; d_s – диаметр частиц. Знак минус перед вторым членом соответствует скорости $w > 0$, а знак плюс возможен при вихревом течении ($w < 0$).

Поскольку на нерабочей стороне лопатки при $\beta_l < 90^\circ$ образуется отрывное течение с возможным обратным течением ($w < 0$) при характерных для пыли очень малых значениях d_s и относительно малом значении γ_s , возможно большее отложение пыли. Это следует из уравнения (3.1).

Опыт эксплуатации дымососов такой конструкции подтверждает эффективность технического решения. Например, в цементной промышленности использовались дымососы с углом $\beta_l = 90^\circ$, и количество отложений пыли уменьшилось [136].

На основании этого опыта автором предложена конструкция рабочего колеса для дымососов котлов на лузге, в которой реализован описанный выше принцип (Рисунок 3.32).

3.12 Газоочистка

Применение вихревого способа сжигания хотя и сопровождается резким, в 3...10 раз, снижением массы улетающей золы, но не решает проблемы необходимости золоулавливания, эффективность которого для соблюдения экологических норм должна быть не ниже 86 %. Для обеспечения уровня запыленности уходящих газов на уровне 20 мг/м³ компанией «ПроЭнергоМаш» с участием автора разработаны рукавные фильтры (Рисунок 3.33).



Рисунок 3.33 –Фильтр очистки газов ФОГ-

42

Рукавные фильтры очистки газов марки ФОГ с системой регенерации для линейки котлов производительностью от 2,5 до 25 тонн пара в час, обеспечивают содержание твердых частиц в уходящих газах значительно ниже нормативного, до 20 мг/м³ (Таблица 3.13).

Фильтры очистки газов применяются для наилучшего улавливания золы из продуктов сгорания котлов, с эффективностью не менее 96-99 %. Они выполняются в климатическом исполнении УХЛ категории размещения 1 по ГОСТ 15150-69 и соответствуют требованиям ГОСТ 31826-2012 и ГОСТ 25747-83.

В фильтрах применяется специальный материал с высокой термической устойчивостью, позволяющий эксплуатировать изделие при температуре 200 °С и выдерживать температурные нагрузки до 250 °С в течение нескольких минут.

Отличительные особенности фильтров марки ФОГ:

– Улучшенная схема фильтрации газов, которую удалось получить в результате компьютерного моделирования процессов газораспределения и фильтрации.

– Система отдельной непрерывной регенерации фильтрующих элементов, достигнутая за счёт разделения фильтра на четыре секции фильтрации с поочередным выводом одной из них на регенерацию. Такая схема позволяет произвести более глубокую очистку фильтрующих элементов и продлить их срок службы.

Таблица 3.13 – Основные параметры и размеры фильтров очистки газов ФОГ

Наименование характеристики		Ед. изм.	Типоразмер							
			ФОГ-5	ФОГ-8	ФОГ-13	ФОГ-6	ФОГ-12	ФОГ-21	ФОГ-36	ФОГ-42
Производительность		тыс. м ³ /ч	5	8	13	6	12	21	36	42
КПД улавливания		%	99							
Температура газов		°С	200							
Масса, не более		кг	2350	2850	3650	2350	4800	9500	12750	17500
Габаритные размеры	глубина	мм	2305	2305	2480	2100	2100	3950	5880	7890
	ширина		1480	2040	2600	2635	5270	5270	5270	5270
	высота		5190	5190	5500	6425	6425	6425	6425	6425

Стоит отметить, что для применения рукавных фильтров необходимо исключить попадание горящих частиц в газовый тракт перед фильтром. Разработанные вихревые топki обеспечивают выполнение этого условия в полной мере. Чего нельзя сказать о ряде неудачных попыток установки рукавных фильтров на котлах с факельным сжиганием лузги, непродолжительная работа которых заканчивалась полным выгоранием рукавов.

Выводы по третьей главе

1. Проведен анализ характеристик золы подсолнечной лузги. Показаны аналитически определенная склонность к шлакованию и фактическая картина в котлах.
2. Выявлен сублимационно-десублимационный механизм переноса и формирования отложений золы в котлах на подсолнечной лузге.

3. Результаты теплотехнических испытаний котлов показали значительно более интенсивное улетучивание соединений калия в среде окиси углерода. В режиме двухступенчатого топочного процесса и с рециркуляцией дымовых газов отмечался ускоренный рост натрубных отложений, несмотря на снижение температуры.
4. Показано характерное для сжигающих подсолнечную лузгу котлов формирование золовых отложений:
 - покрытие всех поверхностей нагрева стабильным слоем рыхлой белой золы со стабильной толщиной;
 - последующее нарастание гребневидных отложений на трубах топки в зонах турбулентности и первых по ходу газов конвективных пучках;
 - уплотнение и упрочнение отложений в зонах локальных максимумов температур и скоростей;
 - занос мелкой (0...50 мкм) рыхлой золой горизонтально расположенных труб и полостей в газоходах с низкими температурами.
5. Анализ характерных для котлов на подсолнечной лузге форм отложений позволил предложить и внедрить способы и устройства для предотвращения их образования и очистки:
 - организация низкотемпературного топочного процесса;
 - быстрый вывод образующейся золы из вихревой топки для уменьшения возгонки;
 - от связанных отложений очистка поверхностей паровой обдувкой;
 - от сыпучих отложений пневматическими импульсами и воздушной струей;
 - рациональная геометрия трубных пучков.
6. Рассмотрена проблема налипания золы на лопатках дымососов и предложены способы их очистки и снижения негативного эффекта.
7. Рассмотрен вопрос выбросов твердых частиц с продуктами сгорания котлов. Обеспечиваемое вихревой топкой отсутствие горячих частиц в уносе позволило использовать эффективный способ очистки уходящих газов в рукавных фильтрах марки ФОГ, разработанных для всей линейки производимых котлов.

ГЛАВА 4 ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «ТОРНАДО»

4.1 Опыт промышленного применения разработанного оборудования

Разработанные с учетом представленных выше результатов изысканий конструкции низкотемпературных вихревых топков для лузги вписаны в топочный объем паровых и водогрейных котлов. Ограждающие стены этих вихревых топков образованы мембранными водотрубными экранами, включёнными в контур циркуляции котла. На сегодня компанией «ПроЭнергоМаш», г. Барнаул, изготовлено около 50-ти котлов с низкотемпературными вихревыми топками для сжигания лузги, принципы и основы разработки которых изложены в настоящей диссертации. Их производство является одним из ключевых для завода компании, а проектирование котельных для лузги – для проектного подразделения. Помимо котлов с вихревыми топками для лузги не прекращается процесс разработки и поэтапного совершенствования специализированных котельно-вспомогательных устройств.

Первым объектом, на котором была реализована принятая концепция проектирования котлов с вихревыми топками стал котел КЕ-25-24 РТО (Рисунок 4.1), установленный в котельной маслоэкстракционного завода в с. Верхняя Хава Воронежской области [92]. На предприятии проводилась масштабная реконструкция с увеличением переработки до 1000 тонн в сутки по сырью (подсолнечник), предусматривающая увеличение паропроизводительности и объема утилизации лузги котельной.

Существующая котельная с двумя котлами КЕ-10-1,4, работающими на лузге подсолнечника, была увеличена за счет пристройки дополнительного задания, в котором расположено оборудование котельной ячейки с новым котлом, пост оператора и оборудование водоподготовки. Существующие котлы обеспечивали суммарную выработку до 15 тонн пара в час, паропроизводительность ограничена по условиям эксплуатации. На большей нагрузке эти котлы не могли работать, поскольку их трубные пучки забивались непроходимыми прочными отложениями золы за одни сутки. Согласно техническому заданию для полной утилизации лузги

паропроизводительность котельной должна увеличиться до 37 тонн пара в час. Требовались дополнительные 22 тонны в час. Была спроектирована установка в пристраиваемом здании реконструированного с установкой низкотемпературной вихревой дубль-топки котла КЕ-25-24 производства Бийского котельного завода. Котел под реконструкцию изготавливался в комплектации, исключающей поставку топочных блоков, вместо которых при монтаже были установлены специально разработанные и изготовленные из цельносварных мембранных панелей газоплотные топочные блоки, образующие две параллельно расположенные радиальные вихревые топки с камерой охлаждения между ними по центру. Впоследствии это техническое решение было запатентовано [85].

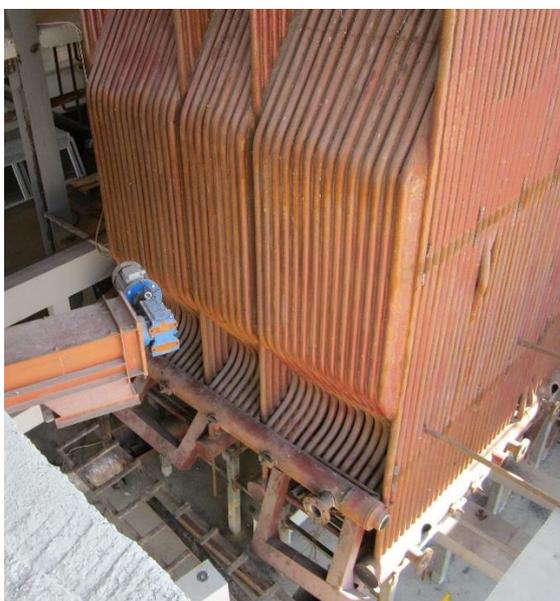


Рисунок 4.1 – Монтаж блоков котла с вихревой топкой КЕ-25-24 РТО

Топочное устройство котла Е-25-24 РТО включает две ВТ [85], образуемые газоплотными водотрубными панелями двух топочных блоков. Шаг экранов 95 мм, труба 57х3,5. При установке передний и задний топочные блоки в месте стыковки свариваются между собой полосой. В нижней части топочные блоки имеют колосниковое охлаждаемое пароводяной смесью полотно. Топочные и конвективный блоки соединяются между собой системой водоподводящих и паропроводящих трубопроводов.

Крупные фрагменты золы из топочных блоков удаляются в скребковый конвейер золоудаления. Для очистки поверхностей нагрева от натрубных отложений

установлены аппараты воздушно-импульсной очистки. Удаление сбитых ударными волнами натрубных отложений и осажденной летучей золы из конвективного блока в скребковый конвейер происходит через золосливные трубы [137].

Основные характеристики и параметры котла приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики котла КЕ-25-24 РТО

№	Наименование характеристики	Размерность	Значение
1. Параметры пара			
1.1	Давление пара в барабане	МПа	до 2,4
1.2	Тип пара		насыщенный
1.3	Температура пара	°С	221
1.4	Паропроизводительность	т/ч	25
1.5	Температура питательной воды	°С	100-105
2. Характеристики котла			
2.1	Радиационная поверхность	м ²	90
2.2	Конвективная поверхность	м ²	490
2.3	КПД котла	%	88-85
Характеристики потоков			
3.1	Расход топлива	кг/ч	до 4200
3.2	Расход воздуха	нм ³ /ч	19600
3.3	Расход дымовых газов	нм ³ /ч	27000
3.5	Температура уходящих газов	°С	не более 200

Котельная ячейка помимо котла включает вспомогательное оборудование. Схема котельной установки приведена на рисунке 4.2. Далее по тексту описания ссылки даны на номера этой схемы.

Котел включает две вихревые топki 3, ограниченные снаружи боковыми и радиальными экранами и средними (разделительными) экранами топочных блоков внутри. Для обеспечения низкотемпературного режима горения топочные блоки имеют развитую поверхность нагрева. В нижней части вихревых топок установ-

лены водоохлаждаемые колосниковые решетки для подачи нижнего дутья и выгрузчики шлака 5 (механизированные шурующиеся планки) для выгрузки выгоревшей золы из топки.

Разделительные экраны отделяют вихревые топки 3 от общей камеры охлаждения 4. Вихревые топки 3 соединяются с камерой охлаждения 4 через круглые ГОО. Внутри камеры охлаждения установлены с редким шагом вертикальные испарительные трубы (фестон) для дополнительного охлаждения продуктов сгорания перед входом в плотные конвективные пучки.

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

Передний топочный блок укомплектован тремя лазами в нижней части фронтальной стены для обслуживания топок и камеры охлаждения. На боковых стенах топочных блоков имеется 8 отверстий для установки гляделок либо устройств ударно-волновой очистки. На стене заднего топочного блока для очистки фестона установлен лаз и закладная под установку устройства ударно-волновой очистки.

За топочным устройством располагается конвективный блок 2, который соединяется с топочными блоками системой водоподводящих и пароотводящих трубопроводов. Из верхнего барабана конвективного блока 2 произведенный пар подается в паропровод котельной через главную паровую задвижку 1.

Котел оснащается вспомогательными системами. Над камерой охлаждения 4 и конвективным блоком 2 устанавливаются взрывные предохранительные клапаны. Воздуховоды оборудованы регулировочными шиберами. Бункера-зольники подключаются к системе золоудаления 10 через затворы-мигалки. Котел оснащается устройствами воздушно-импульсной очистки.

В основании топочных камер расположены трубная решетка с щелями, через которые происходит удаление шлака, зажигающий колосник и воронка ретортного питателя.

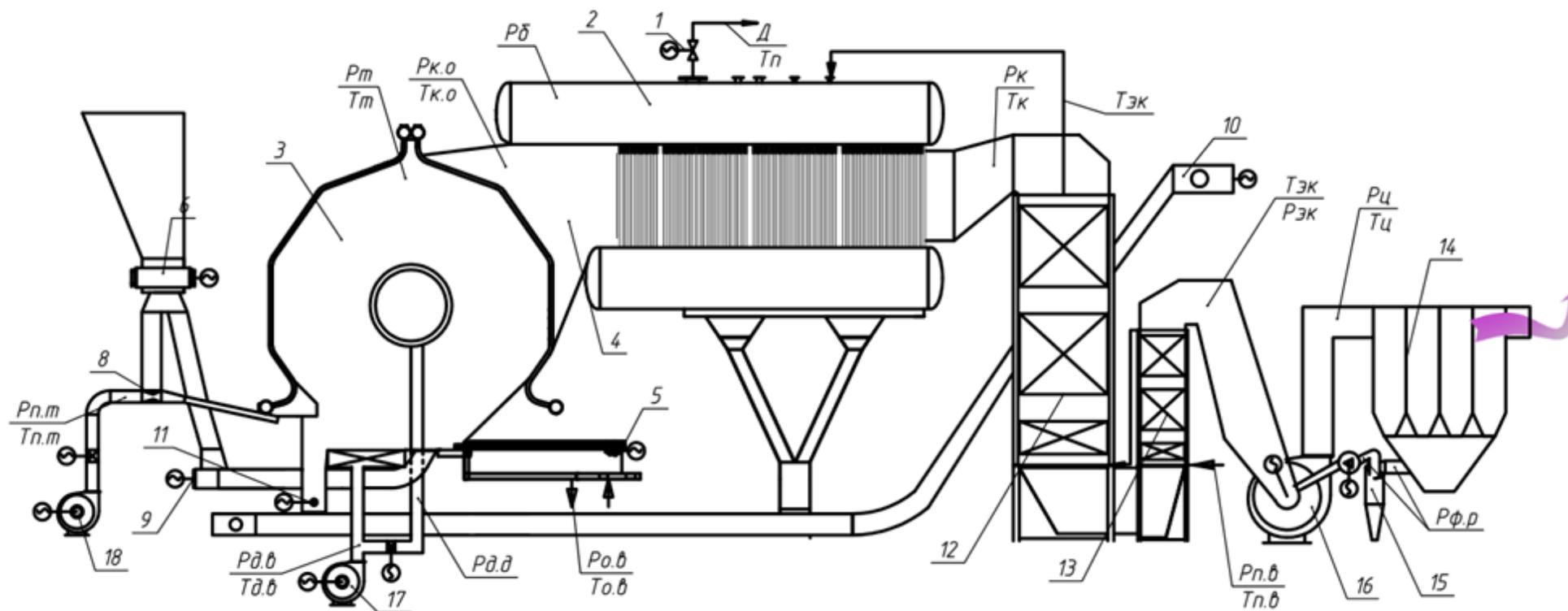


Рисунок 4.2 – Схема котельной установки с котлом KE-25-24 РТО:

1 – главная паровая задвижка; 2 – котел; 3 – вихревая топка (2шт); 4 – камера охлаждения; 5 – выгрузатель шлака (2шт.); 6 – шнековый питатель топлива (2шт.); 7 – переключатель потока (2шт.); 8 – эжектор топливоподачи (2шт.); 9 – питатель ретортной топки (2шт.); 10 – конвейер золоудаления; 11 – шнек золоудаления; 12, 13 – экономайзеры; 14 – золоуловитель; 15 – фильтр рециркуляции золоуловителя; 16 – дымосос; 17 – вентилятор дутьевой (2шт.); 18 – вентилятор пневмоподачи (2шт.)

ВТ имеют форму цилиндров с горизонтальной осью вращения. Выход продуктов сгорания из топочных камер происходит через ГОО, расположенные в центре средних экранов. В ГОО, образованных парными кольцевыми коллекторами, установлены завихрители, предназначенные для подачи третичного дутья.

Для растопки в нижней части боковых стен расположены закладные под установку запальных горелок типа ЗСУ-ПИ-45.

Зола из топок 3, камеры охлаждения 4 и котельного пучка 2 удаляется скребковым конвейером 10.

Низ фронтальной стены, задний скат топок, под и задняя стена камеры охлаждения выкладываются кирпичной кладкой.

Данная конструкция вихревых топок 3 с увеличенной удельной поверхностью нагрева позволяет обеспечить низкотемпературный режим топочного процесса и, соответственно, низкую возгонку и плавление золы, в том числе и при сжигании подсолнечной лузги.

При работе котла желательно для симметрии тепловосприятий поддерживать одинаковую нагрузку в обеих вихревых топках 3 за счет одинаковой подачи в них потоков лузги и дутья. Нагрузка котла регулируется подачей лузги, которая дозируется из расходного бункера с помощью шнековых питателей ретортной топки и шлюзовых питателей, питающих эжекторы пневмоподачи 8.

Необходимый для горения воздух (дутье) подается в виде тангенциального дутья через фронтальные и задние тангенциальные сопла, колосниковую решетку и завихритель. Тангенциальные сопла и вихрь, формируемый завихрителем, создает активную вихревую аэродинамику в объеме вихревых топок 3. Соответственно, в вихревых топках 3 за счет малого размера газовыпускного окна создаются условия, обеспечивающие вихревое движение и удержание частиц до глубокого выгорания.

Расходы дутья регулируются частотными приводами дутьевых вентиляторов. Требуемое распределение дутья между группами тангенциальных сопел устанавливается с помощью шиберов при настройке воздушного режима во время пусконаладочных испытаний. После отладки топочных режимов положение регулирующих шиберов фиксируется.

Ориентировочно используется следующий баланс воздуха:

- первичное дутьё в эжектор – 10...20 %;
- тангенциальное вторичное дутьё, во фронтальные сопла – 10...25 %;
- под колосниковое вторичное дутьё – 20...35 %;
- тангенциальное вторичное дутьё, в задние сопла – 20...30 %;
- третичное дутьё в завихритель газовыпускного окна – 20...30 %.

Внутри топок за счет интенсивного перемешивания создаются благоприятные условия для глубокого выжигания летучих, коксового остатка и уноса, подавляется эмиссия вредных веществ и стабилизируется топочный процесс. Благодаря развитой поверхности экранов в вихревой топке организуется низкотемпературный топочный процесс.

Газы и частицы уноса, образующиеся при сгорании топлива, первоначально охлаждаются в топках 3 и затем в камере охлаждения 4, проходя через редкий испарительный пучок, охлаждаются за счет радиационного и конвективного теплообмена. Из камеры охлаждения 4 дымовые газы и летучая зола поступают на охлаждение в плотные кипяtilьные пучки конвективного блока 2, где отдают тепло кипящей воде и пару. Окончательно дымовые газы охлаждаются в экономайзере, подогревая питательную воду. Охлажденные дымовые газы далее дымососом подаются в золоуловитель, очищаются от золы в групповом циклоне, работающем под наддувом и с рециркуляцией и, пройдя через дымовую трубу, рассеиваются в атмосфере [135]. Питательная вода подается в котел противоточно, она подогревается в экономайзере, испаряется в трубах котельного пучка 2 и экранов топок 3. Пар, получаемый при работе, отводится из котла через главную паровую задвижку 1.

Лузга из-за большого содержания летучих взрывоопасна. Поэтому на котельной установке в камере охлаждения 4, конвективном блоке 2, на экономайзерах и золоуловителе в верхних точках устанавливаются взрывные предохранительные клапаны.

Низкотемпературный топочный процесс обеспечивается за счет большой удельной поверхности нагрева вихревых топочных камер котла – 90 м² против

63 м² у прототипа – КЕ-25-24 Р, удельная поверхность нагрева увеличена на 43 % за счет присутствия внутренних прижимных экранов при тех же внешних габаритах котла.

- Средняя тепловая нагрузка поверхности, кВт/м² – 82.
- Теплонапряжение объема, МВт/м³ – 0,351.

В период с 17 по 20 февраля 2012 г. проводилось комплексное опробование оборудования котельной ячейки с паровым котлом КЕ-25-24 РТО. Во время проведения испытаний на лузге подсолнечника были исследованы следующие нагрузки:

- минимальная нагрузка – 12% мощности (пусковой режим);
- промежуточная нагрузка – 40, 56, 72% мощности;
- максимальная нагрузка – 92% (паропроизводительность – 23,7 т/ч);
- кратковременная нагрузка – 100% мощности (24,9 т/ч).

При проведении балансовых испытаний определено, что котлоагрегат работает устойчиво на нагрузках 40...92% от номинальной. КПД установки во всех опытах при работе на двух топках не менее 85%. Испытания подтвердили высокую удерживающую способность топок, обеспечивающую полное выжигание горючих веществ их уноса. Вид на ГОО из камеры охлаждения (см. рисунок 2.35 справа).

Дальнейшая эксплуатация котла показала возможность его работы без остановок для очистки в течение 45-ти дней. Для сравнения, ранее установленные котлы КЕ-10 ежедневно чистятся вручную без остановки и полностью останавливаются для охлаждения и расшлаковки после 10-14 суток работы [135].

Другим важным эпизодом в развитии технологии сжигания подсолнечной лузги в низкотемпературной вихревой топке стало строительство котельной ячейки с котлом Е-14-1,4 ОИ в котельной «Барнаульского маслоэкстракционного завода» в 2016 году. Расположение объекта в одном городе с предприятием-разработчиком обеспечило наилучшую обратную связь и возможность провести дополнительные испытания и исследования (Рисунок 4.3).

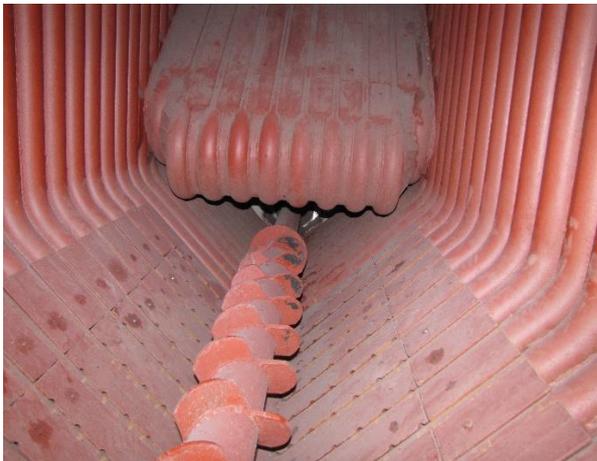
*а**б**в**г**д**е*

Рисунок 4.3 – Монтаж и наладка котле Е-14-1,4 ОИ на Барнаульском МЭЗ:
а – монтаж котла; *б* – монтаж аппарата обдувочного; *в* – вид газовыпускных окон вихревых топков из камеры охлаждения; *г* – треки горящих топливных частиц в вихревой топке выше газовыпускного окна; *д, е* – водоохлаждаемый колосник и шнек золоудаления

Котел выполнен из цельносварных топочного и конвективного блоков с полной газоплотностью экранов (Рисунок 4.3 *а*). На котле впервые установлены обдувочные аппараты (Рисунок 4.3 *б*).

При проведении пусконаладочных работ была зафиксирована хорошая сходимость аэродинамической обстановки в расчётной модели и реальных вихревых топках. Даже без предварительных настроек распределения топочного дутья вихревые топки характеризуются практически полным удержанием витающих частиц и хорошим заполнением топочного объема (Рисунок 4.3 *в, г*). Водоохлаждаемый колосник и шнековый выгрузатель шлака (Рисунок 4.3 *д, е*) в достаточной мере обеспечивают ворошение слоя и удаления спёков золы. Котел показал высокую приемистость.

После запуска котла выяснилось, что при работе аппарата обдувочного, подключенного к паровому коллектору с давлением 0,6 МПа, выбрасывается большое количество конденсата, который впитываясь в золу приводит к ее слипанию и комкованию, что привело к перекрытию межтрубных проходов и потере разрежения в топке котла (Рисунок 4.4 *верхняя строка*).

После анализа проблемы было выполнено переподключение подводящего обдувочный агент трубопровода к штуцеру на верхнем барабане. Подача насыщенного пара с давлением 1,2-1,3 МПа по трубопроводу с минимальной длиной позволила сократить количество конденсата, впрыскиваемого при проведении обдувки поверхностей нагрева, что в совокупности с увеличением кинетической энергии струи обеспечило требуемый эффект – надежное удаление формирующихся на первых по ходу газов золовых отложений (Рисунок 4.4 *нижняя строка*). Котел работает без остановов на очистку не менее 1,5 месяцев.

Со стен котла и поверхностей нагрева была отобрана зола. Проверена растворимость ее в воде. Доля водорастворимых компонентов составляет 20-60% и зависит от температуры в зоне отбора. В высокотемпературных зонах водорастворимые компоненты улетучиваются. Установлена связь растворимости золы с улетучиванием компонентов золы.

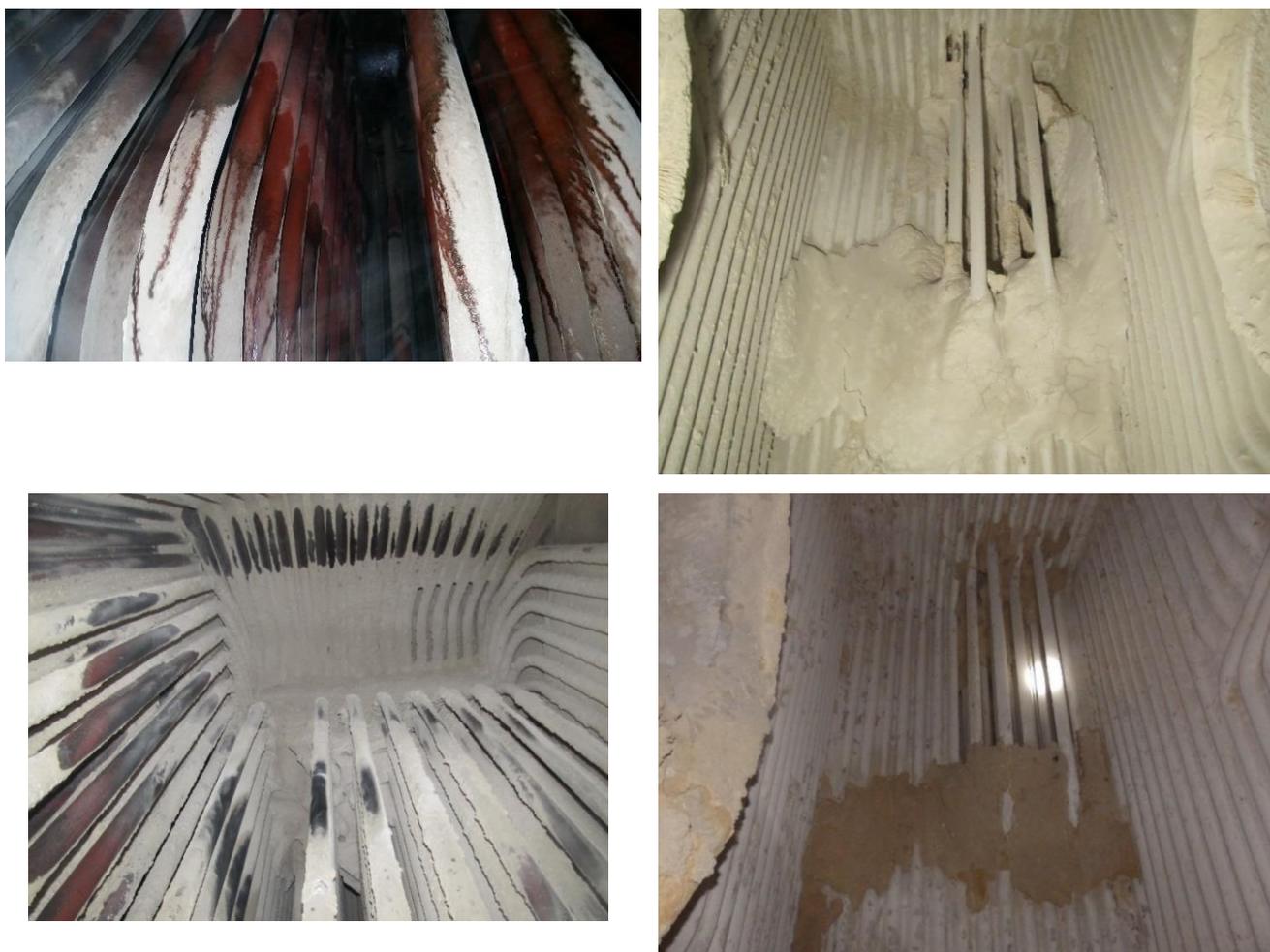


Рисунок 4.4 – Работа обдувочного аппарата:

верхняя строка – работа обдувочного аппарата на насыщенном паре с давлением 0,6 МПа. Видны подтеки воды, нарастание рыхлых отложений на фестоне;
нижняя строка – работа обдувочного аппарата на насыщенном паре с давлением 1,3 МПа. Отложения не укрупняются, фестон не забивается

Первым двухтопливным котлом, установленным в мини-ТЭЦ стал котел Е-20-1,5-360 на маслоэкстракционном заводе «Кубанские масла» в станице Тбилисской. В котле реализована возможность сжигания как подсолнечной лузги, так и природного газа за счет установки 4-х вентиляторных горелок (Рисунок 4.5). Котел вырабатывает 20 тонн в час перегретого пара с температурой не ниже 360 °С и обеспечивает смену рабочего топлива лузга/газ без остановки котла, что требуется по условиям работы турбогенератора (Рисунок 4.6).

В котле реализован вихрь с вводом топлива в топку в верхней части фронтального экрана. Топочная камера имеет форму правильной 8-гранной призмы, два расположенных по оси круглых выходных окна и разделена по вертикали двухсветным испарительным пучком. ВТ котла характеризуется прекрасной удерживающей способностью.

Вид с фронта - справа

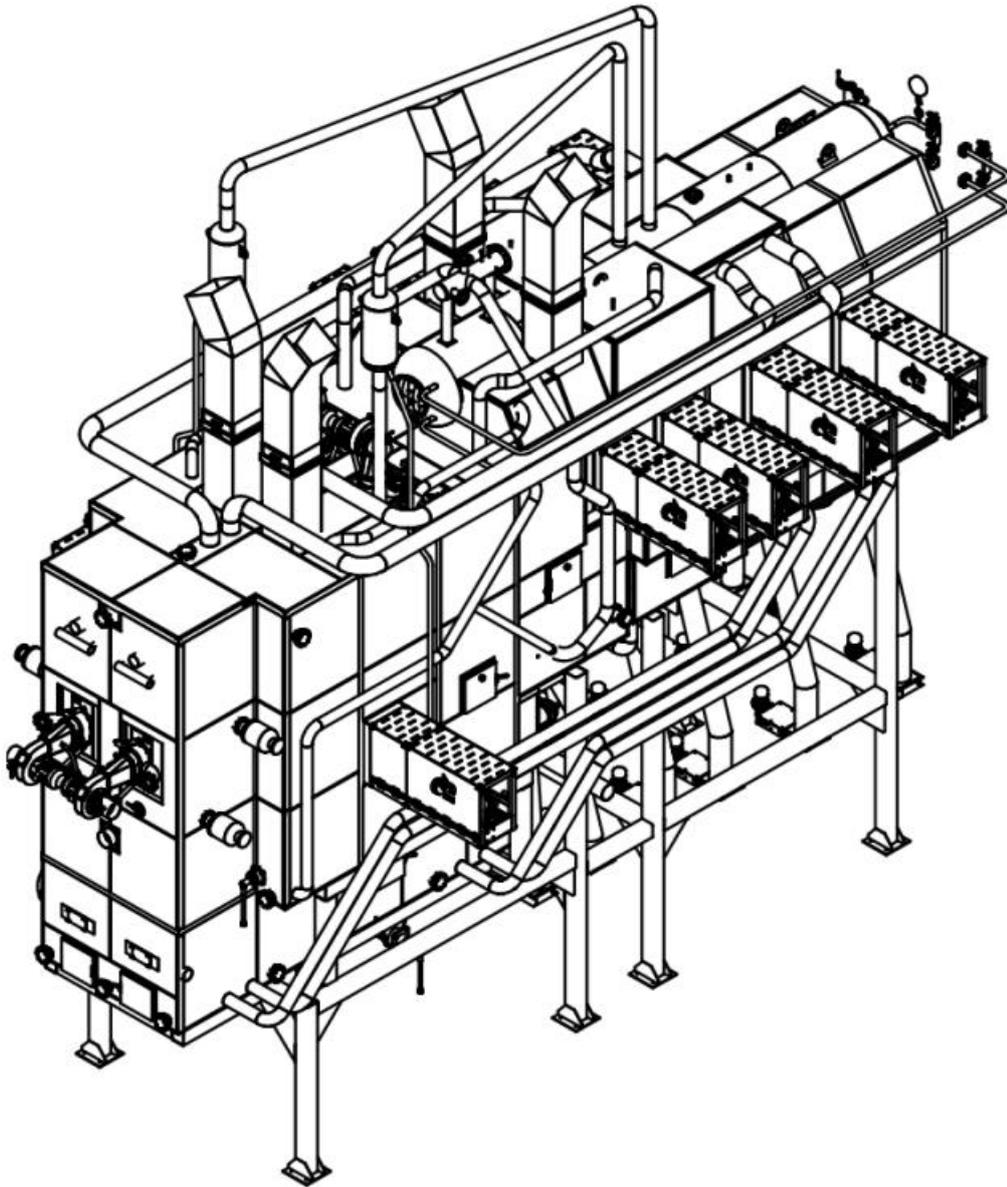


Рисунок 4.5 – Общий вид котла E-20-1,5-360 ОГИ. Видны 4 газовые вентиляторные горелки и обдувочные аппараты

Требующим внимания показателем работы топливосжигающих устройств является удельный выброс нормируемых загрязняющих веществ. Так характеризуюсь ступенчатой подачей окислителя и интенсивного перемешивания топливовоздушных струй, ВТ обеспечивает показатели химического недожога и выхода оксидов азота ниже нормативных требований (Таблица 4.2). Вихревой топочный процесс менее требователен к качеству регулирования подачи дутья, циклонный эффект удерживает твердые частицы во всем диапазоне, чего нельзя сказать о камерном и слоевом сжигании парусных частиц типа лузги, которые при высоких скоростях дутья могут вылетать из топочной камеры не догорая.

Также важно отметить, что несмотря на наличие в подсолнечной лузге серы, 0,1...0,35% на рабочую массу, в уходящих газах за котлами диоксид серы газоанализатором не обнаруживается. Предположительно, при сжигании лузги в вихревой топке вся высвободившаяся сера вступает в реакцию с кальцием и образует сульфат кальция (CaSO_4), инертный при дальнейшем движении по газовому тракту котла. Это подтверждает описанные в предыдущей главе реакции. Кроме того, присутствие сульфата кальция косвенно подтверждается наличием вяжущих свойств золы подсолнечной лузги. При ее обдувке влажным паром частицы золы могут слипаться в крупные комки.



Рисунок 4.6 – Горение природного газа. Виден факел фронтальной горелки и двухцветный разделительный экран

Таблица 4.2 – Содержание в уходящих газах от котлов загрязняющих веществ

Е-20-1,5-360 ОГИ (Газ)	Замер ($\alpha=1,4$)	При н.у. и $\alpha=1,4$	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 $\alpha=1,4$		
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 $\alpha=1,4$		
NO _x	173	274	300	мг/м ³
CO	110	174	-	мг/м ³

4.2 Теплогенератор – альтернативный способ утилизации лузги

При решении проблем утилизации растительных отходов типично возникает такая проблема – отсутствие на производственной площадке потребителя для вырабатываемой при сжигании тепловой энергии. Для расширения возможностей огневой утилизации отходов и полезного использования вырабатываемой энергии предложен теплогенератор для нагрева воздуха. Основное назначение теплогенератора (Рисунок 4.7) [138] (воздухонагревательной установки) – выработка тепловой энергии за счет сжигания сельскохозяйственных и древесных отходов типа шелухи, соломы, коры, щепы и нагрев воздуха. Горячий воздух может использоваться в качестве сушильного агента в зерносушилках и для воздушного отопления помещений.

Теплогенератор содержит ограниченную обмуровкой 1 топочную камеру 2 с колосником 3, теплообменный блок (воздухоподогреватель) 4, питатель топлива 5, дымосос 6, вентилятор подачи нагреваемого воздуха 7 и вентилятор подачи дутья 8. При этом обмуровка 1 закреплена на каркасе 9, а топочная камера 2 выполнена как камера сгорания 10, подключенная через соединительный газоход 11 к камере дожигания 12. В камере дожигания 12 установлены сопла вторичного дутья 13 [138].

Конструкция топочной камеры 2 создает разделение топочного процесса на две стадии и обеспечивает двухстадийное низкотемпературное, экологически эффективное сжигание. Проблема, вызванная более интенсивной возгонкой золы в восстановительной среде, решается за счет охлаждения дымовых газов на выходе их камеры дожигания смешением газового потока с рециркулирующими дымовыми газами и десублимацией золовых компонентов в газовом потоке, а не на теплообменных поверхностях, дымосос рециркуляции 21 [138].

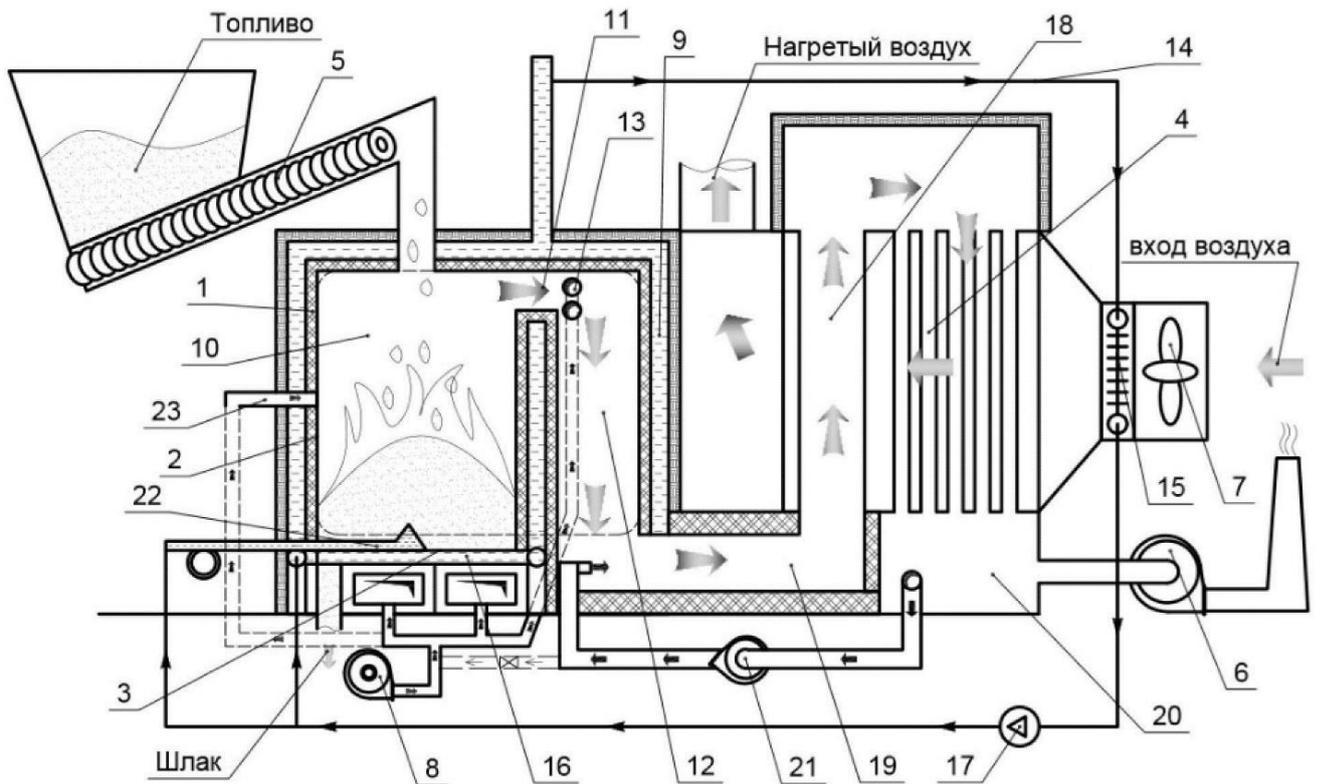


Рисунок 4.7 – Технологическая схема теплогенератора

Теплогенератор также содержит контур 14 циркуляции теплоносителя, который включает охлаждаемый каркас 9, калорифер 15, трубы 16, образующие колосник 3 и другие требующие охлаждения элементы, а также циркуляционный насос 17 [138].

Теплообменный блок 4 имеет первую ступень 18, выполненную из жаростойкой стали и своим входом 19 он подключен к коробу 20 уходящих газов, каналом с дымососом 21 рециркуляции дымовых газов. Камера сгорания 10 обслуживается охлаждаемой шурующей планкой 22, для подачи дополнительного вторичного дутья в ней установлены сопла 23 [138].

При работе теплогенератора питатель 5 дозирует топливо из расходного бункера в ограниченную обмуровкой 1 топочную камеру 2. Топливо загружается непосредственно в камеру сгорания 10 на колосник 3, образованный охлаждаемыми трубами 16. Под колосник 3 и через сопла 23 вентилятором 8 нагнетается воздух для горения в количестве, достаточном для поддержания низкотемпературного режима газификации и полного выжигания коксозольного остатка, но недостаточном для полного выгорания горючих летучих из топлива. Затем топочные газы и продукты неполного сгорания из камеры 10 через газопровод 11 входят тангенциально в камеру дожигания 12 с образованием вихря, поэтому интенсивно смешиваются, быстро и полно сгорают в потоке вторичного воздуха, который подается через сопла 13 [138].

За камерой дожигания 12 продукты сгорания на входе 19 в теплообменный блок 4 разбавляются присадкой охлажденных уходящих дымовых газов, которые подаются дымососом рециркуляции 21 из короба 20 до безопасного по условиям надежной работы металла теплообменного блока 4 уровня температуры и здесь отдают тепло нагреваемому воздуху. После прохождения блока 4 часть дымовых газов отсасывается дымососом рециркуляции 21, остальной объем дымососом 6 сбрасывается в дымовую трубу [138].

Теплоноситель, заполняющий контур циркуляции 14, осуществляет охлаждение каркаса 9, труб колосника 16, устройства 22 шурования слоя и выгрузки золы и перенос тепла в калорифер 15. При этом циркуляционный насос 17 обеспечивает надежную циркуляцию теплоносителя. В калорифере 15 теплоноситель отдает тепло входящему потоку воздуха, нагнетаемому вентилятором 7. Такой предварительный подогрев воздуха защищает поверхности нагрева блока 4 от конденсации водяных паров и низкотемпературной коррозии. Воздух, нагретый в теплообменном блоке 4, направляется по воздухопроводу для использования по назначению [138].

Устройство 22 шурования слоя и выгрузки золы механизировано осуществляет в автоматическом режиме разравнивание и перемешивание топлива в слое и вывод золы из камеры сгорания.

Характеристики теплогенератора представлены в таблице 4.3. За счет использования двухступенчатого сжигания и рециркуляции дымовых газов предлагаемая схема имеет широкий диапазон по применяемым топливам и пригодна для любого топлива растительного происхождения с теплотой сгорания 1,8...4,5 ккал/кг, выходом летучих от 65 %, зольностью и примесями до 10 %.

Таблица 4.3 – Характеристики теплогенератора

Вид топлива	Лузга гречневая, овсяная, подсолнечная, щепы, кора, стебли, солома и т.п.			
Теплопроизводительность номинальная, МВт	1,5	2,5	3,5	5,0
Расход топлива, кг/час	350...800	600...1300	800...1850	1150...2650
КПД	0,85			
Расход воздуха при 260 °С, тыс. м. куб./час	40	65	95	135
Температура максимальная, °С	260			
Установленная эл. мощность, кВт	19	30	40	60
Электропотребление, не более, кВт	15	25	35	50
Размер ДхШхВ, м	8х2,0х4,7	8,5х2х5	9х2,2х5	10х2,5х5
Масса в объеме заводской поставки, т	10	13	17	22
Диаметр выходного воздуховода, мм	1000	1200	1400	1600

Характерные преимущества предлагаемого теплогенератора:

- Высокий КПД, низкие потери с уходящими газами, так как в установке продукты сгорания не разбавляются холодным воздухом.

- Пожаробезопасность и высокое качество сушеного зерна, поскольку продукты сгорания не смешиваются с сушильным агентом.
- Высокая надежность и отсутствие шлакования, так как основные стадии сжигания – выход летучих и их сгорание – происходят в разных объемах.
- Установка безопасна, нет взрывоопасных смесей и сосудов под давлением.
- Теплогенератор автоматизирован, данные выводятся на панель управления.
- Не требуется подключение газа, это двухтопливная установка.

Работа теплогенератора осуществляется в автоматическом режиме с поддержанием заданной температуры горячего воздуха до температуры 200...300 °С. Для получения сушильного агента с требуемой в технологическом процессе температурой этот воздух смешивается с холодным.

В качестве топлива в установку могут подаваться практически любые горючие отходы сельского и лесного хозяйства с размером частиц 15...50 мм: любая лузга, сор, стебли, солома, костра льна, КДО, измельченный бурый уголь и т.п.

Теплогенераторы [138] (Рисунок 4.8) расширяют возможность рациональной утилизации растительных отходов за счет использования воздуха в качестве теплоносителя. Кроме теплогенераторов для рациональной утилизации растительных отходов можно использовать такой класс оборудования как газогенераторы [139 - 142], позволяющие перерабатывать отходы не только в тепловую энергию, но и в более ценную продукцию: горючие газы, жидкое топливо и биоуголь. Особенно востребованы активированный уголь и жидкое биотопливо.

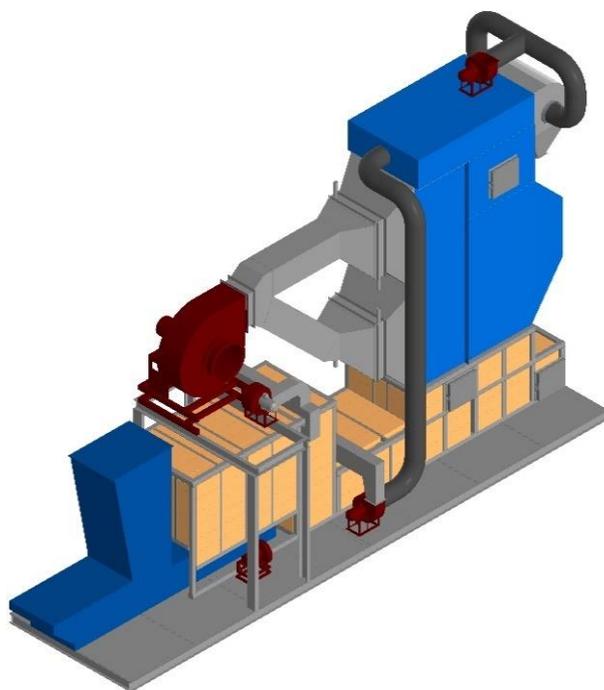


Рисунок 4.8 – Общий вид теплогенератора

4.3 Оценка перспектив полезного использования лузги

Взятый международным сообществом курс на зеленую энергетику способствует появлению в России и за рубежом значительного количества новых разработок, направленных на сжигание древесных и растительных отходов. Предлагаемая технология вихревого сжигания «Торнадо» может эффективно использоваться как для преимущественно рассмотренной в настоящем исследовании утилизации лузги, так и для других сухих и влажных растительных и коро-древесных отходов. Дадим оценку этим перспективам.

Общий годовой тепловой потенциал лузги в России, оцененный на основании данных Росстата [41] (см. таблицу 1.2) и её калорийности, $Q'_i = 17,5 \text{ МДж/кг} = 4180 \text{ ккал/кг}$ (см. таблицу 1.7) составляет примерно 13 млн.Гкал/год (54 млн.ГДж/год) или около 1,86 млн.т.у.т./год.

Средний тариф на тепловую энергию в 2023 году по данным Федеральной службы государственной статистики [143] составил $C_{\text{э}} = 2429,74 \text{ руб/Гкал}$.

К 2023 году суммарная паропроизводительность котлов на лузге, произведенных компанией «ПроЭнергоМаш» (Рисунок 4.9) составляла 423 тонны пара в час, и она эквивалентна теплопроизводительности 290 МВт (250 Гкал/час). При годовой наработке 8000 часов эти котлы произведут до 2 млн.Гкал/год тепла в виде пара. При КПД котлов «Торнадо» на уровне 87% их теплопотребление с учётом потерь составит 2,3 млн.Гкал/год или около 17,8% от полного тепловыделения производимой в России лузги.

Соответственно, внедрение технологии позволило обеспечить:

- ресурсосбережение угля, при его КПД сжигания 80% в слоевых котлах, равном 357 тыс.т.у.т./год или до 700 тыс.т./год угля среднего качества в натуральном выражении;
- снизить экологическую нагрузку от выбросов золы на 140 тыс.т./год за счёт отказа от угля со средней зольностью $A^r - 20\%$;
- выработку тепла в виде пара с годовым экономическим эффектом в размере $\text{Э} - 4,86 \text{ млрд.руб./год}$.

Расчетное потребление лугги установленными котлами по теплоте сгорания оцененное в 2,3 млн.Гкал/год, составляющее долю в 17,8 % от всего годового теплового потенциала вырабатываемой в России лугги, не учитывает котлы, выпущенные и реконструированные на сжигание лугги другими предприятиями, однако позволяет сделать вывод о наличии значительного потенциала рынка для дальнейшего роста количества выпускаемых котлов «Торнадо» для сжигания лугги.

Дополнительный спрос на паровые утилизационные котлы также скрыт в возможности строительства электростанций на биотопливе – БиоЭС. Строительство электрогенерирующих мощностей на возобновляемом топливе и отходах способствует улучшению экологической обстановки и экономии ресурсов. С паровыми котлами на лугге могут строиться как энергоблоки, работающие по конденсатному циклу, так и встроенные в производственный процесс для снабжения производственных нужд предприятий паром. В качестве парового двигателя могут использоваться турбины и поршневые либо роторные машины [144-150].

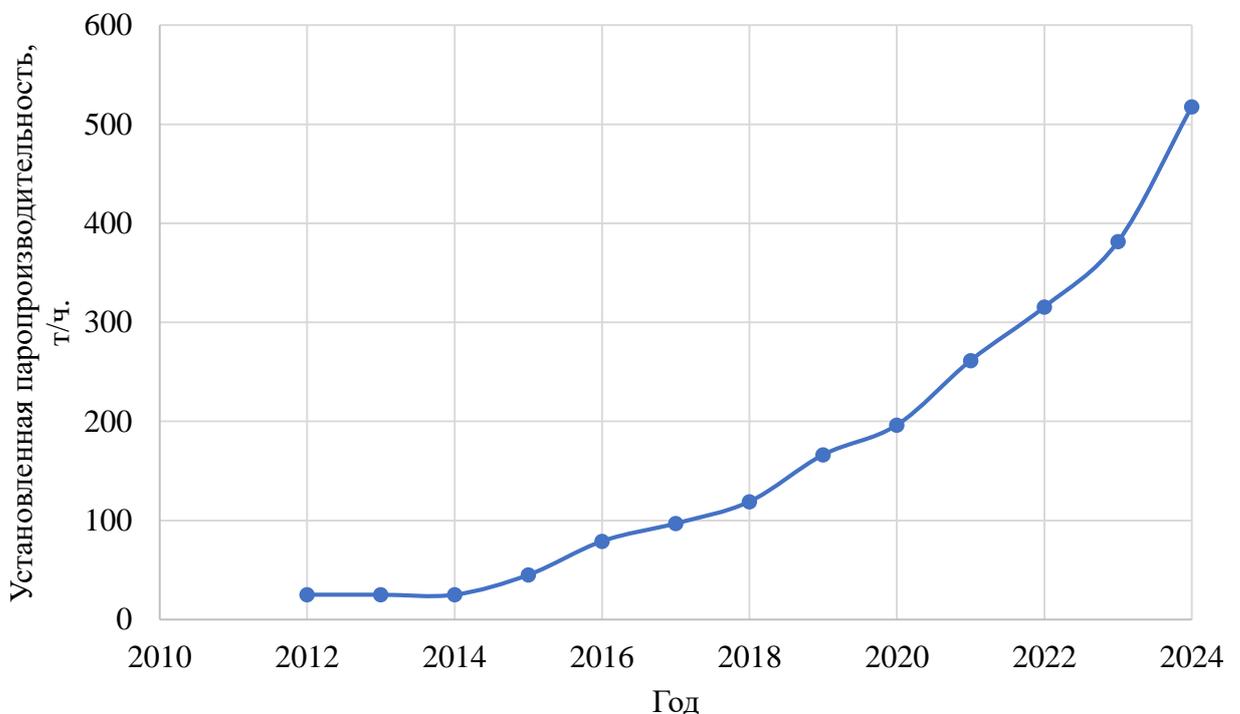


Рисунок 4.9 – Суммарная паропроизводительность изготовленных котлов на лугге с вихревой топкой "Торнадо" тонн в час за 2011-2024 гг

Российскими специалистами проведена оценка потенциала ВИЭ в России с учетом доступности ресурсов, технической осуществимости и экономической обоснованности применения технологий возобновляемой энергетики (Таблица 4.4) [1]. Оценка показывает возможность рационально, экономически обоснованно за счет энергии биомассы выработать электрический эквивалент 69 млн. т.у.т. в год, что составляет 50% современного уровня энергопотребления России, и этот уровень в 23 раза выше, чем у солнечной энергетики и в 6 раз выше, чем у ветровой.

Таблица 4.4 – Валовый потенциал ВИЭ в России, млн. т у.т. в год [1]

Ресурсы	Валовый потенциал	Технический потенциал	Экономический потенциал
Энергия Солнца	2 205 400	9 676	3
Энергия ветра	886 256	2216	11
Малая гидроэнергетика	402	126	70
Энергия биомассы	468	140	69
Геотермальная энергия	29 200 000	11 869	114
Низкопотенциальное тепло	563	194	53
Итого	32 293 089	24 221	320

- *Валовый потенциал ВИЭ – количество энергии, заключенное в данном виде энергоресурса, при условии ее полного полезного использования в России.*
- *Технический потенциал ВИЭ – часть валового потенциала, которая может быть эффективно использована с применением известных технологий, принимая во внимание социальные и экологические факторы в России.*
- *Экономический потенциал ВИЭ – часть технического потенциала, использование которой экономически оправдано при существующем уровне развития технологий применения возобновляемой энергетики в России оценен в 320 млн т у.т., что почти в 2,4 раза превышает фактический объем потребления электрической энергии в России в 2021 году.*

При всех достоинствах солнечных ЭС, ветровых ЭС и малых ГЭС они имеют либо очень незначительную гарантированную мощность (мощность, генерация которой гарантируется в любой момент времени), либо не имеют ее вовсе. Вопрос гарантированного электроснабжения потребителей от электростанций ВИЭ не может быть решен без применения дополнительных мер: аккумуляторов, резервных источников, средств регулирования (Рисунок 4.10) [1].

БиоЭС лишены этих недостатков и относятся к надежным источникам энергоснабжения, самый высокий КУИМ среди не только ВИЭ, но и выше традиционных тепловых электростанций и составляет 67% [1]. Это обеспечивает им большую долю в выработанной энергии (Рисунок 4.11). С учетом большого, экономически оправданного потенциала биомассы и доступности технологий в России, БиоЭС выглядят еще более перспективно.

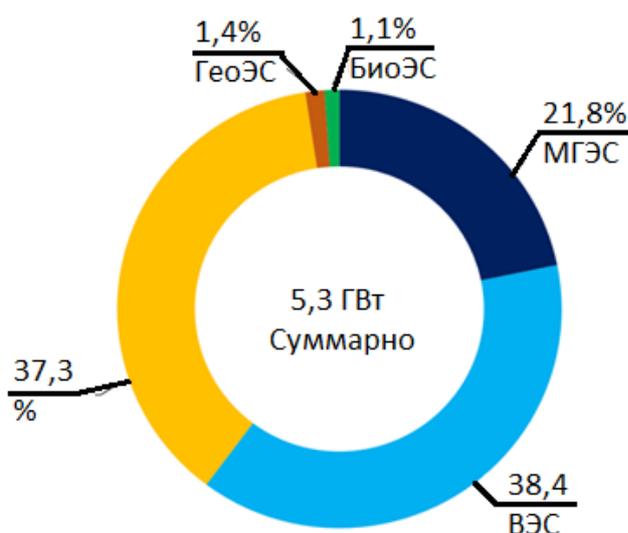


Рисунок 4.10 – Структура установленной электрической мощности ВИЭ в России (на 1 января 2022 г.) [148]

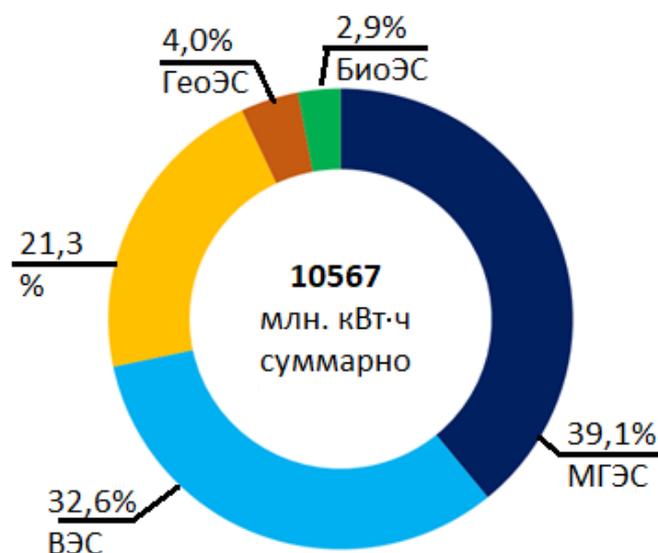


Рисунок 4.11 – Структура выработки электрической энергии электростанциями ВИЭ в России в 2021 году [148]

Важно, чтобы оборудование, использованное при строительстве новых ВИЭ разрабатывалось и производилось в России. Что касается теплотехнического оборудования для БиоЭС то его производство традиционно не представляет сложности для отечественной промышленности, в том числе могут более массово внедряться котлы, в которых использованы наработки из настоящего исследования, в том числе вихревые топки «Торнадо» и котельно- вспомогательное оборудования.

4.4 Перспективы низкотемпературного вихревого сжигания в энергетике

На основе полученного при строительстве котлов на лузге опыта, возможно создание более экологически и экономически эффективных схем организации топочных процессов и для традиционных энергетических твердых топлив, причем низкотемпературных, без возгонки и плавления золы, со ступенчатой подачей дутья и дожиганием выхлопа. При этом снижение температуры в соответствии с законом Аррениуса связано со значительным снижением скорости выгорания топлива. К этому же ведет замедление горения из-за организации стадийного сжигания при ступенчатой подаче дутья и топлива. Соответственно, для твердого топлива требуется увеличенная поверхность горения, и поэтому в топке необходимо удерживать большую массу топлива и коксозольного остатка, что и было реализовано в разработанных низкотемпературных ВТ «Торнадо» [151].

В топках «Торнадо» используются вихри с горизонтальной или вертикальной осью, а также радиальные топки с двухсторонним выходом, дающие повышение мощности, сдвоенные дубль топки с повышенной площадью экранирования, требуемой для шлакующих топлив. Реализующие разработанную технологию работающие в промышленной теплоэнергетике котлы позволили уверенно продвинуться по пути совершенствования котельно-топочного оборудования и обосновать инновационную технологию «Торнадо» [101]. Применение разработанных и обоснованных принципов в крупной энергетике может значительно повысить уровень эффективности и экологические характеристики ТЭЦ. Специфика аэродинамики «Торнадо», дожигание выхлопа и умеренные скорости в соплах дают простоту управления котлом как с одной горелкой, но с загруженностью топок частицами, изотермичностью и без износа экранов.

Рассмотрим некоторые из предлагаемых схем организации камерного сжигания твердого топлива. Схема с вертикальной осью вращения вихря (Рисунок 4.12) выполняется согласно [152].

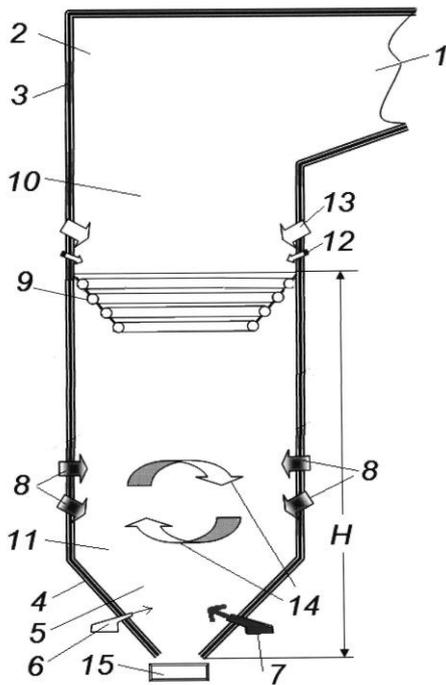


Рисунок 4.12 – Схема топки
«Торнадо»

Кратко, котел 1 с камерной топкой 2, образованной топочными экранами 3, имеет установленные на наклонных экранах 4 холодной воронки 5 сопла 6 и 7 нижнего дутья и тангенциально направленные к оси топки 2 основные горелки 8, расположенные ярусами. Топка на требуемой высоте H разделена выполненным из труб в виде газоплотной воронки 9 пережимом на камеру 10 дожигания и расположенную ниже камеру 11 сгорания. В камере 10 дожигания установлены сопла 12 подачи дожигающего дутья и/или горелки 13 подачи высокорекреационного топлива, ориентированные тангенциально и встречно движению вихря 14, обеспечивающие экологически эффективное дожигание выхлопа и регулирование температуры перегрева пара [101, 152].

Под холодной воронкой 5 расположена дожигающая провал и охлаждающая шлак колосниковая решетка 15, обеспечивающая применение взрывобезопасного укрупненного помола и выгрузку глубоко выжженного, охлажденного до $250...150^{\circ}\text{C}$ шлака, в пригодном для обращения виде. Схема даёт добавку $10...20\%$ теплосъёма экраном 9 и пригодна для реконструкции имеющихся котлов, в том числе газомазутных и сжигающих антрациты с жидким шлаком, на низкотемпературное сжигание. При этом необходима реконструкция холодной воронки 5 с использованием круто наклонных экранов 4 по схеме (Рисунок 4.12).

Зона активного горения расположена ниже воронки 9, включает холодную воронку 5 и может иметь значительно больший, в сравнении с НТВ, объем, в котором низкотемпературно сгорает топливо с высокоэффективной отдачей выделяющегося тепла к технически чистым топочным экранам. Частицы топлива и золы удерживаются от выноса воронкой 9 пережима за счет ускорения вращения вихря и его очистки центробежными силами при выходе потока в сужение. Снизу они

удерживаются в вихре от провала за счет восходящих по экранам 4 потоков нижнего дутья из сопел 6 и 7. При этом встречно-смещенная установка сопел 6 и 7 обеспечивает взаимное проникновение струй с их последующим раскрытием на экранах 4 [152]. В итоге витающие частицы имеют двухстороннее удержание и вращаются, сгорая вблизи экранов, без перегрева объема топки и недожога с уносом и провалом. Топка работает как одна горелка даже при неравномерном распределении топливо-воздух по горелкам с простым управлением.

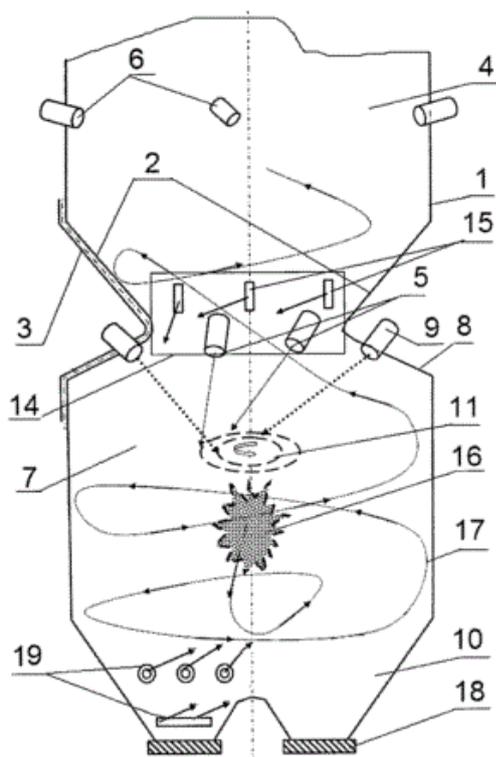


Рисунок 4.13 – Схема топки
«Торнадо»

Вторая схема (Рисунок 4.13) [153]. ВТ 1 разделена двухсторонним пережимом 2, который образован отгибкой боковых экранов 3 на камеру дожигания 4 с дополнительными горелками нижнего 5 и верхнего 6 ярусов и расположенную под ней камеру сгорания 7. Камера сгорания 7 имеет установленные с наклоном вниз на нижних гранях пережима 8 основные горелки 9 и выполнена с холодной воронкой 10, причем горелки 9 установлены тангенциально - по касательной к условной окружности 11, расположенной в камере сгорания 7.

Выделение вихревой камеры сгорания и создание в ее объеме высокотемпературного

ядра горения и раскаленного периферийного вихря обеспечивает:

- повышение экономичности – за счет зажигания и дальнейшего интенсивного выгорания топливо-воздушных струй в вихревой камере сгорания;
- расширение диапазона регулирования нагрузки за счет надежного воспламенения, удержания горящих частиц под пережимом и стабильного горения даже при малой нагрузке котла;

- возможность вовлечения в топливный баланс шламов и углесодержащих отходов с подачей их в виде водо-угольного топлива (ВУТ), так как высокотемпературное ядро горения основного топлива с омыванием периферийным вихрем корней их факелов создает условия для интенсивной сушки, воспламенения и стабильного горения низкокалорийного ВУТ;
- возможность перевода газомазутных котлов с жидкого и газообразного топлива на уголь в виде ВУТ.

При работе котла на угле основная доля угля подается через горелки 6 верхнего яруса. Камера сгорания 7 работает как стабилизатор горения и позволяет иметь низкую нагрузку топки и котла. Подача угольной пыли с первичным дутьем через основные горелки 9 по касательной к условной окружности 11, расположенной в камере сгорания 7, создает в этом малом объеме зону соударения факелов и формирует высокотемпературное ядро горения 16 и раскаленный горячий поток, движущийся вниз и поднимающийся далее по стенкам камеры сгорания 7 вверх в виде периферийного вихря 17. Этот периферийный вихрь 17 омывает корни факелов, устья основных 9 и дополнительных 5 горелок нижнего яруса, инициирует интенсивное зажигание их факелов. Наиболее крупные частицы могут выпадать из вихревого потока вниз. Тогда они возвращаются в вихрь струями, которые истекают через сопла нижнего дутья 19 и перекрывают сечение холодной воронки. Провалившиеся частицы догорают на дожигательной колосниковой решетке 18, расположенной в устье холодной воронки 10 [153].

Третья из предлагаемых схем (Рисунок 4.14) выполняется согласно [93] и с элементами по другим патентам в виде топки радиального типа с горизонтальной осью вращения вихря, меньшей его диаметра. Она, как предыдущие схемы, может использоваться не только для создания новых, но и для реконструкции газомазутных котлов и котлов с удалением шлака в жидком виде с их переводом на низкотемпературное сжигание. Так как котлы становятся более универсальными по кругу применяемых топлив, схемы пригодны и для перевода котлов на местные и

на нерасчетные топлива. Согласно исследованиям и опыту применения топки радиального типа более эффективны, так как в них лучше удерживаются частицы.

Котел 1 (Рисунок 4.14) имеет горелочные устройства 2, сопла вторичного дутья 3, пароперегреватель 4, конвективный газоход 5 с поверхностями 6 нагрева, системы 7 удаления шлака и камерную топку 8, образованную топочными экранами 9. Камерная топка 8 разделена разделительным экраном 10 с газоотводящим окном 11 на камеру дожигания 12 и вихревую топку 13. Введение дополнительного разделительного экрана 10 с выполненным разводкой труб экрана газоотводящим окном 11 заметно, в 1,5...4,8 раз, увеличивает поверхность топочных экранов, их теплосъем и обеспечивает низкотемпературный топочный процесс [93, 101].

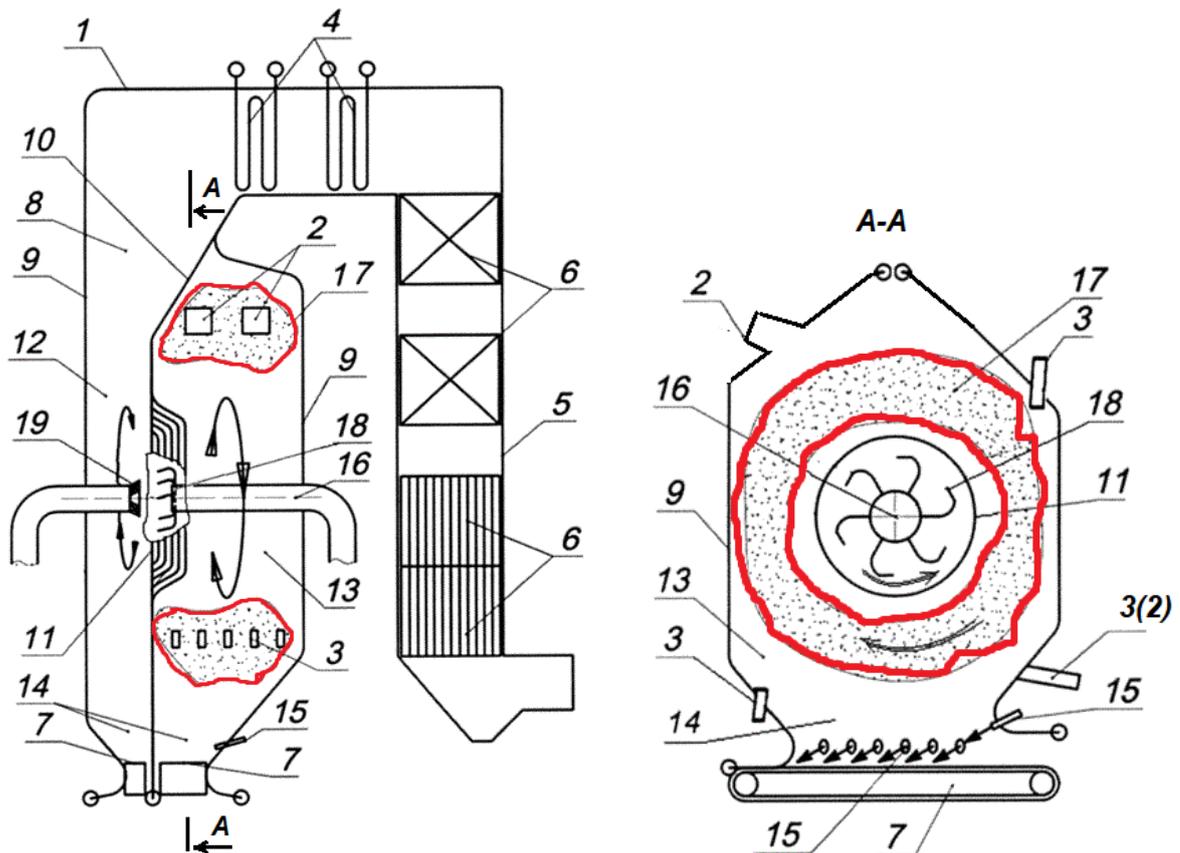


Рисунок 4.14 – Схема котла с вихревой топкой «Торнадо» радиального типа

ВТ 13 может примыкать к любой стороне камерной топки 8, например, к заднему топочному экрану, как показано на рисунке 4.14, или к фронтovому, так к ней проще подводить топливо и дутье и удобнее обслуживать. ВТ 13 может компоноваться разными способами, например, по продольной оси котла, с двумя

разделительными экранами 10 и двумя газоотводящими окнами 11, образуя Т-образную компоновку с двумя конвективными газоходами 5, которые обеспечивают простое, экономичное газовое регулирование перегрева пара.

Над системами 7 удаления шлака имеется холодная воронка 14 с дополнительными соплами 15 вторичного дутья, направленными по ходу вращения вихря и с наклоном на подвижное дожигающее колосниковое полотно 7. Это дутье выжигает горючие из шлака, охлаждает шлак, и он готов для отгрузки. Благодаря низкотемпературному режиму и хорошему удержанию частиц с выжиганием горючих и дожиганием крупных частиц в системе удаления 7 шлака в котле 1 можно использовать топлива с экономичным и взрывобезопасным укрупненным помолом, в том числе дешевые местные угли и измельченные древесные и другие отходы.

За счет тангенциальной подачи дутья в вихревой топке 13 вокруг горизонтальной оси 16 формируется вращающееся и интенсивно перемешивающееся, имеющее форму тора заполненного частицами вихревое образование 17 – вихрь. Вращающийся поток при входе в ГОО 11 сжимается с резким увеличением скорости вращения и центробежных сил, обеспечивая очистку уходящего потока газов от частиц с их отбрасыванием к периферии. Топливо надежно удерживается и преимущественно сгорает в вихревом образовании 17 в потоке частиц золы при некотором недостатке кислорода с низкой эмиссией NO_x . Схема топочного процесса подобна технологии циркулирующего кипящего слоя.

На выходе из газоотводящего окна 11 установлены сопла 18 дожигающего дутья и/или вихревые горелки 19, подключенные к трактам подачи высокореакционного топлива и дожигающего дутья, которые обеспечивают экономичное и экологически эффективное дожигание выхлопа топки.

Дожигание провала, нерешенное в схемах ВИР и НТВ, причем с содержанием горючих в шлаке ниже 6%, удовлетворяющее директивам ЕС, охлажденного до температуры ниже 200°C, здесь надежно обеспечивается (см. рисунок 1.16).

Таким образом, использование предлагаемых технических решений интенсифицирует горение и теплообмен, принципиально меняя аэродинамику топки и общую картину процесса, дает инновационную технологию, комплексно решающую проблемы организации безшлаковочного, экономически и экологически эффективного топочного процесса.

Заполнение вихревой камеры сгорания частицами золы и низкотемпературный режим приближают технологию «Торнадо» к топочным процессам в циркулирующем кипящем слое с сохранением преимуществ пылеугольного сжигания.

Предлагаемая технология имеет высокий потенциал для развития в промышленной энергетике в разных модификациях: однокамерные с одним и двумя газоотводящими окнами, двухкамерные – дубль топки и другие вихревые топки радиального типа с горизонтальной осью вихря, подробно исследованные на основе многочисленных успешных внедрений технологии в котлах промышленной теплоэнергетики и мини ТЭЦ при простых схемах управления.

Выводы по четвертой главе

1. Опыт промышленного применения показал, что предложенные низкотемпературные ВТ «Торнадо» являются высокоэффективной научно-технической разработкой, позволяющей организовать сжигание лузги подсолнечника без критического формирования натрубных отложений, препятствующих работе котла.
2. Технические решения запатентованы. С их использованием для сжигания лузги поставлено и реконструировано компанией «ПроЭнергоМаш» более 50 котлов.
3. Разработаны и прошли промышленные испытания образцы специализированного КВО для установок на лузге. В том числе устройства выгрузки золы и шлака, устройства очистки поверхностей нагрева и уходящих дымовых газов.
4. Работа изготовленных котельных установок с ВТ при работе на лузге и газе характеризуется выбросами вредных веществ ниже нормативных, $\text{NO}_x < 300 \text{ мг/м}^3$, твердых частиц $< 20 \text{ мг/м}^3$.
5. Для расширения утилизации отходов и полезного использования вырабатываемой энергии предложен теплогенератор для нагрева воздуха.

6. На сегодняшний день установленная мощность изготовленных по технологии «Торнадо» котлов позволяет утилизировать 17,8 % от вырабатываемой в стране лузги, и эта доля увеличивается, что говорит о высокой востребованности разработанной технологии и одновременно большой емкости рынка.
7. Внедрение котлов на лузге обеспечило ресурсосбережение 357 тыс.т.у.т./год, снижение выбросов золы на 140 тыс.т./год за счёт замещения угля и выработку тепла с экономическим эффектом $\mathcal{E}=4,86$ млрд.руб./год.
8. БиоЭС с разработанными котлами с топками «Торнадо» на лузге и других горючих растительных отходах могут увеличить долю ВИЭ в стране.
9. Предлагаемая технология имеет высокий потенциал для развития и внедрения на мощных твердотопливных котлах ТЭС, работающих на традиционных топливах. Возможно проведение реконструкций существующих энергетических котлов с переводом с ЖШУ на низкотемпературное сжигание, со снижением шлакования, а также перевод с жидкого топлива на твердое и на непроектные виды топлив на основе разработанной технологии НТВС «Торнадо».

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. Опытно-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 ($\alpha_t = 1,15...1,2$), 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 выработку тепла с экономическим эффектом $\mathcal{E}=4,86$ млрд.руб./год.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

A^r – зольность топлива, %

W_i^r – влажность топлива, %

V^{daf} – выход летучих, %

α – избыток воздуха (коэффициент теплоотдачи)

B^p – расход топлива, расчётный, кг/с

D – паропроизводительность котла, кг/с или т/час

δ – размер частиц, м

q_4 – механический недожог топки, %

Q – теплота, кДж/кг

ρ , – плотность среды, газа, жидкости и частиц, кг/м³

ϑ – температура продуктов сгорания, °С

T – температура, К

w – скорость газа, м/с

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

ВТ – вихревая топка

ГОО – газоотводящее окно

КВО – котельно-вспомогательное оборудование

КДО – кородревесные отходы

КС, ЦКС – кипящий и циркулирующий кипящий

МЭЗ – маслоэкстракционный завод

НПР – топка с наклонно переталкивающей колосниковой решеткой

НТВС – низкотемпературное вихревое сжигание

ЭУ – энергетическая установка

ТГК – территориальная генерирующая компания

т.у.т. – тонн условного топлива (топлива с теплотой сгорания 7 Гкал/т).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российское энергетическое агентство Минэнерго России. Возобновляемая энергетика в России и мире / РЭО Минэнерго России – М.: Российское энергетическое агентство, 2022. – 105 с.
2. Антонов, Н. В. Развитие зеленой энергетики в России и за рубежом достижения и перспективы / Н. В. Антонов, М. Ю. Евдокимов, В. А. Шилин. - (Цифры и факты). - Текст : непосредственный // Энергосбережение. – 2020. – № 7. – С. 62-68.
3. Бутузов, В. А. Российская возобновляемая энергетика. Достижения и перспективы // Энергосбережение. – 2022. – № 4. – С. 52-57.
4. Никишов, В. Д. Комплексное использование древесины / В. Д. Никишов. – Москва : Лесная промышленность, 1985. – 262 с.
5. Панцхава, Е. С. Электростанции на биотопливе (биомассе) : монография / Е. С. Панцхава. – М.: Изд-во Русайнс, 2016. – 340 с.
6. Голубев, В. А. Оценка доли зеленой энергии при сжигании биомассы / В. А. Голубев, Е. М. Пузырев, М. Е. Пузырев // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 39-41.
7. Тепловой расчет котельных агрегатов [Текст] : (Нормат. метод) / Под ред. д-ра техн. наук Н. В. Кузнецова [и др.] ; – 2-е изд., перераб. – Москва : Энергия, 1973. – 295 с.
8. Голубев, В.А. Обоснование и совершенствование способов энергетического использования растительных отходов : дис. канд. техн. наук : 01.04.14 / Голубев Вадим Алексеевич ; АлтГТУ. – Барнаул, 2014. – 157 с.
9. Виллу, В. Справочник потребителя биотоплива / В. Виллу, К. Юло, М. Петтер, П. Тыну, С. Сулев – Таллин: Изд-во Таллиннского технич. ун-та, 2005. – 184 с.
10. Вос, Д. Передовой опыт в использовании энергии биомассы. В 2-х частях / Д. Вос. – Минск: РУП Белэнергосбережение, 2006. – 198 с.

11. Головков, С. И. Энергетическое использование древесных отходов / С. И. Головков, И. Ф. Коперин, В. И. Найденов. – Москва : Лесная промышленность, 1987. – 224 с.
12. Молчанов, М. Д. ЗЕЛЕННЫЕ ТАРИФЫ / М. Д. Молчанов – Текст : электронный // Вопросы российской юстиции. – 2022. – №22. – С. 346-358 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zelenye-tarify> (дата обращения: 17.05.2024).
13. Баскаков, А. П. Котлы и топки с кипящим слоем / А. П. Баскаков, В. В. Мацнев, И. В. Распопов. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 349 с.
14. Кришер, О. Научные основы техники сушки [Текст] / Перевод с нем. канд. техн. наук Д. М. Левина ; Под ред. д-ра техн. наук проф. А. С. Гинзбурга ; [Предисл. А. С. Гинзбурга и Д. М. Левина]. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1961. – 539 с.
15. Котлы малой и средней мощности и топочные устройства. Отраслевой каталог 15-83. / НИИ экономики, орг. пр-ва и техн.-экон. информ. в энерг. Машиностроении – М.: НИИЭинформэнергомаш, 1983. – 226 с.
16. Щуренко, В. П. Разработка вихревых низкотемпературных топок и технологических схем огневой утилизации растительных отходов : специальность 01.04.14 «теплофизика и теоретическая теплотехника» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. / Щуренко Валерий Петрович ; АлтГТУ. – Барнаул, 2004. – 147 с.
17. Карапетов, А. Э. Обзор технологий слоевого сжигания биотоплива/ А. Э. Карапетов // ЛесПромИнформ. – 2016. – № 1. – С. 130-139.
18. Тасс, Е. О. Опыт пуска биотопливного котла с кипящим слоем / Тасс Е.О., Лейкам А.Э., Шестаков Н.С., и др. // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла : сборник докладов V Международной научно-технической конференции / ОАО «ВТИ» ; под общ. Ред. Г. А. Рябова. – Москва : ВТИ, 2020. – С. 68-75.
19. Любов, В.К. Совершенствование топливно-энергетического комплекса путем повышения эффективности сжигания топлив и вовлечения в энергетический баланс отходов переработки биомассы и местного топлива : автореферат дис. ...

доктора технических наук : 05.14.04 / Любов Виктор Константинович ; Череповец. гос. ун-т. - Архангельск, 2004. - 43 с.

20. Вирясов, Д. М. Псевдоожигание и сжигание биотоплива в многокомпонентных слоях : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.14.01 / Вирясов Дмитрий Михайлович ; Объед. ин-т высок. температур РАН. - Москва, 2013. - 17 с.

21. Рябов, Г. А. Научное обоснование использования технологии сжигания твёрдых топлив в циркулирующем кипящем слое : диссертация ... доктора технических наук : 05.14.14 / Рябов Георгий Александрович ; Всерос. теплотехн. науч.-исслед. ин-т ВТИ. - Москва, 2016. - 291 с.

22. Литун, Д. С. Разработка метода теплового расчёта топок котлов с кипящим слоем для сжигания биомассы на ТЭС : диссертация ... кандидата технических наук : 05.14.14 / Литун Дмитрий Степанович ; Всерос. теплотехн. науч.-исслед. ин-т ВТИ. - Москва, 2017. - 199 с.

23. Долгушин, И.А. Исследование и совершенствование схемы ТЭС с котлом ЦКС для повышения эффективности и улучшения экологических показателей : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.14.14 / Долгушин Илья Александрович ; Нац. исслед. ун-т МЭИ. - Москва, 2014. - 20 с.

24. Пузырев, М. Е. Моделирование вихревых топочных устройств / М. Е. Пузырев, Е. Б. Жуков // Сборник трудов 4-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь". Секция «Энергетика». Подсекция «КиРС», (Барнаул, 26-27 Апреля, 2007 г.) – Барнаул: АлтГТУ, 2007.

25. Голубев, В. А. Применение математического моделирования при разработке вихревых топок «Торнадо» и переводе энергетических котлов на совместное сжигание низкосортных топлив / В. А. Голубев, К. С. Афанасьев, М. Е. Пузырев, В. И. Мурко, А. В. Гиль // VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике: Екатеринбург, 12-14 ноября 2013 г.

26. Пузырев, Е. М. Технология сжигания кородревесных отходов и низкосортного угля в НТВ-топках энергетических котлов / Е. М. Пузырев, Е. Б. Жуков, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев, К. С. Афанасьев // Сборник докладов всероссийской н.п.к

с междунар. уч. «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики», 2008. – Барнаул: из-во Алтайский дом печати, 2008. – С. 296-301.

27. Патент № 198069 Российская Федерация, МПК F23C 5/00 (2006.01). 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.

28. Патент № 197085 Российская Федерация, МПК F23C 5/32(2006.01). Низкотемпературная вихревая топка / Пузырев М. Е., Пузырёв Е. М., Жуков Е. Б., Тиханов М. В. – № 2020100775 : заявл. 14.01.2020 : опубл. 30.03.2020. – 7 с.

29. Васильев, В.В. Анализ опыта сжигания КДО в топках пылеугольных энергетических котлов / В. В. Васильев, М. Н. Назаров, П. Ю. Гребеньков // Горение твердого топлива. / Тез. док. VIII Всероссийской конференции. ИТ СО РАН, Новосибирск, 2012. – С. 40.

30. Сосин, Д. В. Опыт сжигания лузги подсолнечника в пылеугольных котлах Кумертауской ТЭЦ / Д. В. Сосин, Д. С. Литун, И. А. Рыжий, А. В. Штегман // Теплоэнергетика. – 2020. – №. 1. – С. 15-22.

31. Рундыгин, Ю. А. Низкотемпературное сжигание сланцев / Ю. А. Рундыгин. – Ленинград : Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние, 1987. – 103 с.

32. Паровые котлы на биотопливе. АО «Завод котельного оборудования» // Промышленные и отопительные котельные и мини - ТЭЦ. №5 (56), 2019. С. 3

33. Natunen, M. Co-Firing of REF and Biofuels in a CFB With Advanced Steam Parameters and a High Plant Efficiency in Igelsta Plant / M. Natunen // Power-Gen Europe, Sweden 2010, 24 с.

34. Stromberg, M. Advanced steam parameters in large scale CFB application operating on REF and biofuels – background and experiences / M. Stromberg // Soderenergi AB, Sweden, 2011

35. Пузырев, Е.М. Перспективы применения котлов с топками циркуляционного кипящего слоя в коммунальной энергетике / Е. М. Пузырев, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Новости теплоснабжения – 2016 – № 10. – С. 31-33.

36. Патент № 2675644 Российская Федерация, МПК F23C 10/10 (2006.01). Котел с циркулирующим слоем / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., Пузырев М. Е. – № 2017136769 : заявл. 18.10.2017 : опубл. 21.12.2018. – 13 с.
37. Патент № 107841 Российская Федерация, МПК F23C 99/00 (2006.01). Топка кипящего слоя / Пузырев Е. М., Голубев В. А., Пузырев М. Е. – № 2011112811 заявл. 01.04.11 : опубл. 27.08.11. – 12 с.
38. Пузырев, Е. М. Перспективы применения котлов с топками ЦКС-ВТ / Е. М. Пузырев, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Сборник докладов IX Всероссийская конференция Горение топлива: теория эксперимент, приложения. Новосибирск, 2015. – С. 112.
39. Пузырёв, Е. М. Перспективные схемы котлов с циркулирующим кипящим слоем / Е. М. Пузырёв, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев, И. В. Платов // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла [Текст]: сб. докл. / под общ. ред. д-ра техн. наук Г.А. Рябова // V Международная научно-техническая конференция. – М.: ОАО «ВТИ», 2020. – С. 31-33.
40. Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов [Текст] : приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 22 мая 2017 года N 242 (с изменениями на 18 января 2024 года).
41. Сельское хозяйство в России. 2023: Стат.сб. / Росстат – С 29 М., 2023. –103 с.
42. Хатнянский, В. И. История селекции подсолнечника в России на устойчивость к заразихе (обзор) / В. И. Хатнянский // Масличные культуры. – 2020. – № 3. – С. 147-153.
43. Волгоградская область подписала соглашение о реализации инвестпроекта стоимостью более 8 млрд рублей. – Текст : электронный // Администрация Волгоградской области: [официальный сайт]. – URL: <https://www.volgograd.ru/news/384750/> (дата обращения 10.03.2024).
44. Пузырев, Е. М. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив : диссертация

на соискание доктора технических наук : 01.04.14 / Пузырев Евгений Михайлович. – Барнаул, 2003. – 319 с.

45. Yang, W. An overview of inorganic particulate matter emission from coal/biomass/MSW combustion: Sampling and measurement, formation, distribution, inorganic composition and influencing factors / W. Yang, D. Pudasainee, R. Gupta, W. Li, B. Wang, L. Sun // Fuel Processing Technology. – 2020. – V. 213.

46. Пузырев, Е. М. Разработка топочных устройств и котлов производительностью 2,5–25 т/ч с вихревой топкой для сжигания лузги и растительных отходов. Отчет по НИР. Инв. №12-НИР / Е. М. Пузырев, А. Э. Лейкам, В. П. Щуренко – Барнаул: НИЦ ПО БЭМ, 1997.

47. О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду при размещении твердых коммунальных отходов IV класса опасности (малоопасные) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации [Текст] : постановление Правительства Российской Федерации от 29 июня 2018 года N 758.

48. Гельмгольц, Г. Основы вихревой теории / Г. Гельмгольц. – М.: ИКИ, 2002. – 82 с.

49. Мелешко, В. В. Динамика вихревых структур / В. В. Мелешко, М. Ю. Константинов – Киев: Наук. думка, 1993. – 280 с.

50. Алексеенко, С. В. Введение в теорию концентрированных вихрей / С. В. Алексеенко, П. А. Куйбин, В. Л. Окулов – Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, 2003. – 504 с.

51. Гольдштик, М. А. Вихревые потоки / М. А. Гольдштик – Новосибирск: Наука, 1981. – 366 с.

52. Кутателадзе, С. С. Аэродинамика и теплообмен в ограниченных вихревых потоках / С. С. Кутателадзе, Э. П. Волчков, В. И. Терехов – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1987. – 282 с.

53. Смутьский, И. И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах / И. И. Смутьский – Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1992. – 301 с.

54. Алексеенко, С. В. Закрученные потоки в технических приложениях (обзор) / С. В. Алексеенко, В. Л. Окулов // Теплофизика и аэромеханика. ~ 1996. – Т. 3, № 2. – С. 101-138.
55. Алексеенко, С. В. Применение электродиффузионного метода к измерениям в неоднородных потоках / С. В. Алексеенко, Д. М. Маркович // Электрохимия. – 1993. – Т. 29, № 1. – С. 17-20.
56. Алексеенко, С. В. Экспериментальное наблюдение взаимодействия вихревых нитей / С. В. Алексеенко, С. И. Шторк // Письма в Журн. эксперим. и теорет. физики. – 1994. – Т. 59, вып. 11. – С. 746-750.
57. Алексеенко, С. В. Бегущий распад вихря / С. В. Алексеенко, С. И. Шторк // Письма в Журн. техн. физики. – 1997. – Т. 23, вып. 22. – С. 24-28.
58. Alekseenko, S. V. Swirling flow large-scale structures in a combustor model / S. V. Alekseenko, S. I. Shtork // Russ. J. Eng. Thermophys. 1992. – Vol. 2, N 4. – P. 231-266.
59. Лихачева, Г. Н. Перспективы использования вихревых топочных устройств для сжигания низкосортных топлив / Г. Н. Лихачева // Ползуновский вестник №1, Алт.гос.тех.ун-т им.И.И Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. – С.131-132.
60. Кнорре, Г. Ф. Топочные процессы / Г. Ф. Кнорре и др. – М–Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 328 с.
61. Кнорре, Г. Ф. Теория топочных процессов / Г. Ф. Кнорре и др. – М–Л.: Энергия, 1966. – 491 с.
62. Маршак, Ю. Л. Топочные устройства с вертикальными циклонными предтопками / Ю. Л. Маршак – М.: Энергия, 1966. – 320 с.
63. Саломатов, В. В. Научные основы создания и малозатратной реконструкции угольных парогенераторов под вихревую технологию сжигания / В. В. Саломатов // Известия ТПУ. Техника и технологии в энергетике. Том 32/4 №4, 2014. – С. 25-37.
64. Котлер, В. Р. Специальные топки энергетических котлов / В. Р. Котлер – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 104 с.

65. Скуратов, А. П. Топочные процессы при сжигании шлакующих канско-ачинских углей: монография / А. П. Скуратов, С. Г. Козлов – Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т, 2021. – 172 с.
66. Штым, А. Н. Котельные установки с циклонными предтопками: монография / А. Н. Штым, К. А. Штым, Е. Ю. Дорогов – Владивосток: Изд. дом ДВФУ, 2012. – 421 с.
67. Штым, А. Н. Аэродинамика циклонно-вихревых камер: монография / А. Н. Штым – Владивосток: ДВГУ, 1985. – 200 с.
68. Штым, К. А. Формирование осесимметричного закрученного потока в циклонно-вихревом предтопке мощностью 65 МВт / К. А. Штым, Т. А. Соловьёва, Е. Ю. Дорогов, Ю. Б. Гончаренко, Л. В. Кулагина // Журнал Сиб. Фед. Ун-т. Серия: Техника и технологии. 2022. – Т. 15. № 4. – С. 448-458.
69. Соловьёва, Т. А. Совершенствование процесса сжигания природного газа в котельных установках с циклонными предтопками : автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук / Соловьёва Татьяна Алексеевна ; ДВФУ-СФУ. – Красноярск, 2017. – 20 с.
70. Григорьев, К. А. Разработка и внедрение технологических решений, повышающих эффективность низкотемпературного вихревого сжигания топлива : дис. д-ра техн. наук: 05.14.14 / Григорьев Константин Анатольевич ; СПбГПУ. – Санкт-Петербург, 2010. – 227 с.
71. Григорьев, К. А. Опыт применения вихревой низкотемпературной технологии сжигания на котле БКЗ-220-100 / К. А. Григорьев, В. Е. Скудицкий, Р. Г. Аношин, Ф. Р. Валиев, В. В. Литвиненко // Энергетик. 2009. № 1. – С. 24–26.
72. Григорьев, К. А. Опыт низкотемпературного вихревого сжигания различных видов топлива в котле БКЗ-210-13,8 Кировской ТЭЦ-4 / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.В. Зыкин, Ю.А. Чирков, Р.Г. Аношин, В.В. Османов // Электрические станции. 2010. № 4. С. 9–13.
73. Рундыгин, Ю. А. Проблемы использования местных топливных ресурсов для энергообеспечения Северо-Западного региона / Ю. А. Рундыгин, К. А. Григорьев,

- В. Е. Скудицкий // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 1998. №4(12). С. 64–68.
74. Grigoryev, K. A. Low-Temperature Swirl Fuel Combustion: Development and Experience / K. A. Grigoryev, Yu. A. Roundyguine, V. E. Skuditskii, R. G. Anoshin, A. P. Paramonov, A. A. Trinchenko // Cleaner Combustion and Sustainable World.– Springer Berlin Heidelberg, 2013.– P. 999–1003.
75. Ковалев, А. П. Котельные агрегаты. Ч.1 [Текст] / А. П. Ковалев – М.-Л.: ГЭИ, 1948. – 140 с.
76. Гильде, Е. Э. Повышение эффективности работы котлов в результате применения системы нижнего дутья конструкции НПО ЦКТИ / Е. Э. Гильде, Н. С. Клепиков, Л. Н. Гусев, А. А. Шатиль, В. А. Илясов и др. // Теплоэнергетика, № 2, 2003. – С. 55-57.
77. Серант, Ф. А. Пылеугольные котлы с кольцевой топкой для крупных энергоблоков / Ф. А. Серант – Кемерово: ООО «Фортуна Принт» 2021. – 265 с.
78. Гупта, А. Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред – М.: Мир, 1987. – 588 с.
79. Howard, L. N. Fundamentals of the theory of rotating fluids / L. N. Howard // J/Appl. Mech, 1963. – Vol. 30. – P.481-485.
80. Lilley, D. G. Swirl Flows in Combustion / D. G. Lilley // AIAA Journal, 15, 8, August, 1977. – p. 1063.
81. Syred, N, Beer J.M. Combustion and Flame, 23, p. 143, 1974.
82. Frey, D. Stationary combustion nitrogen oxide control. / D. Frey // TRW coal combustor. 1987. New Louisiana. March 23-26, 1987. Radian Corporation Research Triangle Park NC.
83. Патент № 128697 Российская Федерация, МПК F23В 70/00 (2006.01). Вихревая топка с газоотводящим окном (варианты) / Пузырев Е. М., Голубев В. А. Пузырев М. Е. – № 2011147584 : заявл. 23.11.2011 : опубл. 27.05.2013. – 12 с.
84. Патент № 2591070 Российская Федерация, МПК F23В 30/00(2006.01). Твeрдотопливный котел с вихревой топкой / Пузырёв Е. М., Голубев В. А. Пузырёв М. Е. – № 2014131658 : заявл. 30.07.2014 : опубл. 10.07.2016. – 13 с.

85. Патент № 2627752 Российская Федерация, МПК F23C 3/00 (2006.01). Котел с двухкамерной вихревой топкой / Пузырёв Е. М., Афанасьев К. С., Голубев В. А., Пузырёв М. Е. – № 2015152387 : заявл. 24.12.2015 : опубл. 11.08.2017. – 11 с.
86. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус; Пер. Ю. Я. Косого. - Москва : Химия, 1981. - 616 с.
87. Hesslmann, G. Coal-over-coal reburn testing, modelling and plant feasibility / G. Hesslmann // Energy Technology Support Unit COAL R 1 41, Harwell, UK, 1997 – 55 pp.
88. Патент № 86277 Российская Федерация, МПК F23C 5/24 (2006.01). 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.
89. Пузырев, Е. М. Котлы с вихревыми топками «Торнадо» / Е. М. Пузырев, М. Е. Пузырев, К. С. Афанасьев, Г. А. Климов // Сборник докладов. «Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов» – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2010 – С. 469-478.
90. Пузырев, Е.М. Опыт применения котлов с вихревыми топками для утилизации растительных отходов / Е. М. Пузырев, М. А. Шарапов, А. М. Шарапов, В. П. Щуренко // Ползуновский вестник. – 2004. – №1 – С. 137-140.
91. Пузырёв, Е. М. Разработка технологии «Торнадо» и котлов для сжигания подсолнечной лузги и других сельскохозяйственных отходов / Е. М. Пузырёв, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ – 2019. – №5(56) – С. 18-20.
92. Голубев, В. А. Использование вихревых топок «Торнадо» в паровых котлах / В. А. Голубев, Е. М. Пузырев, М. Е. Пузырев // Сборник докладов V научно-практической конференции. «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы», Челябинск, 7-9 июня 2011 г. – Том III. – С. 107-117.
93. Патент № 2695877 Российская Федерация, МПК F23C 3/00(2006.01). Энергетический котел / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., Пузырев М. Е. – № 2018113201 : заявл. 11.04.2018 : опубл. 29.07.2019. – 14 с.

94. Патент № 2748363 Российская Федерация, МПК F23В 10/02 (2021.02). Котел с вихревым дожиганием / Пузырев М. Е., Пузырёв Е. М., Платов И. В. – № 2020135908 : заявл. 02.11.2020 : опубл. 24.05.2021. – 11 с.
95. Патент № 2627757 Российская Федерация, МПК F23С 10/12 (2006.01). Слоевой котел с вертикальной вихревой топкой / Пузырев Е. М., Пузырев М. Е., Голубев В. А. – № 2015149577 : заявл. 18.11.2015 : опубл. 11.08.2017. – 16 с.
96. Патент № 2573078 Российская Федерация, МПК F23С 5/24 (2006.01). Вихревая камерная топка / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., Пузырёв М. Е. – № 2014107891 : заявл. 28.02.14 : опубл. 20.01.2016. – 11 с.
97. Патент № 2552009 Российская Федерация, МПК F23С 10/00(2006.01). Механизированная слоевая топка / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., Пузырёв М. Е. – № 2013159350 : заявл. 30.12.2013 : опубл. 10.06.2015. – 8 с.
98. Пузырев, М. Е. Проектирование котельно-топочных устройств THE DESIGN OF THE BOILER AND COMBUSTION EQUIPMENT / М. Е. Пузырев, Е. М. Пузырев, Е. Б. Жуков // Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA. – 2016. – Issue 2. – pp 52-57.
99. Патент № 200824 Российская Федерация, МПК МПК F23С 10/08(2006.01). Котел с внутритопочными циклонами / Пузырев М. Е., Пузырёв Е. М., Голубев В. А. – № 2019129150 : заявл. 17.09.19 : опубл. 12.11.2020. – 11 с.
100. Zabetta, E. C. Foster wheeler experience with biomass and waste in CFBs / E. C. Zabetta, V. Barisic, K. Peltola, A. Hotta // in: 33rd Clear Conf, 2008, pp. 1-15.
101. Пузырёв, Е. М. Технология «Торнадо» для энергетических котлов / Е. М. Пузырёв, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Электрические станции – 2022. – № 6 – С. 10-16.
102. Циклонные топки / Л. Л. Калишевский, Б. Д. Кацнельсон, Г. Ф. Кнорре [и др.] ; Под общ. ред. Г. Ф. Кнорре и М. А. Наджарова. - Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1958. - 216 с.

103. Сабуров, Э. Н. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах / Э. Н. Сабуров, С. В. Карпов, С. И. Осташев; Под ред. Э. Н. Сабурова; Арханг. лесотехн. ин-т им. В. В. Куйбышева. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1989. – 273 с.
104. Смутьский, И. И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах / И. И. Смутьский ; отв. ред. И. Р. Шрейбер ; Российская академия наук, Сиб. отд-ние, Ин-т криосферы Земли. - Новосибирск : Наука : Сиб. изд. фирма, 1992. – 299 с.
105. Пузырев, М. Е. Котел с вихревой топкой для сжигания лузги подсолнечника / М. Е. Пузырев, Г. Н. Лихачева // Сборник докладов I международной н.п. конф. «Современные тенденции котлостроения», АлтГТУ. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. – 2017. – С. 67-71.
106. Demirbas, A. Combustion characteristics of different biomass fuels / Demirbas, A. // Progress in Energy and Combustion Science, 30 (2), 2004 – 219-230 pp.
107. Биргер, М. И. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др.; Под общ. ред. А. А. Русанова. - 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
108. Пузырев, Е. М. Разработка топочных устройств и профиля котлов для сжигания лузги. / Е. М. Пузырев. – Пояснительная записка НИЦ ПО БЭМ. – Барнаул 2001.
109. Пузырёв, Е. М. Разработка вихревых топок для энергетических котлов / Е. М. Пузырёв, М. Е. Пузырев, В. А. Голубев // Журнал Энергетик – 2017. – № 4 – С. 44-47.
110. Фурсов, И. Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов: учебное пособие / И. Д. Фурсов; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – 3-е изд. перераб. и доп. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2012. – 300 с.
111. Тааль, Х. П. Влияние температуры и среды на улетучивание соединений калия из золы эстонских горючих сланцев / Х. П. Тааль, А. Я. Махлапуу, И. П. Эпик // Труды Таллинского политехнического института, 1966, серия А, № 240, С. 45-53.
112. Отс, А. А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей [Текст] / А. А. Отс. - Москва : Энергия, 1977. - 312 с.

113. Piotrowski, A. Vorlesungsmanuskript : Werkstoffverwendung (Korrosion) / A. Piotrowski : Universität Essen, 1994.
114. Fernandez, M. J., Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion / M. J. Fernandez, J. E. Llorente, C. Garcia // Fuel, 84 (14-15), 2005, 1893-1900 pp.
115. Lackner, M. Handbook of Combustion / M. Lackner, F. Winter, A. K. Agarwal (eds.) // Vol.1: Fundamentals and Safety Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010 – 499 p.
116. Miles, T. R. Alkali Deposits Found in Biomass Power Plants, Research report NREL / T. R. Miles // volumes I and II, National Renewable Energy Laboratory, Oa-kridge, US, 1996.
117. Obernberger, I. Characterisation and formation of aerosols and fly ashes from fixed-bed biomass combustion / I. Obernberger, T. Brunner, M. Joller // Aerosols from Biomass Combustion, International Seminar in Zurich, organized on behalf of Interna-tional Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 32: Biomass Combustion and Cofiring and the Swiss Federal Office of Energy, 27 June 2001, Verenum, Switzerland, 2001.
118. Obernberger, I. Fly ash and aerosol formation in biomass combustion processes / I. Obernberger, T. Brunner // Aerosols in Biomass Combustion, (6), In Thermal Biomass Utilization Series, BIOS Bioenergy Systeme, Graz, Austria, 2001.
119. Bishop, R. J. The formation alkali-rich deposits by a high-chlorine coat / R. J. Bishop // J. Inst. Fuel» 1968, vol. 41, № 325, p. 51-66.
120. Werkelin, J. Ash Forming Matter and their Chemical Forms in Woody Biomass Fuels / J. Werkelin PhD thesis, bo Akademi University, 2008.
121. Ots, A. Oil Shale Fuel Combustion / A. Ots. – Tallinn: Tallina Raamatutrukikoda, 2006. – p. 833.
122. Ots, A. Mechanism of ash deposit formation, corrosion and sulphur capture by burning calcium and chlorine content fuels / A. Ots // VGB PowerTech, 81 (10), 2001. – p. 114-120.
123. Haiying, Qi. Cleaner Combustion and Sustainable World / Qi. Haiying – Tsinghua University Press, 2013.

124. Алехнович, А. Н. Зола и шлакование в пылеугольных котлах / А. Н. Алехнович. – Челябинск : Абрис-принт, 2016. – 796 с.
125. Пузырев, М. Е. Разработка паровых котлов для малой энергетики (тезисы) / М. Е. Пузырев, К. С. Афанасьев, В. А. Голубев, П. К. Сеначин // Сборник тезисов и докладов 67-научнотехнической конференции, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ. часть 2, 2009 –Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2009.
126. Пузырев, Е. М. Применение вихревых топок «Торнадо» для перевода котлов на использование растительных и кородревесных отходов / Е. М. Пузырев, К. С. Афанасьев, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев, М. В. Каширских, А. В. Лаптов, Е. Б. Жуков, Е. В. Красуцкий, И. С. Якимова // Сборник докладов V научно-практической конференции. Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы, Челябинск, 7-9 июня 2011 г. - В трёх томах. – Том I. – С. 236-248.
127. Бойко, Е. А. Котельные установки и парогенераторы : конструкц. характеристики энергет. котельных агрегатов : учеб. пособие / Е. А. Бойко, Т. И. Охорзина ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Краснояр. гос. техн. ун-т. - Красноярск : КГТУ, 2004 (Красноярск : ИПЦ КГТУ). – 228 с.
128. Методические указания по применению средств наружной очистки поверхностей нагрева паровых котлов : РД 34.27.104-92. – М.: ВТИ, 1992. – 23 с.
129. Маланов, М. Д. Эффективная очистка поверхностей нагрева котлоагрегатов от наружных отложений, как энергосберегающая технология / М. Д. Маланов // ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ВОДОПОДГОТОВКА 2007 № 3(47) – С. 36-37.
130. Делягин, Г. Н. Теплогенерирующие установки: Учеб. Для вузов / Г. Н. Делягин, В. И. Лебедев, Б. А. Пермяков. –М.: Стройиздат, 1986 – 559 с.
131. Звегинцев, В. И. Применение пневмоимпульсных технологий в теплоэнергетической промышленности / В. И. Звегинцев // Журнал Новости теплоснабжения № 175 (03), 2015.
132. Звегинцев, В. И. Опыт создания пневмо- импульсных систем очистки конвективных поверхностей нагрева котельных агрегатов / В. И. Звегинцев, И. И. Шабанов // Энергетик – 2009, № 1. – С. 21-24.

133. Кузнецов, Н. В. Рабочие процессы и вопросы усовершенствования конвективных поверхностей котельных агрегатов / Кузнецов Н. В. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1958. – 172 с.
134. Патент № 217448 Российская Федерация, МПК F28G 3/16 (2006.01). Устройство для обдувки поверхностей нагрева котла / Пузырев М. Е. – № 2022134392 : заявл. 27.12.22 : опубл. 03.04.2023. – 7 с.
135. Пузырев, М. Е. Применение вихревых топочных устройств для сжигания растительных отходов / М. Е. Пузырев // Сборник докладов XIV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь», Барнаул, 2017.
136. Брук, А. Д. Дымососы газоочистных сооружений / А. Д. Брук. – Москва : Машиностроение, 1984. – 145 с.
137. Голубев, В. А. Использование вихревых топок для сжигания низкосортных видов топлива в паровых котлах / В. А. Голубев, Е. М. Пузырев, М. Е. Пузырев // Новости теплоснабжения №2, 2015. – С. 29-33.
138. Патент № 195412 Российская Федерация, МПК F24H 3/00(2006.01). Теплогенератор : № 2019125247 / Пузырев М. Е., Пузырев Е. М. – заявл. 09.08.19 : опубл. 28.01.2020. – 8 с.
139. Пузырев, Е. М. 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.
140. Загрутдинов, Р. Ш. Новая технология окислительного вихревого пиролиза лузги подсолнечника и получение биоугля на стендовой установке / Р. Ш. Загрутдинов, Л. М. Литвиненко, М. С. Никишанин, А. П. Сеначин, П. К. Сеначин // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: Сб. тез. Док. XI Всерос. конф. с междунар. участием. Новосибирск, 9–12 ноября 2021 г. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2021. – С. 172.

141. Лурий, В. Г. Переработка твердых горючих отходов в энергоносители должна быть государственной задачей / В. Г. Лурий, А. Н. Панкратов, Г. Пянтковский // Энергосбережение и водоподготовка : научно-технический журнал / Академия промышленной экологии, Москва – 2008 №5 (55) – С. 2-6
142. Пузырев, М. Е. Использование соломы в качестве топлива в промышленной теплоэнергетике / М. Е. Пузырев, Г. Н. Лихачева, Е. Б. Жуков // Сборник статей НИЦ «Знание» по материалам XX международной заочной научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке» 1 часть, г. Харьков: НИЦ «Знание» – 2016. – С. 83-87.
143. Федеральная служба государственной статистики. Единая межведомственная информационно – статистическая система (ЕМИСС) деятельности [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://fedstat.ru/>.
144. Пузырев, Е. М. Роторные машины / Е. М. Пузырев, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Ползуновский вестник – 2013. – № 4/3 – С. 63-69.
145. Пузырев, Е. М. Роторно-винтовые двигатели / Е. М. Пузырев, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Известия ТПУ – 2014. – Т. 324. – № 10 – С. 38-45.
146. Пузырев, Е. М. Разработка машин роторного типа / Е. М. Пузырев, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Сборник докладов IX Всероссийская конференция Горение топлива: теория эксперимент, приложения. Новосибирск, 2015. – С. 113.
147. Патент № 2611117 Российская Федерация, МПК F01C 1/20 (2006.01). Роторная машина / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., Пузырёв М. Е. – № 2015111887 : заявл. 01.04.15 : опубл. 21.02.17. – 8 с.
148. Патент № 2564171 Российская Федерация, МПК F01C 3/02 (2006.01). Роторный механизм : № 2013143273 / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., Пузырёв М. Е. – заявл. 24.09.13 : опубл. 27.09.15. – 9 с.
149. Патент № 2564172 Российская Федерация, МПК F01C 3/02(2006.01). Роторная машина / Пузырёв Е. М., Пузырёв М. Е. – № 2013143340 : заявл. 27.09.13 : 24.09.15. – 14 с.

150. Патент № 2675639 Российская Федерация, МПК F01C 3/02 (2006.01). Роторно-винтовая машина / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., Пузырёв М. Е. – № 201710477 : заявл. 14.02.17 : опубл. 21.12.18. – 16 с.

151. Пузырёв, Е.М. Организация топочного процесса «Торнадо» в пылеугольных котлах / Е. М. Пузырёв, В. А. Голубев, М. Е. Пузырев // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла [Текст]: сб. докл. / под общ. ред. д-ра техн. наук Г.А. Рябова / V Междунар. н.т. конф. – М.: ОАО «ВТИ», 2020. – С. 85-86.

152. Патент № 2648314 Российская Федерация, МПК F23C 5/32 (2006.01). Котел с камерной топкой / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., Пузырёв М. Е. – № 2015155848 : заявл. 24.12.15 : опубл. 23.03.2018. – 11 с.

153. Патент № 2582722 Российская Федерация, МПК F23C 5/32(2006.01). Вихревая топка : № 2013136666 / Пузырёв Е. М., Голубев В. А., Пузырев М. Е. – заявл. 05.08.13 : опубл. 27.04.2016. – 11 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А «АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ»



ООО «ЗЭО «ПроЭнергоМаш»
656905, Алтайский край, г. Барнаул, пр-д Южный, 17а
ИНН 2221197359, КПП 222201001, ОГРН 1122225004846
Тел./факс +7 (385-2) 505-135, 505-576



Акт

об использовании результатов исследований,
изложенных в кандидатской диссертации Пузырева М.Е.
«РАЗРАБОТКА КОТЕЛЬНО-ТОПОЧНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ОГНЕВОЙ
УТИЛИЗАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ»

Разработанные диссертантом технологические схемы вихревых топков «Торнадо» и котельно-вспомогательного оборудования широко используются предприятием при конструировании паровых котлов.

За время работы на предприятии внедрен в производимую продукцию ряд технических и технологических решений автора, в том числе запатентованных:

1. RU 86277 U1, 27.08.2009. Вихревая топка.
2. RU 128697 U1, 27.05.2013. Вихревая топка с газоотводящим окном (варианты).
3. RU 2591070 C2, 10.07.2016. Твердотопливный котел с вихревой топкой.
4. RU 2627752 C2, 11.08.2017. Котел с двухкамерной вихревой топкой.
5. RU 2627757 C2, 11.08.2017. Слойовой котел с вертикальной вихревой топкой.
6. RU 195412 U1, 28.01.2020. Теплогенератор.
7. RU 2748363 C1, 24.05.2021. Котел с вихревым дожиганием.
8. RU 217448 U1, 03.04.2023. Устройство для обдувки поверхностей нагрева котла.

Изготовлено более 50 паровых котлов с вихревыми топками «Торнадо» и комплектов специального котельно-вспомогательного оборудования для сжигания лузги. Производимая продукция заслужила хорошую репутацию у эксплуатирующих организаций.

Главный конструктор

Е.А. Панасенков



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

«КОТЛОСЕРВИС»

403112, Волгоградская обл., г. Урюпинск, Юр. адрес: ул. Штеменко 47/3 ком.2. ИНН 3438006450 КПП 343801001 р/с: 40702810700080000139
в УФ ПАО КБ «Сельмашбанк» г. Урюпинск
к/с: 30101810518060000745 БИК 041806745

Утверждаю
Генеральный директор
ООО ПО «КОТЛОСЕРВИС»
Щебетнова Ю.А.
«05» сентября 2024 г.

Акт

Об использовании результатов диссертационного исследования
о внедрении.

Производственное объединение «Котлосервис» специализируется на монтаже, наладке и обслуживании паровых котлов, работающих на биотопливе.

За период с 2011 по 2023 годы нашим предприятием был смонтирован 21 паровой котел на луге с вихревыми топками «Торнадо». Начиная с первого объекта, разработка конструкторской документации для изготовления и монтажа котлов осуществлялась с участием Пузырева Михаила Евгеньевича. Он также принимал активное участие в проведении наладочных работ, осуществлял шефмонтаж и был незаменим в работе как консультант, по всем техническим и технологическим вопросам.

Заводом за этот период было внесено множество изменений в продукции, направленных на увеличение технических и эксплуатационных характеристик. Во время совместной плодотворной деятельности нашим предприятием был внедрен ряд технических решений, разработанных диссертантом:

- Устройства шуровки слоя и удаления шлака;
- Эжектирующие дозаторы топлива;
- Аппараты обдувочные;
- Верхняя подача топливо-воздушной смеси;

Внедренные решения и технические устройства успешно эксплуатируются в котельных многих маслозаводов и других предприятий.

Технический директор
ООО ПО «Котлосервис»

Варков А.Д.



Благо
природа роста и развития

Общество с ограниченной ответственностью «Благо-Барнаул»
ОГРН 1182225026191, ИНН 2223624670, КПП 222301001
Юридический адрес: 656922, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Тракторная д. 3 Д, пом. 1
Почтовый адрес: 656922, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Тракторная д. 3 Д, пом. 1
тел./факс 8 (3852) 53-63-10
Банковские реквизиты: р/с 40702810400000003797 в Сибирский филиал АО КБ "ФорБанк"
К/с 30101810101730000756, БИК 040173756
E-mail: blago@blago-spb.ru



Утверждаю:

Главный инженер

Сударев В.В.

« 7 » 03 2024 г.

Акт

Об использовании результатов кандидатской диссертации Пузырева М.Е.

В диссертационной работе Пузырева Михаила Евгеньевича «Разработка котельно-топочной техники для огневой утилизации растительных отходов» содержатся результаты натурных испытаний, которые были проведены на паровом котле Е-14-1,4 ОИ, работающего на лузге подсолнечника.

Паровой котел Е-14-1,4 ОИ был установлен в 2016 году на нашем предприятии из-за необходимости полной утилизации возросшего выхода лузги, увеличения потребления пара в производственных цехах, а также обеспечения резервирования нагрузки.

Весь комплекс пуско- и режимно-наладочных работ в котельной после монтажа парового котла Е-14-1,4 ОИ, выполнявшийся в период с 11.11 по 19.12 2016 г., проведен при непосредственном участии соискателя. Помимо базовой программы наладочных работ на котле проводились дополнительные исследования.

После завершения испытаний и ввода котлоагрегата в эксплуатацию максимальная паропроизводительность составила 15 т/час с расходом лузги до 2500 кг час. Вихревые топki легко растапливаются и обеспечивают стабильное несение нагрузки.

В отличие от ранее установленных котлов КЕ-10-14, выгорание лузги полное, опасность возгорания в зольных бункерах котла, экономайзеров и золоуловителя, а также в газоходах отсутствует. Котел Е-14-1,4 ОИ является основным в несении нагрузки. Его работа характеризуется надежностью, стабильностью горения и повышенным на 3,5-4,8% КПД за счет снижения потерь тепла от недожога и с уходящими газами.

Для предотвращения избыточной вибрации дымососа из-за налипания отложений золы разработана и внедрена система для периодической обдужки колеса.

Котел с вихревой топкой «Торнадо» исправно работает в режиме автоматического регулирования нагрузки и не требует внеплановых остановок для очистки, что повышает эффективность работы котельной.

Главный энергетик

В.П. Беспрозванный



ПРИЛОЖЕНИЕ Б «ПАТЕНТЫ»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 217448**Устройство для обдувки поверхностей нагрева котла**Патентообладатель: *Пузырев Михаил Евгеньевич (RU)*Автор(ы): *Пузырев Михаил Евгеньевич (RU)*Заявка № **2022134392**Приоритет полезной модели **27 декабря 2022 г.**Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **03 апреля 2023 г.**Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **27 декабря 2032 г.***Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Свидетельство 5018007761 от 01.04.2014 № 1154567
Юридический адрес: г. Москва, ул. Зубов Юрием Сергеевичем
Дата регистрации: 20.04.2022 по 27.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2748363

КОТЕЛ С ВИХРЕВЫМ ДОЖИГАНИЕМ

Патентообладатель: *Пузырев Михаил Евгеньевич (RU)*Авторы: *Пузырев Михаил Евгеньевич (RU), Пузырёв Евгений Михайлович (RU), Платов Иван Владимирович (RU)*

Заявка № 2020135908

Приоритет изобретения **02 ноября 2020 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **24 мая 2021 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **02 ноября 2040 г.**Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Изrael

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 200824

КОТЕЛ ЦКС С ВНУТРИТОПОЧНЫМИ ЦИКЛОНАМИ

Патентообладатель: *Пузырев Михаил Евгеньевич (RU)*

Авторы: *Пузырев Михаил Евгеньевич (RU), Пузырёв Евгений Михайлович (RU), Голубев Вадим Алексеевич (RU)*

Заявка № 2019129150

Приоритет полезной модели 17 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 12 ноября 2020 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 17 сентября 2029 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 198069

Твердотопливная низкотемпературная вихревая топкаПатентообладатель: *Пузырев Михаил Евгеньевич (RU)*

Авторы: *Пузырев Михаил Евгеньевич (RU), Пузырёв Евгений Михайлович (RU), Жуков Евгений Борисович (RU), Тиханов Михаил Васильевич (RU)*

Заявка № 2020100840

Приоритет полезной модели 14 января 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 17 июня 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 14 января 2030 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 195412

ТЕПЛОГЕНЕРАТОРПатентообладатель: *Пузырев Михаил Евгеньевич (RU)*

Авторы: *Пузырев Михаил Евгеньевич (RU),
Пузырев Евгений Михайлович (RU)*

Заявка № 2019125247

Приоритет полезной модели 09 августа 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 28 января 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 09 августа 2029 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2591070

ТВЕРДОТОПЛИВНЫЙ КОТЕЛ С ВИХРЕВОЙ ТОПКОЙ

Патентообладатель(ли): *Пузырёв Евгений Михайлович (RU)*

Автор(ы): *Пузырёв Евгений Михайлович (RU), Голубев Вадим Алексеевич (RU), Пузырёв Михаил Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2014131658

Приоритет изобретения **30 июля 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **20 июня 2016 г.**

Срок действия патента истекает **30 июля 2034 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 128697

ВИХРЕВАЯ ТОПКА С ГАЗОТВОДЯЩИМ ОКНОМ
(ВАРИАНТЫ)

Патентообладатель(ли): *Пузырев Евгений Михайлович (RU),
Голубев Вадим Алексеевич (RU), Пузырев Михаил Евгеньевич
(RU)*

Автор(ы): *Пузырев Евгений Михайлович (RU), Голубев Вадим
Алексеевич (RU), Пузырев Михаил Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2011147584

Приоритет полезной модели 23 ноября 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 27 мая 2013 г.

Срок действия патента истекает 23 ноября 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

