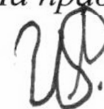


Акционерное общество
«ВСЕРОССИЙСКИЙ ДВАЖДЫ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ»
(АО «ВТИ»)

На правах рукописи



РЫЖИЙ Иван Алексеевич

**ОБОСНОВАНИЕ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ
ТОПОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕВЫХ
ПОВОРОТНЫХ ГОРЕЛОК НА ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ**

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Тугов Андрей Николаевич

Москва – 2025

Оглавление

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, ТЕРМИНОВ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
1.1 Состояние и перспективы производства электроэнергии на угольных ТЭС.....	15
1.1.1 Перспективы развития угольной отрасли в РФ.....	15
1.1.2 Производство электроэнергии из угля в мире.....	17
1.1.3 Состояние угольной энергетики РФ.....	18
1.1.4 Актуальные проблемы угольных ТЭС РФ.....	20
1.2 Обзор литературных источников по тематике управления топочным процессом с использованием поворотных горелок.....	21
1.2.1 Общие положения.....	21
1.2.2 Анализ конструкций и опыт использования поворотных горелок.....	23
1.2.3 Обзор технических решений по конструкциям поворотных механизмов и уплотнений.....	31
1.2.4 Основные требования к системе сжигания с поворотными горелками.....	33
Выводы по Главе 1.....	36
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ФАКЕЛА НА ТОПОЧНЫЙ РЕЖИМ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ УСТАНОВКИ НА ПРИМЕРЕ КОТЛА БКЗ-210-140 ТОМСКОЙ ГРЭС-2.....	39
2.1 Общие положения и предпосылки расчётных исследований.....	39
2.2 Описание используемых расчётных программ.....	40
2.2.1 Описание программы Boiler Designer.....	40
2.2.2 Описание программы ANSYS Fluent.....	44
2.3 Выбор объекта исследований. Описание котла БКЗ-210-140.....	46
2.4 Расчётные исследования влияния угла поворота горелки на режим работы котла в условиях изменения свойств угля.....	48
2.5 Оценка изменения допустимой температуры газов по условиям отсутствия шлакования в условиях колебания свойств угля.....	56

2.6 Проведение математического моделирования топочного процесса с регулированием положения факела по высоте в программе ANSYS Fluent.....	57
2.6.1 Построение расчётной сетки. Принятые допущения.....	57
2.6.2 Выбор математических моделей.....	61
2.6.2.1 Модель турбулентности.....	61
2.6.2.2 Модель радиационного теплообмена.....	61
2.6.2.3 Модель движения частиц угля.....	61
2.6.2.4 Модель выхода летучих.....	62
2.6.2.5 Модель горения.....	62
2.6.3 Сходимость задачи и валидация выбранной модели.....	63
2.6.4 Результаты численного моделирования.....	64
Выводы по Главе 2.....	75
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ВИХРЕВОЙ ПОВОРОТНОЙ ГОРЕЛКЕ.....	76
3.1 Общее описание конструкции горелки.....	76
3.2 Мероприятия по снижению выбросов оксидов азота NO _x	79
3.3 Система вертикального поворота горелки.....	81
3.4 Система горизонтального поворота.....	82
3.5 Технические решения по подвижному щиту горелки.....	84
3.6 Уплотнение каналов горелки и места стыка горелки с подвижным щитом.....	88
3.7 Газовая часть горелки.....	92
3.8 Модернизация отдельных узлов поворотной горелки в ходе опытного опробования.....	94
3.8.1 Модернизация конструкции рассекателей потока пыли.....	94
3.8.2 Модернизация системы вертикального поворота горелки.....	96
3.8.3 Модернизация крепления поворотной насадки горелки.....	98
3.8.4 Модернизация подвижного щита горелки.....	99
3.8.5 Изменение ориентации газового коллектора горелки.....	100
Выводы по Главе 3.....	101
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ПОВОРОТНОЙ ГОРЕЛКИ НА КОТЛЕ БКЗ-210-140 ТОМСКОЙ ГРЭС-2.....	103
4.1 Цели экспериментальных исследований.....	103
4.2 Опробование поворотной системы на холодном котле.....	104

4.3 Испытания горелки на работающем котле.....	106
4.3.1 Опыты по оценке работы горелки в горизонтальном положении.....	106
4.3.2 Описание опытов с поворотом горелки.....	109
Выводы по Главе 4.....	114
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТОПОЧНЫМ РЕЖИМОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ СЖИГАНИЯ С ПОВОРОТНЫМИ ГОРЕЛКАМИ.....	115
5.1 Общие принципы управления топочным режимом.....	115
5.2 Рекомендации по управлению системой сжигания с обычными горелками (при отсутствии возможности регулирования положения факела по высоте).....	118
5.3 Рекомендации по управлению системой сжигания с поворотными горелками (с возможностью регулирования положения факела по высоте).....	121
5.4 Перспективы развития и внедрения алгоритма управления топочным режимом с использованием поворотных горелок.....	123
Выводы по Главе 5.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Основные показатели работы котла БКЗ-210-140 до реконструкции по результатам экспресс-испытаний.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Расчёт шлакующих свойств базового угля.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты численного моделирования топочного процесса котла БКЗ-210-140 при работе котла со старыми горелками.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Описание устройства маслостанции и гидроцилиндров.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Перечень рекомендаций по изготовлению и монтажу вихревой поворотной горелки.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Оценка закономерностей шлакования насадки горелки входе испытаний.....	162

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, ТЕРМИНОВ

Сокращения:

БКЗ	– Барнаульский котельный завод
БСУ	– Бункер сырого угля
ВТИ	– Всероссийский теплотехнический институт
ВЭ	– Водяной экономайзер
ГВ	– Горячий воздух
ГРЭС	– Государственная районная электростанция
ГС	– Гидростанция
ГЦ	– Гидроцилиндр
ДИГ	– Дымосос инертных газов
ДНР	– Донецкая народная республика
ЗИО	– Завод имени Орджоникидзе
ЗУУ	– Золоулавливающая установка
ИИ	– Искусственный интеллект
КПД	– Коэффициент полезного действия
КРМ	– Котельный регулятор мощности
ЛИТС	– Лаборатория инновационных технологий подготовки и сжигания топлива
ЛНР	– Луганская народная республика
МВ	– Мельничный вентилятор
МЭИ	– Московский энергетический институт
МЭП	– Механизм электрический прямоходный
НИУ	– Национальный исследовательский университет
НТР	– Нормы теплового расчёта
ООО	– Общество с ограниченной ответственностью
ПГУ	– Парогазовая установка
ПК	– Паровой котёл

ПП	– Пароперегреватель
ПСУ	– Питатель сырого угля
РЗМ	– Регулятор загрузки мельницы
РФ	– Российская Федерация
СПВ	– Слабоподогретый воздух
СПП	– Система пылеприготовления
СССР	– Союз Советских Социалистических Республик
ТВП	– Трубчатый воздухоподогреватель
ТДМ	– Тягодутьевые механизмы
ТИ	– Тепловая изоляция
ТЭС	– Тепловая электростанция
ТЭЦ	– Теплоэлектроцентраль
УП	– Указатель положения
УСК	– Установка собственного конденсата
ШБМ	– Шаровая барабанная мельница
NO _x	– Оксиды азота

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация направлена на научную разработку рекомендаций по управлению топочным процессом с использованием вихревых поворотных горелок на пылеугольных энергетических котлах.

Актуальность темы исследования определяется основными направлениями модернизации и технического перевооружения теплоэнергетических предприятий энергетической отрасли народного хозяйства страны в аспекте целей и задач, сформулированных в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года.

В комплексных лонгитюдных исследованиях, проведенных в Акционерном обществе «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» доказано, что совершенствование работы по управлению топочным процессом является одним из важных резервов повышения эффективности тепловой электрической станции (ТЭС) (В.И. Бабий, Ю.Л. Маршак, Г.Г. Ольховский, Г.А. Рябов, А.Н. Тугов, А.Г. Тумановский, А.И. Федоров и др.).

В настоящее время уголь по-прежнему играет важнейшую роль в энергетике РФ.

Твёрдое топливо сжигается в энергетических котлах ТЭС во многих регионах. Параллельно развиваются технологии глубокой переработки углей на основе газификации с получением высокомаржинальных продуктов.

С учётом широких перспектив развития угольной отрасли в новых регионах России можно предположить, что уголь сохранит свои позиции в топливном балансе нашей энергетики в ближайшие десятилетия. Однако для этого следует решить ряд проблем использования угля на ТЭС. Одной из них является совершенствование технологий сжигания угля с целью снижения выбросов загрязняющих веществ, повышения эффективности и надёжности работы оборудования при меняющихся характеристиках используемого на

ТЭС топлива. Именно непостоянство характеристик поставляемого угля является основной причиной многих проблем угольных ТЭС, таких как:

сильные колебания температур газов на выходе из топки и трудности с поддержанием номинальных значений температуры перегретого пара;

интенсивное шлакование поверхностей нагрева;

снижение ресурса металла труб пароперегревателей при работе в условиях повышенных температур;

неоптимальная настройка топочного режима котла, рост потерь с недожогом, снижение КПД и др.

Масштабная реконструкция котла с изменением конфигурации поверхностей нагрева, схемы регулирования $t_{пе}$, организацией рециркуляции дымовых газов в топку и др. требует значительных капитальных затрат. В сравнении с приведёнными мероприятиями эффективным и малозатратным способом, способствующим комплексному решению указанных проблем пылеугольных котлов, является внедрение системы сжигания с регулированием положения факела по высоте топки, которое может осуществляться за счёт установки на котлах современных поворотных горелок.

Хотя данное решение известно давно, примеры внедрения подобных систем на практике фактически отсутствуют. Это связано не только со сложностью конструкции поворотных горелок, но и с недостаточной теоретической базой в исследовании влияния положения факела на показатели работы котла.

Таким образом, расчётные исследования системы сжигания с использованием поворотных горелок, апробация полученных результатов на промышленном котле и разработка рекомендаций по управлению топочным процессом с помощью поворотных горелок является **актуальной** задачей.

Результаты диссертационной работы соответствуют приоритетным направлениям научно-технологического развития Российской Федерации (Высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика) и перечню

важнейших наукоёмких критических технологий Российской Федерации (Технологии создания высокоэффективных систем генерации, распределения и хранения энергии (в том числе атомной)), определённых Указом Президента РФ № 529 от 18.06.2024 г. [49].

Степень научной разработанности темы диссертации. В области исследования особенностей топочного процесса энергетических котлов, а также совершенствования конструкций пылегазовых горелок и алгоритмов их управления наиболее значимые результаты получены известными специалистами: В. Р. Котлер, Д. М. Хзмалян, М. А. Изюмов, Я. А. Каган, В. А. Двойнишников, А. Н. Тугов, Г. А. Рябов, В. И. Бабий, В. М. Супранов, П. В. Росляков, Э. Х. Вербовецкий, Ю. Л. Маршак, Н. Г. Жмерик, Р. А. Петросян, С. И. Мочан, Л. Н. Гусев, А. К. Бокша, В. В. Богомолов, А. Д. Горбаненко, А. В. Штегман, К. А. Плешанов, В. А. Верещетин и другими отечественными исследователями.

Проведенный нами теоретический анализ литературы и специальных исследований показал, что в полной мере закономерности регулирования положения факела по высоте с использованием поворотных вихревых горелок остаются неизученными.

Объект исследования - разработанная поворотная вихревая горелка, установленная на котле Е-210-13,8КТ (БКЗ-210-140) Томской ГРЭС-2, предназначенная для сжигания каменного угля и природного газа.

Цель диссертационного исследования - обоснование рекомендаций по повышению эффективности управления топочным режимом и регулирования температуры перегретого пара на пылеугольных энергетических котлах с использованием поворотных горелок.

С учётом этого были поставлены **задачи диссертационного исследования:**

- 1) Провести расчётные исследования для определения пределов изменения температуры газов на выходе из топки в диапазоне колебаний проектных характеристик угля;

2) С использованием численного моделирования оценить возможный диапазон регулирования температуры газов на выходе из топки за счёт изменения положения факела по высоте;

3) Определить оптимальный рабочий диапазон изменения угла поворота горелок, при котором имеется возможность регулировать положение зоны максимальных температур в требуемом диапазоне изменения характеристик топлива;

4) Выполнить сопоставление результатов численного моделирования топочного процесса с данными расчёта по нормативному методу (нормы теплового расчёта котлов (НТР)) для оценки влияния положения факела на показатели работы котла;

5) Разработать основные технические решения по конструкции поворотной вихревой горелки для энергетического котла с применением мероприятий по снижению выбросов NO_x , возможностью реализации вертикального поворота горелки, обеспечением уплотнения устройства, возможности сжигания угольной пыли и природного газа;

6) Провести испытания на действующем котле с определением основных показателей работы горелки и получением зависимости изменения температуры перегретого пара от угла поворота горелки;

7) Разработать основные принципы, алгоритм и рекомендации по управлению топочным процессом с использованием поворотных горелок.

Диссертация выполнена по плану научной работы отделения парогенераторов и топочных устройств Акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (АО «ВТИ») в русле научной школы доктора технических наук Тугова А.Н.

Научная новизна исследования состоит в том, что в нем:

Предложен комплексный подход к расчёту влияния положения факела на топочный режим, совмещающий традиционный расчёт по нормативному методу с использованием параметра относительного расположения

максимума температур по высоте топки (параметра M) и моделирование топочного процесса в программе ANSYS Fluent с уточнением значения температуры газов на выходе из топки;

разработаны технические решения по вихревой поворотной пылегазовой горелке, позволяющей сжигать газ и уголь в широком диапазоне изменения проектных характеристик;

получена эмпирическая зависимость изменения температуры перегретого пара от величины угла поворота горелки;

разработаны принципы управления топочным режимом с использованием системы сжигания с поворотными горелками и алгоритм корректировки топочного режима.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что:

Результаты расчётных исследований по оценке влияния регулирования положения факела на топочный режим котла являются теоретической базой для разработки уточнённой методики определения параметра M в зависимости от угла поворота горелок;

Апробация системы сжигания с поворотными горелками позволяет осуществить теоретические исследования разнообразных аспектов влияния регулирования положения факела на работу котла (возможность снижения минимальной нагрузки пылегазового котла, возможность повышения эффективности сжигания угля и газа в переходных режимах и др.);

Разработанный алгоритм управления топочным режимом с использованием поворотных горелок является основой для создания индивидуальных алгоритмов для различных угольных котлов РФ с учётом их особенностей.

Практическая значимость работы:

Разработанные основные технические решения по конструкции вихревой поворотной горелки могут быть использованы для проектирования поворотных горелок с последующим их тиражированием на энергетических котлах РФ;

Обоснована возможность регулирования положения факела по высоте с использованием поворотных горелок, что позволяет существенно расширить диапазон сжигаемых на котле углей без ухудшения технико-экономических и экологических показателей работы котельного оборудования;

Разработанный алгоритм контроля топочного режима позволяет осуществлять управление топочным процессом в автоматическом режиме, и тем самым повысить надёжность работы котельной установки.

Достоверность результатов работы обеспечивается применением апробированных методов расчёта топочного процесса и сертифицированных программ (расчёт по НТР с использованием программы Boiler Designer; математическое моделирование на основе программного комплекса ANSYS Fluent), применением поверенных приборов измерений, а также высокой степенью совпадения расчётных результатов с опытными данными.

Положения, выносимые на защиту:

Анализ сопоставления результатов расчётных исследований с использованием НТР и численного моделирования, выполненных с целью оценки влияния положения факела на основные показатели работы котла;

Разработанные принципиальные технические решения по конструкции вихревой поворотной пылегазовой горелки;

Результаты экспериментальных исследований работы вихревой поворотной пылегазовой горелки с получением зависимости изменения температуры перегретого пара от величины угла поворота горелки;

Основные принципы и алгоритм управления топочным процессом с использованием поворотных горелок.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Результаты диссертационного исследования соответствуют паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» в следующих направлениях:

Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчёта, алгоритмов и программ

выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования;

Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии;

Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии, водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок;

Личный вклад автора. Автором осуществлена постановка задачи и выбор основных направлений её решения, разработан подход к проведению расчётных исследований, выполнены необходимые расчёты и моделирование топочного процесса, экспериментальные исследования, осуществлён анализ и обобщение полученных результатов исследования, разработан алгоритм управления топочным режимом, разработаны рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования. Использование представленных в работе и выносимых на защиту результатов, полученных в ходе совместных исследований, согласовано с соавторами.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на конференции «Невская энергетическая перспектива 2024» (Санкт-Петербург, 11-13 сентября 2024 г.); на IV Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и

энергетики» (НИУ «МЭИ», Москва, 21-25 октября 2024 г.); на Международной научно-технической конференции «Техническое перевооружение ТЭС – масштабы и приоритеты. Совершенствование основного и вспомогательного оборудования, технологических схем и систем» (Москва, 29 октября 2024 г.); на XII Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 11-14 ноября 2024 г.); на Всероссийском Форуме «Енисейская теплофизика 2025» (Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, 14-19 апреля 2025 г.); на II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы эксплуатации котлов ТЭС: проблемы и пути их решения» (Москва, АО «ВТИ», 15.05.2025 г.).

Публикации. По материалам диссертации имеется 21 публикация, в том числе 13 публикаций в журналах, входящих в перечень ВАК, индексируемых в системе Scopus, а также 3 патента на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и шести приложений. Работа содержит 163 страницы печатного текста, 17 таблиц, 86 рисунков. Список литературы содержит 136 наименований.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Состояние и перспективы производства электроэнергии на угольных ТЭС

1.1.1 Перспективы развития угольной отрасли в РФ

В XXI веке существенную долю в топливном балансе энергетики РФ по-прежнему занимает уголь. Годовая добыча угля в РФ существенно выросла сейчас составляет 430-435 млн т/год, и значительная часть этого объёма поставляется на электрические станции. В 2023г на ТЭС было отгружено 107,7 млн т угля (включая 17,2 млн т угля, импортированного из Казахстана) [46].

Существующие тенденции показывают, что в ближайшее десятилетие ситуация существенно не изменится. Перспективы сохранения объёмов угля как топливно-энергетического ресурса и сырья для производства широкого спектра химических продуктов, а также экспортных поставок очень высоки [1].

В [48] отмечается, что даже в условиях беспрецедентных ограничений со стороны недружественных стран наша угольная отрасль продемонстрировала высокую степень устойчивости.

Кроме чисто экономической составляющей при оценке перспектив использования угля, следует учитывать и социальный аспект. Угледобывающая отрасль является системообразующей, как минимум, для 30 городов РФ и множества более мелких поселений.

В настоящее время активно прорабатываются концепции развития угледобывающих организаций даже в труднодоступных регионах РФ [113].

При анализе планов развития угольной отрасли важно принимать во внимание текущую политическую обстановку, в частности – перспективы использования угля на новых территориях РФ. В настоящее время ДНР и ЛНР наращивают добычу угля, в [94] приходят к заключению, что существующие тенденции свидетельствуют о перспективах дальнейшего использования и развития угледобывающей отрасли ДНР.

В [16] справедливо отмечается, что у угольной отрасли остаётся большой потенциал для развития, однако без применения новых технологий и модернизации существующих остаётся риск упадка отрасли.

Разумеется, можно найти достаточное количество работ (например, [101]), авторы которых отмечают тенденции перехода мировой экономики к углеродно-нейтральной модели и упоминают государственные программы РФ по декарбонизации экономики. Представляется однако, что мировые события 2022-2025 гг. должны внести серьёзные коррективы в эти представления.

Помимо традиционного использования угля в энергетике (сжигание в котлах ТЭС), в последние годы активно развиваются альтернативные направления, связанные с глубокой переработкой угля. Перспективность и актуальность данных исследований подтверждается на самом высоком уровне [92]. Под переработкой угля, в том числе, подразумевается его газификация с различными вариантами применения получаемого синтез-газа [53]. Например, в мире достаточно хорошо освоена в промышленном масштабе технология использования синтез-газа в ПГУ с внутрицикловой газификацией [51]. Другим возможным направлением использования синтез-газа является получение из него высокомаржинальных продуктов с помощью процесса Фишера-Тропша [2]. Также следует помнить о перспективах развития водородной энергетики: так называемый «коричневый» водород может производиться из продуктов газификации угля [11].

Технологии глубокой переработки угля не относятся напрямую к теме настоящего исследования, однако следует отметить, что их внедрение даст дополнительный толчок развитию угольной отрасли. Это также будет способствовать параллельному развитию традиционных технологий сжигания угля.

С учётом изложенного очевидно, что разработка новых и совершенствование существующих технологий сжигания угля остаётся важнейшей задачей отечественной энергетики.

1.1.2 Производство электроэнергии из угля в мире

Для сокращения выбросов CO₂ Международное энергетическое агентство поставило цель максимально декарбонизировать электроэнергетику. Предполагалось, что ветроэнергетика должна утроить выработку электроэнергии в период с 2022 по 2030 г., а солнечная энергетика – вырасти более чем в пять раз. За тот же период по этим планам угольная генерация должна сократиться вдвое.

Однако уже сейчас очевидно, что реальность вносит жёсткие коррективы в планы адептов «зелёной» энергетики. Несмотря на заявленные идеи по декарбонизации, объём добычи угля в 2023 г. достиг рекордного уровня, как и цены на него. В это период уголь обеспечил выработку более 35% мировой электроэнергии, оставаясь крупнейшим источником её производства.

Китай, Индия и Индонезия начали эксплуатировать новые угольные электростанции мощностью 59 ГВт и либо запустили, либо возобновили проектные предложения еще на 131 ГВт.

В 2023 г. в Великобритании были запущены угольные ТЭС для выработки дополнительной электроэнергии, т.к. работа солнечных батарей стала неэффективной из-за жары.

Производство электроэнергии из угля в последние два десятилетия увеличилось на 80%, с 5809 ТВт-ч в 2000 г. до 10430 ТВт-ч в 2023 г. За это время доля угля в мировом электроэнергетическом балансе снизилась лишь немного: с 38% в 2000 г. до 35% в 2023 г. [112].

Сейчас эксплуатируется более 2400 угольных ТЭС в 76 странах мира (чуть меньше половины общего количества – в Китае). Установленная мощность 40 угольных ТЭС составляет 4000 МВт и более. Примерно 93,2% мирового производства угольной электроэнергии приходится на четырнадцать стран, причем три первых: Китай, Индия и США обеспечивают более 75% общей выработки.

Ввод новых мощностей осуществлялся зачастую за счёт строительства новых современных энергоблоков сверхкритического давления (СКД) и энергоблоков с суперсверхкритическими параметрами пара (ССКП), которые характеризуются высокой экономичностью и минимальным воздействием на окружающую среду [103]. Электростанции с энергоблоками ССКП и СКД сейчас составляют более 48% от общей мощности угольных ТЭС.

В результате до настоящего времени наблюдается не падение, а рост выработанной электроэнергии из угля, в среднем на уровне 1,5% в год. В последние два десятилетия из 14 стран, на которые приходится примерно 93,2% мирового производства угольной электроэнергии, только в США и Германии наблюдается существенное сокращение угольной генерации. В остальных странах её объём либо практически не изменялся, либо увеличивался, в ряде случаев – значительно. С большой долей вероятности можно ожидать, что к 2040 г. количество выработанной электроэнергии из угля в целом по миру останется, по крайней мере, на прежнем уровне. Это предположение подтверждает динамика роста угольных мощностей в последние годы и прогноз их дальнейшего развития.

1.1.3 Состояние угольной энергетики РФ

На данный момент в России уголь как основное топливо сжигается на 90 ТЭС (без учёта электростанций мощностью менее 12 МВт и котельных). В 2023 г. суммарная мощность угольной генерации составляла 38,41 ГВт [13] (с учётом электростанций мощностью 12 МВт и более, а также ТЭС, на которых уголь может сжигаться совместно с газом, – на уровне 42 ГВт), примерно 14,8% всей установленной электрической мощности РФ. В 2023 г. в РФ за счёт сжигания угля было получено около 14,3% общего количества электроэнергии [13].

Более половины суммарной электрической мощности всех угольных ТЭС России (примерно 22,6 ГВт) составляют энергоблоки мощностью 120–800 МВт. Примерно половина угольных генерирующих мощностей

приходится на ТЭЦ, отпускающих потребителю, в том числе, и тепловую энергию. В основном на них эксплуатируется оборудование с поперечными связями.

Примерно 75% угольных мощностей России – это оборудование на докритическое давление. Большинство угольных мощностей, введенных в эксплуатацию в последние годы, также имеют докритические параметры пара. К ним относятся 3 блока 225 МВт: ст. № 3 на Харанорской ГРЭС (2012 г.), ст. № 8 (2014 г.) и ст. № 9 (2015 г.) на Черепетской ГРЭС; 2 блока 60 МВт на Сахалинской ГРЭС-2 (2019 г.); 3 блока 65 МВт на Приморской ТЭС (2020 г.); Совгаванская ТЭЦ мощностью 126 МВт (2020 г.).

Угольных блоков СКД в России с 90-х годов прошлого века было построено только четыре: блок № 3 Каширской ГРЭС (330 МВт; сейчас выведен из эксплуатации), блок № 9 Новочеркасской ГРЭС (330 МВт), блок № 10 Троицкой ГРЭС (660 МВт) и блок № 3 Берёзовской ГРЭС (800 МВт). Их технико-экономические показатели хотя и значительно выше, чем в среднем у действующих российских угольных энергоблоков, но всё же уступают мировым.

На угольных ТЭС России оборудование, проработавшее более 40 лет, составляет почти 65%. Генерирующих мощностей моложе 10 лет – менее 6%.

Тем не менее, оценивая перспективы развития угольной энергетики в России, следует отметить, что весомые предпосылки снижения доли угольной генерации отсутствуют. В качестве причин этого можно выделить несколько факторов:

по разведанным месторождениям угля Россия занимает второе место в мире (с долей около 15% мировых запасов). Запасы угля в РФ превышают 162 млрд т;

доля России в мировой добычи угля составляет примерно 5,5% (шестое место). В абсолютном значении этот показатель находится на уровне 440 млн т в год;

по объёмам потребления угля Россия находится на четвёртом месте в мире с долей 3%, и основными потребителями угля в нашей стране являются именно ТЭС (более 50%);

замещение угля природным газом и ВИЭ породит ряд негативных последствий. В частности, это приведёт к стагнации и последующей ликвидации угольной промышленности, создаст проблемы для надёжного энергообеспечения многих регионов страны, станет причиной снижения стратегической устойчивости энергетики страны.

Таким образом ближайшей задачей энергетики РФ является не сокращение угольной генерации, а техническое перевооружение ТЭС с внедрением на них новых технологий, обеспечивающих повышение технико-экономических и экологических показателей оборудования.

1.1.4 Актуальные проблемы угольных ТЭС РФ

Большинство угольных энергоблоков РФ были разработаны и введены в эксплуатацию в 60-90 гг. прошлого века и в то время соответствовали лучшим образцам мировой энергетики. Однако многие из них проработали уже 45-55 лет. Поэтому свойственные им показатели надёжности, электрического КПД (30-36%), уровня автоматизации, экологической безопасности (по выбросам NO_x , SO_2 и твёрдых частиц в атмосферу) не соответствуют современному техническому уровню. Проблема высоких выбросов загрязняющих веществ от угольных котлов стоит особенно остро: анализ перечня наилучших доступных технологий по снижению вредных выбросов [32-33] показывает, что лишь незначительная часть этих технологий внедрена на котельном оборудовании РФ.

В последние годы на угольных ТЭС России наметилась тенденция к изменению топливного баланса, а именно – переводу котлов на сжигание непроектных видов твёрдого топлива [36, 104, 106, 52]. С одной стороны, эта тенденция обусловлена сокращением поставок проектных углей вследствие истощения угольных разрезов или ухудшения качества топлива. С другой

стороны, с точки зрения повышения экономических показателей работы для ТЭС выгодно обеспечить диверсификацию поставок топлива. Поэтому на угольных электростанциях часто рассматривают возможность использования углей от разных поставщиков, что также приводит к необходимости сжигания непроектных углей. Следует отметить, что даже многолетнее использование станцией угля конкретной марки не решает полностью проблему колебания характеристик топлива: например, в условиях Кузнецкого бассейна свойства углей одной марки, добываемых из соседних разрезов, имеют существенные различия [3].

Значительные колебания свойств поступающего угля оказывают сильное влияние на режим работы СПП и котла, а также на его технико-экономические показатели. Существенные изменения режима горения зачастую приводят к следующим проблемам:

- изменение температуры газов на выходе из топки в широком диапазоне;
- трудности с поддержанием стабильного значения температуры перегретого пара [52];
- шлакование поверхностей нагрева;
- преждевременный износ металла поверхностей нагрева вследствие превышения проектных значений температур;
- ухудшение эффективности сжигания [104] и др.

Ряд перечисленных проблем хорошо иллюстрируется расчётными исследованиями на примере конкретных котлов [75, 76, 77, 62].

1.2 Обзор литературных источников по тематике управления топочным процессом с использованием поворотных горелок

1.2.1 Общие положения

Одним из возможных способов решения описанных проблем угольных котлов является реализация системы сжигания с возможностью регулирования положения факела по высоте топки в зависимости от

режимных показателей работы котла. Использование подобной системы сжигания позволит:

Поддерживать стабильное значение температуры газов на выходе из топки и, как следствие, температуры перегретого пара независимо от текущих характеристик сжигаемого угля (при росте указанных температур горелки поворачиваются вниз, факел опускается, температуры снижаются; при снижении указанных температур реализуется обратный алгоритм).

Эффективно бороться со шлакованием поверхностей нагрева. Одним из ключевых факторов начала шлакования является температура газов, при определённом значении которой начинают возникать первичные отложения. Регулирование положения факела даёт возможность создавать в зонах риска шлакования температурные условия, препятствующие образованию шлаковых отложений.

Обеспечить безопасные температурные условия работы металла ширмовых и конвективных поверхностей нагрева (поддержание постоянного значения температуры газов на выходе из топки исключает превышение значений температур металла сверх проектных).

Повысить эффективность выгорания топлива за счёт возможности управления топочным режимом путём регулирования положения факела по высоте.

Наиболее быстро и эффективно изменение положения факела осуществляется в случае применения поворотных горелок с достаточным диапазоном регулирования угла поворота.

Высота положения ядра факела в топке котла при расчётах характеризуется параметром M . Следует подчеркнуть, что подход к оценке высоты положения факела в старом и новом издании нормативного метода расчёта котлов [108, 109] существенно отличается и в целом не может считаться на 100% универсальным. Особенно проблема актуальна для ступенчатого сжигания: в [109] отмечается, что в этом случае «рекомендации

расчёта основаны на ограниченном количестве опытных данных». В ряде случаев заметный разброс результатов расчёта температуры газов на выходе из топки и её экспериментальных значений наблюдается для котлов с трёхступенчатой схемой сжигания. Изменение вектора направления факела учитывается при расчёте параметра M с помощью дополнительной поправки на угол поворота горелок $\Delta\alpha$. Однако с учётом того, что поворотные горелки крайне редко внедрялись на действующих котлах (см. раздел 1.2.2), имеется очень мало опытных данных по их эксплуатации. А следовательно, и значения поправки $\Delta\alpha$ носят рекомендательный характер и нуждаются в уточнении.

Таким образом, следует признать, что для корректной оценки работы системы сжигания с регулированием положения факела необходимо проведение специальных расчётных исследований с оценкой температуры газов на выходе из топки не только по [108, 109], но также на основе результатов моделирования топочного процесса в современных программах и экспериментальных изысканий.

Для современных энергоблоков характерна тенденция по автоматизации процесса управления оборудованием. Поэтому при внедрении системы сжигания с регулированием положения факела по высоте необходима проработка возможного алгоритма её автоматической работы. Полноценная реализация такого алгоритма в настоящее время может быть затруднена ввиду специфики функционирования угольных ТЭС (отсутствие систем онлайн-контроля характеристик угля и др). Однако с развитием техники (в том числе – ИИ) окружающий мир быстро меняется, поэтому первые шаги по теоретической проработке алгоритма автоматического регулирования положения факела целесообразно предпринять уже сейчас.

1.2.2 Анализ конструкций и опыт использования поворотных горелок

Ключевым элементом системы сжигания с регулированием положения факела является поворотная горелка. До настоящего времени примеры успешного внедрения и полноценной эксплуатации поворотных горелок

практически отсутствуют. Имеющийся опыт использования поворотных горелок, особенно на угольных котлах, показывает проблему быстрого заклинивания их поворотного механизма из-за работы в условиях высоких температур, запылённости и прочих негативных факторов.

Стоит отметить, что сама возможность эффективно влиять на топочный режим за счёт регулирования факела давно обращает на себя внимание исследователей. Например, ещё в 1971 г. в СССР было зарегистрировано несколько патентов на систему сжигания с поворотными горелками.

Изобретение [89] касается поворотных горелок, позволяющих отклонять факел в ту или другую сторону, и тем самым изменять положение высокотемпературного ядра факела по высоте топки для регулирования температуры перегретого пара. Однако по факту, несмотря на название изобретения, изменение положения факела предполагается осуществлять без поворота горелки – чисто аэродинамическим способом. В выходной части горелки перпендикулярно основному потоку воздуха установлено две трубы подвода дополнительного воздуха, на каждой из которых установлен шибер (рис. 1.2.1).

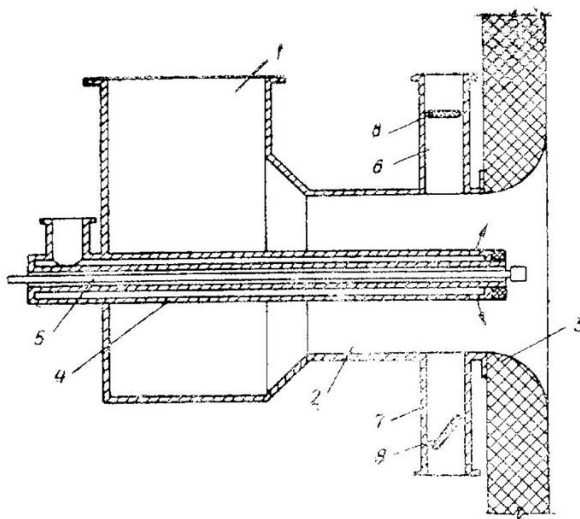


Рисунок 1.2.1 – Прямоточная поворотная горелка (1 – короб для подачи воздуха; 2 – канал подачи воздуха; 3 – тороидальный диффузор; 4 – труба для подачи топлива; 5 – мазутная форсунка; 6,7 – трубы для подвода дополнительного воздуха; 8,9 – регулирующие шиберы)

Регулируя степень открытия шиберов в тех или иных условиях, предлагается «отжимать» основной поток воздуха в нужном направлении, изменяя тем самым высоту факела. По мнению разработчиков, данная система позволит регулировать направление факела от 0 до 90° (в последнем случае «факел отклоняется настолько, что движется вдоль стенки топki»). Однако никаких дополнительных исследований или расчётов, подтверждающих эффективность такого регулирования, не приведено. В условиях реального топочного процесса такая система регулирования представляется инерционной и ненадёжной: при подаче сильного перпендикулярного потока воздуха в канал возможна пульсация факела или даже потухание горелки. Кроме того, при реализации такой системы отсутствуют какие-либо данные о конкретных значениях угла отклонения факела, лишь примерный диапазон. Вполне закономерно, что сведения об успешной реализации данного изобретения в открытых источниках отсутствуют.

В другом изобретении 1970-х годов [90] регулирование параметров факела горелки достигается тем, что труба (внутренний канал горелки) выполнена поворотной вокруг продольной оси, а выходные участки корпуса и трубы имеют косые срезы (рис. 1.2.2).

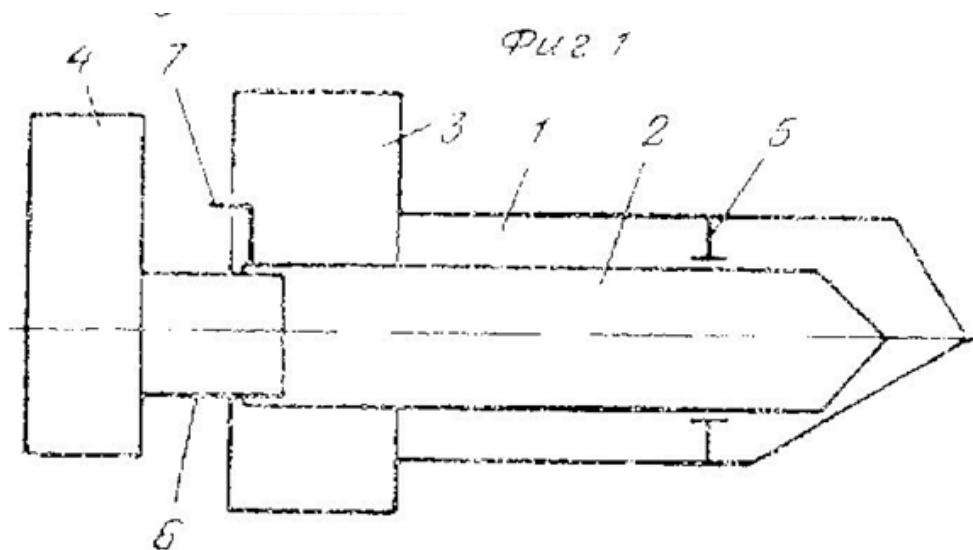


Рисунок 1.2.2 – Горелка с двусторонними косыми срезами (1 – корпус; 2 – внутренняя труба; 3 – завихритель вторичного воздуха; 4 – завихритель первичного воздуха; 5 – направляющее кольцо; 6 – патрубок завихрителя; 7 – поворотное устройство)

Однако конкретные зависимости влияния поворота горелки на топочный режим и параметры работы котла не указаны. Конструктивно узел поворота горелки в рамках данного изобретения не проработан: в [90] «поворотное устройство» обозначено лишь схематично. Таким образом данное изобретение можно рассматривать лишь как первичный подход к проблеме без какой-либо глубокой проработки.

Некоторые из разрабатываемых в СССР проектов с регулированием положения факела дошли до стадии внедрения [114]. Одним из немногих примеров фактической реализации поворотных горелок на котлах РФ с целью регулирования температуры перегретого пара является горелка УП-8 (рис. 1.2.3), разработанная ЗИО для котла ПК-23 паропроизводительностью 250 т/ч, сжигающего каменный уголь.

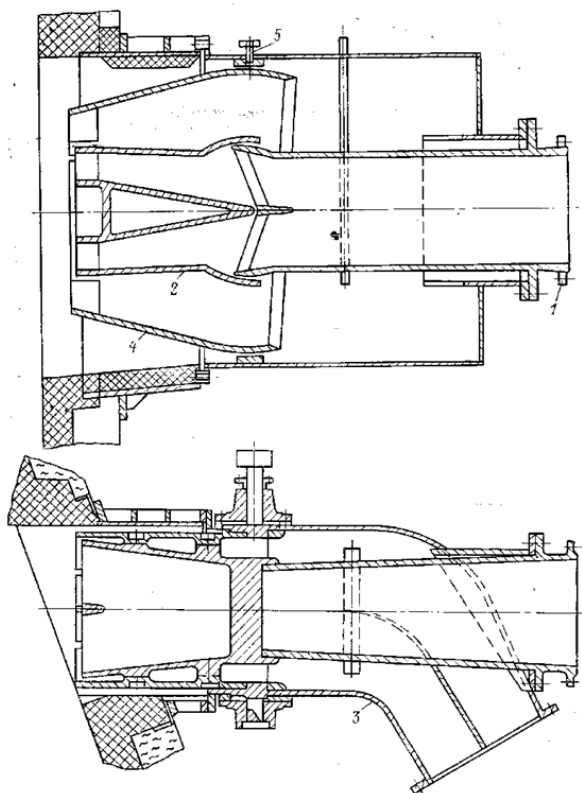


Рисунок 1.2.3 – Поворотная горелка ЗИО (1 – фланец пылепровода; 2 – сопло первичного воздуха; 3 – короб вторичного воздуха; 4 – сопло вторичного воздуха)

Прямоточная горелка содержит поворотные чугунные сопла аэросмеси и вторичного воздуха, сопла могут поворачиваться на 12° вверх и на 20° вниз.

К сожалению, в открытых источниках практически отсутствуют сведения об особенностях эксплуатации и наладки данных горелок. Сообщается лишь, что такой способ регулирования не получил распространения из-за значительного увеличения потерь с механическим недожогом и роста температуры уходящих газов. В итоге поворотные горелки используются лишь «для первичной наладки положения факела в топке» [50].

Также в [50, 114] рассматривается вариант реализации аэродинамического метода изменения положения факела с использованием прямоточных плоскофакельных горелок (рис. 1.2.4). Регулирование соотношения расходов вторичного воздуха по верхнему и нижнему соплам горелки позволяет изменять положение максимальной температуры факела до 3 метров.

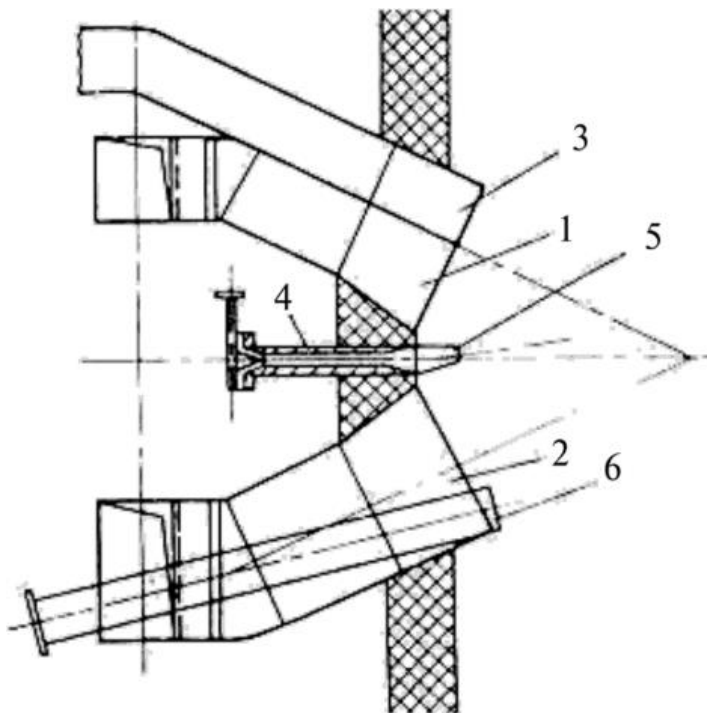


Рисунок 1.2.4 – Плоскофакельная горелка (1 – верхнее сопло вторичного воздуха; 2 – нижнее сопло вторичного воздуха; 3 – сопло сбросного воздуха; 4 – паровой эжектор; 5 – сопло эжектора; 6 – канал мазутной форсунки)

Анализ графика зависимости изменения температуры факела по высоте топки котла БКЗ-210-140Ф с плоскофакельными горелками при трёх условных положениях факела (горизонтальный/опущен/поднят) показывает, что на

выходе из топки (в зоне выходного окна) разница температур для трёх вариантов лежит в довольно узком диапазоне – 20-40°C.

В [114] также приведён пример блока угловых прямоточных горелок, включающий по высоте 4 пылеугольные и 2 мазутные щелевые поворотные горелки для котла энергоблока мощностью 550 МВт. Судя по представленной графической части (рис. 1.2.5), подразумевалась возможность поворота сопел на $\pm 30^\circ$, однако сведения об успешной эксплуатации данных поворотных устройств отсутствуют.

Следует отметить, что некоторые конструктивные особенности данных горелок схожи с прямоточными горелками котлов ТПЕ-223 блоков 225 МВт Черепетской ГРЭС с тангенциальной схемой сжигания [95]. Изначально конструкция этих горелок предусматривала возможность поворота сопел (рис. 1.2.6), но уже спустя полгода после ввода котлов в эксплуатацию поворотные механизмы заклинило, в результате поворотные узлы не используются.

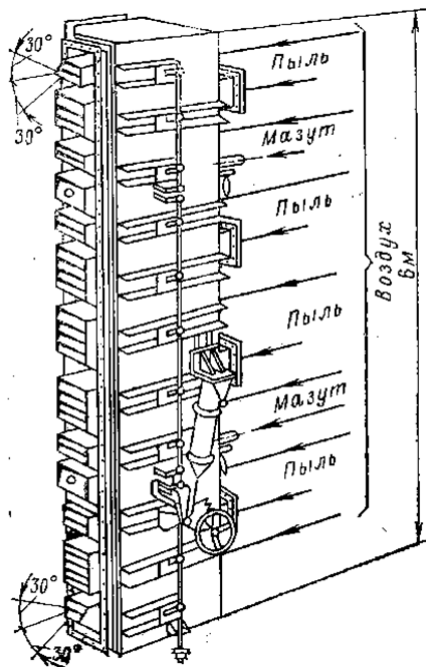
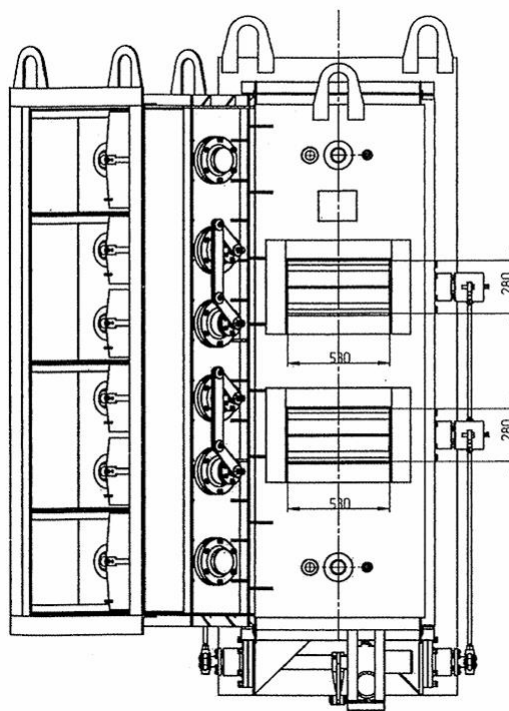


Рисунок 1.2.5 – Угловая пылеугольная прямоточная горелка



*Рисунок 1.2.6 – Вид прямоточной горелки котла ТПЕ-223
с шарнирным поворотным механизмом*

Материал [50], вышедший уже в XXI веке, содержит краткий обзор существующих способов изменения положения факела в топке. Характерно, что в этом обзоре других примеров, кроме упомянутых ещё в [114] (1976 г.), практически нет. Этот факт очень наглядно характеризует историю развития поворотных горелок в нашей стране: после 1970-х годов в этом направлении не разработано практически ничего принципиально нового – очевидно, для большинства исследователей реализация подобных проектов представлялась слишком сложной и малоперспективной.

Можно упомянуть рассматриваемый в [50] метод регулирования крутки потока на выходе из горелки с помощью периферийного струйного радиального вдува, разработанный Уральским Федеральным университетом. По представленным данным можно предположить, что данный метод регулирования некоторыми чертами напоминает схему [89], собственно поворот горелки тут не реализуется. При этом авторы обзора отмечают, что хотя данная технология подразумевает возможность изменения направления

оси закрученного потока на выходе из горелки с отклонениями в горизонтальной и вертикальной плоскостях, исследования этого эффекта не получили дальнейшего развития.

В [107] рассматривается котёл, содержащий экранированную топку, в которой по углам установлены горелки с возможностью поворота в горизонтальной и вертикальной плоскости. Система контроля температуры перегретого пара снабжена дополнительным датчиком температуры перегретого пара, соединенным электрической связью с исполнительным механизмом сервоприводов поворота горелок в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Авторы работы основное внимание уделяют теоретическим аспектам влияния изменения положения факела на показатели котла. Вопросы конструкции горелок и системы поворота практически не рассматривались. Конкретные зависимости параметров котла от угла поворота горелок также отсутствуют, имеется только фраза о том, что «горелки поворачиваются в вертикальной плоскости на *некоторый* угол».

Таким образом, в работе исследуются лишь общие направления влияния поворота горелок на режим котла в части температуры перегретого пара. Также важно отметить, что речь идёт о газовом котле и о прямооточных горелках.

В [57] поворотные горелки упоминаются как средство регулирования положения факела и влияния на величину температуры перегретого пара. Отмечается ряд факторов, способствующих отсутствию широкого использования поворотных горелок в отечественной энергетике. Главный из этих факторов, безусловно, - «сложная конструкция горелки и автоматики».

Анализ приведённых примеров позволяет отметить две явные тенденции:

Использование поворотных горелок в основном рассматривалось теоретически, опыт их практического внедрения фактически отсутствует.

Все примеры реализации поворотных горелок относятся к прямооточным горелкам. Примеры внедрения (и даже теоретической проработки) вихревых

поворотных горелок отсутствуют – очевидно, ввиду сложности конструктивного исполнения подобной горелки по сравнению с прямоточной. Между тем, вихревые горелки более перспективны с точки зрения регулируемости топочного режима и снижения потерь с недожогом.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что разработка системы сжигания с регулированием положения факела при использовании вихревых поворотных горелок является перспективным и актуальным исследованием, характеризующимся достаточной научной новизной.

1.2.3 Обзор технических решений по конструкциям поворотных механизмов и уплотнений

Исследование поворотных механизмов горелок, рассмотренных выше [89, 90, 114, 50, 95, 107], показывает, что на практике такие конструкции реализуются крайне редко ввиду сложности обеспечения надёжной и долговременной работы механизмов. На крупных котлах поворотные механизмы встречаются на прямоточных горелках, однако опыт эксплуатации имеющихся образцов говорит об их быстром выходе из строя. Как правило, в этих примерах речь идёт о рычажных поворотных механизмах, особенно подверженных влиянию пыли и высоких температур. Кроме того, большинство рассмотренных примеров подразумевают не поворот горелки в целом, а поворот отдельных сопел горелки, либо чисто аэродинамические способы регулирования высоты факела. Имеется ещё несколько подобных примеров [70, 78], но приходится отметить, что для вихревой горелки их адаптация затруднительна (не говоря уже о том, что по большей части они либо не внедрены на практике, либо не показали себя эффективными).

Для полноты картины можно привести несколько примеров поворотных устройств из смежных областей [42, 68, 71], но их следует признать узкоспециальными и также не подходящими для реализации применительно к вихревой горелке крупного пылеугольного котла.

Очевидно, что рассматриваемая задача требует нетривиального решения, поэтому в рамках анализа рассматривались механизмы из разных областей техники, отдельные узлы которых могли бы оказаться полезными при создании надёжного поворотного механизма вихревой горелки.

По результатам изысканий было принято решение использовать в качестве поворотной системы горелки гидросистему с маслостанцией, управляющей двумя гидроцилиндрами. Общие принципы такой системы аналогичны работе механизмов экскаваторов, буровых машин и др. (например, [74]). Подробно система поворота горелки описана в разделе 3.3, здесь же следует упомянуть, что сами по себе гидроцилиндры устойчиво работают в условиях запылённости, а их размещение возможно в зоне относительно невысоких температур.

Одним из узлов поворотной системы, требующих особой проработки, являются уплотнения (как каналов горелки в зоне стыка статической и подвижной части, так и места стыковки горелки с топкой). Уплотнения должны эффективно работать при высоких температурах и обеспечивать отсутствие перетоков в условиях периодических поворотов подвижной части. В такой ситуации применение некоего стандартного решения по уплотнению не представляется возможным, требуется разработка комплексного решения под конкретный узел оборудования.

Поскольку поворотные вихревые горелки до сих пор не получили распространения, вопросам уплотнения именно горелок в настоящее время уделяется мало внимания. При этом можно рассмотреть решения по уплотнениям, применяемым на различных узлах энергетического оборудования.

Во многих случаях используются давно опробованные и отработанные решения с применением стандартных уплотнений [43, 115, 6, 41].

Нередко встречается использование уплотняющих потоков (воздуха и др.) [19, 27, 26, 47, 129, 12, 15]. Это решение зачастую оказывается наиболее

эффективным, однако в некоторых случаях требует установки дополнительного оборудования (вентилятор, трассировка труб и т. д.), что обуславливает повышенные затраты на реализацию.

При изготовлении уплотнений могут применяться дорогостоящие материалы, исключаящие интенсивный абразивный износ, истирание, ржавление и пр. [23, 21, 17, 110, 54, 5, 40]. На практике подобные решения реализуются достаточно редко ввиду своей высокой стоимости, однако могут рассматриваться как вариант при решении проблемы повышения надёжности работы наиболее ответственных узлов оборудования.

При уплотнении специфических узлов иногда используется несколько видов уплотнений (комбинированная схема), в том числе и нестандартных – набивок и др. [86, 18, 20, 22, 9, 99].

При разработке конструкции уплотнений важно учитывать все особенности конкретного объекта [81, 82, 24, 25, 127, 44, 96, 29]. Данный подход применяется как при разработке нового оборудования, так и при реконструкции действующего. Тут также зачастую реализуется комбинированный подход – использование нескольких видов уплотнений.

1.2.4 Основные требования к системе сжигания с поворотными горелками

В статье «Описание конструкции и моделирование работы вихревой поворотной горелки при сжигании угля и природного газа» мы приходим к выводу, что основные требования к разрабатываемой системе сжигания и проблемы, которые необходимо решить на стадии проработки и проектирования поворотных горелок, заключаются в:

Организации эффективной подачи топлива и воздуха в топку и недопущении роста потерь с химическим и механическим недожогом во всём диапазоне поворота горелки;

Уплотнении каналов горелки в местах сочленения статической и динамической (поворотной) частей, а также обеспечении герметичности соединения поворотной части горелки с топкой;

Эффективном решении по механизму поворота горелки. Способ реализации поворота должен обеспечивать высокую надёжность: недопущение заклинивания при высоких температурах и в условиях сильной запылённости;

Обеспечении высоких экологических показателей системы сжигания, главным образом – в плане снижения выбросов оксидов азота NO_x за счёт малоэмиссионного сжигания топлива (Теплоэнергетика, № 8, 2024, с. 82-94).

По мере ужесточения норм по допустимым выбросам в атмосферу оксидов азота всё большее внимание уделяется разработке вихревых пылеугольных горелок, которые принято называть «малоэмиссионными» [65, 87, 83, 58, 91, 80, 7, 39].

В настоящее время можно выделить следующие тенденции в разработке малоэмиссионных горелок:

Обеспечение раннего воспламенения топливо-воздушной смеси [60, 8, 100];

Минимизация доли первичного воздуха (с учётом количества горячего воздуха, необходимого для сушки и транспорта угольной пыли в размольном устройстве) [85, 73, 131, 4];

Замедленное подмешивание вторичного воздуха к воспламеняющейся аэросмеси, чтобы сгорание летучих и начало горения коксового остатка происходило при минимальной концентрации кислорода [72, 28, 35];

Реализация максимальной приосевой рециркуляции высокотемпературных газов к корню факела – с целью эффективного воспламенения летучих вблизи корня факела [35,66, 61, 126, 10];

Исследования, направленные на совершенствование «стадийности» сжигания за счёт оптимизации параметров горелки (показателей крутки, распределения воздуха и др.) [69, 84, 128, 130];

Разработка новых конструкций горелок в значительной степени опирается на результаты моделирования топочных процессов с использованием современных программ [67, 59, 105, 121, 125, 133];

Применение малоэмиссионных горелок, как правило, реализуется в комплексе с наилучшими доступными технологиями [32-33], направленными на снижение выбросов NO_x и оптимизацию топочного процесса [132, 34, 116].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

По результатам анализа рассмотренных в первой главе материалов можно сделать следующие выводы:

Существенного снижения доли угольной генерации в энергетике РФ в ближайшие десятилетия не ожидается. При этом большинство угольных ТЭС нашей страны введены в эксплуатацию достаточно давно, и их котельное оборудование не соответствует современным требованиям по экологическим и технико-экономическим показателям.

Одним из способов решения ряда распространённых проблем угольных котлов является реализация системы сжигания с возможностью регулирования положения факела по высоте топки в зависимости от режимных показателей работы установки. Ключевым элементом подобной системы сжигания является поворотная горелка.

До настоящего времени примеры успешного внедрения и полноценной эксплуатации поворотных горелок практически отсутствуют. Имеющийся опыт использования поворотных горелок, особенно на угольных котлах, показывает проблему быстрого заклинивания их поворотного механизма из-за работы в условиях высоких температур, запылённости и прочих негативных факторов.

Все примеры реализации поворотных горелок относятся к прямоточным горелкам. Примеры внедрения (и даже теоретической проработки) вихревых поворотных горелок отсутствуют – очевидно, ввиду сложности конструктивного исполнения подобной горелки по сравнению с прямоточной. Между тем, вихревые горелки более перспективны с точки зрения обеспечения технологических показателей по выбросам NO_x и снижения потерь с недожогом.

При разработке системы сжигания с регулированием положения факела по высоте необходимо проведение специальных расчётных исследований по оценке влияния изменения положения факела на значение температуры газов

на выходе из топки. Существующие методики расчёта температуры газов с использованием параметра M [108, 109] основаны на ограниченном количестве эмпирических данных и нуждаются в уточнении путём эксперимента и сравнительного анализа по результатам моделирования топочного процесса в современных расчётных программах.

При разработке основных технических решений по конструкции вихревой поворотной горелки особое внимание должно быть уделено надёжности работы поворотного механизма, эффективности уплотнений узлов горелки, а также реализации мероприятий по подавлению выбросов оксидов азота NO_x .

Для современных энергоблоков характерна тенденция по автоматизации процесса управления оборудованием. Поэтому при внедрении системы сжигания с регулированием положения факела по высоте необходима проработка возможного алгоритма её автоматической работы.

С учётом вышеизложенного, можно сформулировать следующие задачи настоящей работы:

Провести расчётные исследования для определения пределов изменения температуры газов на выходе из топки в диапазоне возможных колебаний проектных характеристик угля;

С использованием численного моделирования оценить диапазон регулирования температуры газов на выходе из топки за счёт изменения положения факела по высоте;

Определить оптимальный рабочий диапазон изменения угла поворота горелок, при котором имеется возможность регулировать положение зоны максимальных температур в требуемом диапазоне изменения характеристик топлива;

Выполнить сопоставление результатов численного моделирования топочного процесса с данными расчёта по нормативному методу (нормы

теплового расчёта котлов) для оценки влияния положения факела на показатели работы котла;

Разработать основные технические решения по конструкции поворотной вихревой горелки для энергетического котла с применением мероприятий по снижению выбросов NO_x , возможностью реализации вертикального поворота горелки, обеспечением уплотнения устройства, возможности сжигания угольной пыли и природного газа;

Провести испытания на действующем котле с определением основных показателей работы горелки и получением зависимости изменения температуры перегретого пара от угла поворота горелки;

Разработать основные принципы, алгоритм и рекомендации по управлению топочным процессом с использованием поворотных горелок.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ФАКЕЛА НА ТОПОЧНЫЙ РЕЖИМ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ УСТАНОВКИ НА ПРИМЕРЕ КОТЛА БКЗ-210-140 ТОМСКОЙ ГРЭС-2

2.1 Общие положения и предпосылки расчётных исследований

Основная цель расчётных исследований – показать, как влияет изменение положения факела по высоте топки на температуру газов на выходе из топки и за счёт этого определить: в каком диапазоне возможно регулирование температуры газов при повороте горелок вверх/вниз на фиксированный угол.

Одной из главных причин возникновения проблемы колебания температуры газов является нестабильный состав углей, поставляемых на ТЭС. Ввиду этого важно смоделировать условия колебания свойств топлива, рассчитать варианты работы котла на разных видах углей (для представительности результатов – как минимум, для трёх видов) и дать сравнительный анализ полученных результатов.

Как было отмечено в Главе 1, для уточнённой оценки температуры газов при корректировке топочного режима требуется проведение специальных расчётных исследований, подразумевающих сравнение разных подходов к расчёту температуры. Первый из этих подходов – расчёт по НТР [108, 109], в котором влияние положения факела на температуру газов учитывается с помощью параметра M . Расчёты этого типа оптимально производить с использованием программы Boiler Designer. Второй подход к расчёту топочного процесса – его моделирование с помощью современных специализированных программ (ANSYS Fluent, Sigma Flame и др). Сравнительная оценка разброса значений температуры газов при разных подходах к расчёту позволит обеспечить большую достоверность полученных результатов.

Важным практическим результатом расчётных исследований на основе НТР и моделирования топочного процесса является определение оптимального диапазона угла поворота горелок, при котором обеспечивается

достижение поставленных целей (регулирование температуры газов в широком диапазоне), но не имеет место чрезмерное усложнение конструкции горелки.

Проведение математического моделирования важно и с другой точки зрения. Расчёт по НТР не позволяет оценить изменение аэродинамической картины в топке при повороте горелок, а также тренды изменения содержания СО и твёрдых частиц углерода вверху топки (потери с механическим недожогом). Поскольку внедрение поворотных горелок не должно сопровождаться ухудшением технико-экономических показателей котла, важно дать предварительную оценку их изменения по результатам моделирования.

Для проведения расчётов, в первую очередь, необходимо выбрать объект исследования. Выполнение всех описанных расчётов и моделирования оптимально осуществлять на базе действующего промышленного пылеугольного котла с известными характеристиками. Наличие статистических данных по топливу и фактических значений показателей работы позволит дать более объективную оценку полученным расчётным результатам. Кроме того, только исследования применительно к конкретному котлу открывают возможность практического внедрения головного образца поворотной горелки.

2.2 Описание используемых расчётных программ

2.2.1 Описание программы Boiler Designer

Программа Boiler Designer разработана специально для проведения тепловых расчётов промышленных котлов различной конфигурации (по мощности, типу (барабанные, прямоточные), виду сжигаемого топлива (уголь, газ, мазут) и пр).

В настоящее время в программу включены следующие расчётные модули:

Теплогидравлический расчёт котлов, аэродинамический расчёт отдельных элементов;

Динамический расчёт котлов (расчёт переходных процессов, включая пусковые режимы);

Расчёт циркуляции в барабанных котлах и проверка надёжности циркуляции;

Расчёт тепловых схем энергоблоков и электростанций с поперечными связями;

Расчёт кожухотрубных теплообменников;

Расчёт альтернативных теплоносителей;

База данных газовых турбин.

В основе алгоритма расчёта котлов в Boiler Designer лежит НТР [108, 109], причём при вводе исходных данных возможен выбор соответствующей опции: проводить расчёт по [108] или по [109].

Программа Boiler Designer широко используется в России с 90-х годов XX века и зарекомендовала себя как надёжный и эффективный инструмент расчёта котлов. В настоящее время Boiler Designer используется в качестве базовой программы расчёта котлов большинством крупных котельных заводов РФ, например, «ЗиО-Подольск».

При подготовке к расчёту котла в Boiler Designer последовательно выполняются следующие операции:

Ввод общих данных по котельной установке (рис. 2.2.1).

Задание «Группы топлива» и ввод свойств топлива (рис. 2.2.2).

Формирование схемы газового тракта путём задания типовых элементов тракта (топка и соответствующие поверхности нагрева котла), их взаимной конфигурации и связей между ними.

Формирование схемы пароводяного тракта котла (по алгоритму, аналогичному п.3) (рис. 2.2.3).

Формирование схемы воздушного тракта котла (по алгоритму, аналогичному п.3).

Ввод исходных данных по каждому заданному элементу схемы (рис. 2.2.4).

Параметры	Значение	Размерность	Описание
МЕТОД	НТР(Россия)	-	Методика расчета : 0 - НТР(Россия); 1 - FDBR(DVO); 2-Benson; 3- HEDH; 4 - Manuell; 5 - WKV; 6 - НТР(Россия) 1998г.
ТипК	котел,произв.неперг.пар	-	Тип котла
ПрГТ	утилиз. котёл	-	Признак: 0-котёл с топкой; 1-утилиз. котёл
МетодГаз	Факт. состав дым. газов	-	Способ расчета свойств газов
Пр_Исх.состояние	нет	-	Признак установки исходного состояния: 1-да, 0-нет
Нотн	100,0000	%	Отн. нагрузка котла (расход пара)
Рокр	1,033	атм	Давление окружающего воздуха
txв	30,0	Градус	Температура холодного воздуха
dxв	10,00	г/кг	Влажность холодного воздуха
q3	0,0000	%	Потери тепла с химическим недожогом
q4	0,3400	%	Потери тепла с мех. недожогом
q5	0,5800	%	Потери тепла в окружающую среду
q6	0,0130	%	Потери тепла с жидким шлаком
Дном1	210,000	т/ч	Ном. расход первичного пара
Рном1	140,000	атм	Ном. давление первичного пара
Тном1	560,0	Градус	Ном. температура первичного пара
Рпв	159,000	атм	Давление пит. воды
Тпв	230,0	Градус	Температура питательной воды
Qcoke	33440,00	кДж/кгт	Тепло кокса
VDI_FDBR	VDI	-	Методика расчета: 0 - VDI, 1 - FDBR
ИзлПуч_Пуч	нет	-	Учет излучения металла труб между пучками: 0-нет, 1-да
ФизлОД	нет	-	Признак учета излучения между основной и доп. пов-ями: 1-да, 0-нет
epsilon_1	0,7900	-	Козф. поглощения 1
epsilon_2	0,7900	-	Козф. поглощения 2
Кизл_за_пуч	0,0860	-	Козф. для расчета излучения газового объема за пучком
Кизл	0,7680	-	Козф. для расчета излучения
Куч	0,0000	-	Козф. поглощения частицами пыли при выходной t-ре
Cs	5,77	Вт/м2*К4	Козф. излучения черного тела
ЦКС_Константа1	0,0000	-	Константа для расчета лучистого теплообмена в топке ЦКС
ЦКС_Константа2	0,0000	-	Константа для расчета кондуктивного теплообмена в т/о
ЦКС_Константа3	0,0000	-	Константа для расчета кондуктивного теплообмена в топке ЦКС
ЦКС_Константа4	0,0000	-	Константа для расчета лучистого теплообмена в т/о ЦКС

Рисунок 2.2.1 – Пример экрана ввода общих данных в Boiler Designer

Параметры	Значение	Размерность	Описание
qТопл	100,0000	%	Доля топлива в общем тепловыделении
BmaxM	45,000	т/ч	Максимальный массовый расход топлива
Расчет Qрн	нет	-	Расчет Qрн: =0 нет, =1 уголь =2 мусор
Qрн	4810,00	Ккал/кг	Низшая теплота сгорания топлива
ТипУг	каменный уголь	-	Тип угля: 0-антрацит, 1- каменный уголь; 2- бурый уголь, 3 - сланец
СпСжиг	ШБМ	-	Способ сжигания: 0-ШБМ, 1-среднеходи молот, 2-торф, 3-цикл.топки-пыль, 4- цикл.топки-дробл, 5-слоевые топки
Ттопл	0,0	Градус	Температура топлива
к_кокс	0,0100	-	Козф. ослабления лучей частицами кокса
Шлак	большое.шлак.	-	Шлакуемость топлива :0-без шлака,1-умер. шлаков.с очистк,2-умерен.шлак.без очист,3-большое.шлак.
ГазСушка	есть	-	Учёт физического тепла топлива : 0- нет, 1- да
C	54,4000	%	Содержание углерода
H	3,5200	%	Содержание водорода
S	0,1900	%	Содержание серы в топливе
O	10,7100	%	Содержание кислорода
N	1,4800	%	Содержание азота
Ar	0,0000	%	Содержание Ar
w	18,7100	%	Влажность топлива
A	10,9900	%	Зольность топлива
СуммаКомп	100,0000	%	Сумма долей компонентов
Куг	0,5000	-	Козф. поглощения при излучении пылевых частиц

Рисунок 2.2.2 – Пример экрана ввода свойств топлива в Boiler Designer

После завершения ввода исходных данных в случае отсутствия выявленных ошибок запускается расчёт котла. При этом имеется опция задания необходимого количества итераций расчёта. Программа рассчитывает

тепловой баланс котла и каждой поверхности нагрева в отдельности. По результатам расчёта выдаётся полный массив показателей работы котла, включая температуру, давление, энтальпию, скорости, тепловосприятие и пр. по всем элементам каждого тракта.

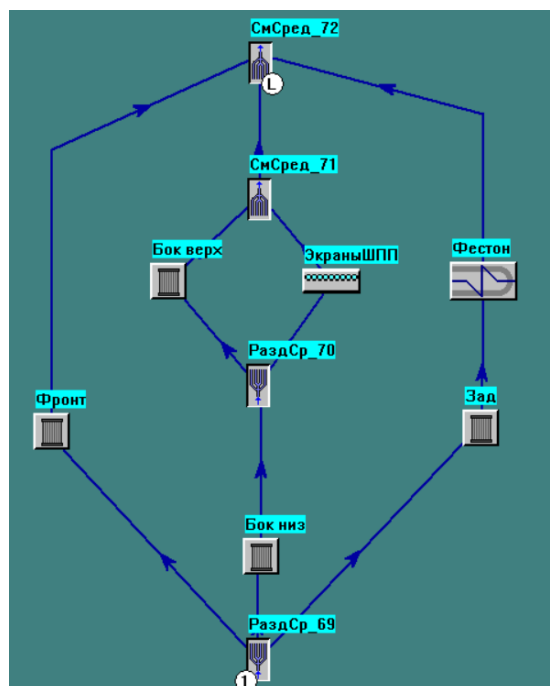


Рисунок 2.2.3 – Пример формирования схемы циркуляционного контура пароводяного тракта в Boiler Designer

Параметры	Значение	Размерность	Описание
Перебросы	нет	-	Наличие перебросных труб
P-тПов	нет	-	Расчет поверхности нагрева: 0 - нет, 1 - да
ДелПак	нет	-	Деление пов-ти на несколько элементов: 0 - нет, 1 - да
Расположение труб	шахматное	-	Расположение труб: 0-коридорное, 1- шахматное
Ток	Противоток	-	Прямоток - 0, противоток - 1, Перекрестный -2,
Dнар	32,00	мм	Наружный диаметр
sТруб	5,00	мм	Толщина стенки трубы
s1	75,00	мм	Поперечный шаг труб
s2	55,00	мм	Продольный шаг труб
Bг	2,420	м	Ширина конвективного газохода
Тип_Граз	Постоянное сечение	-	Тип сечения для прохода газов
Ag	9,450	м	Глубина конвективного газохода вдоль трубы
dcстен	0,000	м	Раст. от труб до стенки
Ng_д	30	-	К-во рядов труб по ширине газохода
Ng	20	-	К-во рядов труб по ходу газов
N_пл	1	-	Число плоскостей, в которых расположен змеевик
Nзмеевик	2	-	Число труб в змеевике
Nзах	4,0000	-	К-во заходов труб
Nпак	1	-	К-во блоков по ширине газохода
Способ расчета.	Расчет по epsilon	-	Способ расчета (учет загрязнений, обтекания и пр.)
KиспМатр	1,0000	-	Кэф. использования (зависимость от нагрузки)
Загр	0,003	м ² *ч*К/ккал	Кэф. загрязнения
Nзон	1	-	Число зон
ТипМет	Ст.20	-	Тип металла труб
аГаз	0,00	градус	Угол натекания потока газов
H	570,32000	м ²	Поверхность нагрева
Loб_за	0,000	м	Длина объема газов за пучком
Hнив	0,000	м	Высота нивелирного столба
dРном	1,000	атм	Перепад давления в номинальном режиме
МетДин	Вода	-	Методика расчета динамики
dАльфа	0,0250	-	Присосы холодного воздуха
Aз_труб	0,8000	-	Степень черноты загрязненных труб
Конструкт	нет	-	Конструктивный расчет: 0-нет, 1-Граз, 2-Тсред, 3- Q

Рисунок 2.2.4 – Пример ввода исходных данных по поверхности нагрева в Boiler Designer

2.2.2 Описание программы ANSYS Fluent

Для численного моделирования топочного процесса требуется применять большое количество математических моделей, описывающих физические процессы, происходящие в топке. Для этой цели в настоящее время используются программные комплексы вычислительной гидродинамики (CFD – Computational fluid dynamics). Получили распространение различные программы на основе CFD: ANSYS Fluent, Sigma Flame, Flow Vision и др.

За последние 10 лет ЛИТС накоплен значительный опыт численного моделирования пылеугольных котлов РФ различной мощности и конфигурации, позволяющий сделать вывод, что программа ANSYS Fluent отличается большей универсальностью по сравнению с имеющимися аналогами. Программа позволяет осуществлять моделирование течений жидкостей и газов с учётом турбулентности, межфазного взаимодействия, химических реакций, горения и прочих физических эффектов. Программный комплекс предлагает широкий выбор физических моделей для описания указанных процессов. В ANSYS реализована возможность задания кинетики гетерогенных реакций, что особенно важно при моделировании топочных процессов. Опыт показывает, что численное моделирование в ANSYS Fluent позволяет получать достоверные результаты при расчёте котлов с разными особенностями организации топочного режима. Ввиду изложенного именно ANSYS Fluent был выбран инструментом численного моделирования в настоящей работе.

Последовательность операций при моделировании топочного процесса пылеугольного котла в ANSYS Fluent следующая:

Разработка 3D-модели расчётного объекта (топочной камеры) в программе Solid Works или аналогичном программном комплексе. Загрузка 3D-модели в программу ANSYS Fluent.

Построение расчётной сетки модели с заданием конфигурации и размера расчётных ячеек в ANSYS Meshing или ICEM CFD.

Задание граничных условий расчётного объекта. Через локальные цилиндрические координаты задаётся расположение горелок в топочной камере, указываются векторы направления движения потоков через аксиальную, тангенциальную и радиальные скорости. Принимая во внимание необходимость расчёта при разных вариантах распределения воздуха и угольной пыли по горелкам, целесообразно использовать подход с заданием массовых расходов. В таком случае, вместо расчёта и задания скоростей можно перейти к заданию массового расхода и величины единичных векторов, что значительно экономит время и снижает вероятность ошибки, особенно в сложных задачах с большим количеством горелок и ячеек. Расходы соответствующих потоков (в данном случае – аэросмеси и вторичного воздуха) задаются по результатам расчёта воздушного баланса котла. Помимо входов потоков (Inlet) задаётся граничное условие «Выход» (Pressure Outlet) – плоскость, в которой заканчивается расчёт модели (при расчёте топки в качестве «Выхода» принимают её выходное окно). Последним граничным условием, которое задаётся в модели, является граничное условие «стена» (Wall). В качестве исходных данных при задании данного граничного условия принимаются температура стенки и степень черноты.

Выбор расчётных моделей и задание параметров функции Solver («решатель»).

После ввода необходимых исходных данных осуществляется проверка корректности расчётной модели. В случае, если системных ошибок не выявлено, программа готова к началу расчёта.

Решение задачи методов итераций. Перед началом расчёта задаётся ряд параметров, определяющих требуемую точность сходимости расчёта (требуемая величина невязок и др.). По результатам расчёта программа позволяет зафиксировать визуальные и численные результаты моделирования (поля температур, скоростей, концентраций продуктов сгорания и пр. выдаются вместе со шкалой значений соответствующих показателей).

Визуализация процессов, происходящих в топочной камере, получение значений требуемых параметров в различных частях модели.

2.3 Выбор объекта исследований. Описание котла БКЗ-210-140

Исследования выполнялись для котла БКЗ-210-140-9 (Е-210-13,8КТ) Томской ГРЭС-2. Выбор объекта исследования обусловлен тем, что практически все эксплуатационные проблемы, описанные в Главе I, актуальны для указанного котла. В качестве основного топлива на ТЭС используется Кузнецкий уголь марки Д, характеризующийся большим диапазоном колебания основных характеристик.

Исследуемый паровой котёл – однобарабанный, вертикально-водотрубный с естественной циркуляцией, предназначен для выработки пара при сжигании каменных и бурых углей с твёрдым шлакоудалением. В качестве резервного топлива на ТЭС применяются природный газ и мазут. Компоновка котла П-образная (рис. 2.3.1), газоплотная с цельносварными экранами.

Топка является первым (восходящим) газоходом, во втором (горизонтальном) газоходе расположен пароперегреватель. В третьем (нисходящем) газоходе расположены экономайзер и трубчатый воздухоподогреватель, установленные в рассечку.

Котёл оборудован пылесистемами с шаровой барабанной мельницей и промежуточным бункером пыли. Паропроизводительность котла составляет 210 т/ч, давление перегретого пара 13,8 МПа, температура перегретого пара – 560°C, температура питательной воды – 230°C. Температура перегретого пара на котле регулируется впрысками в тракт конденсата, вырабатываемого в УСК.

Топка котла оснащена шестью пылеугольными вихревыми горелками, расположенными встречно в два яруса (две горелки в первом ярусе, четыре – во втором ярусе) треугольником вниз на боковых стенах топки (рис. 2.3.2).

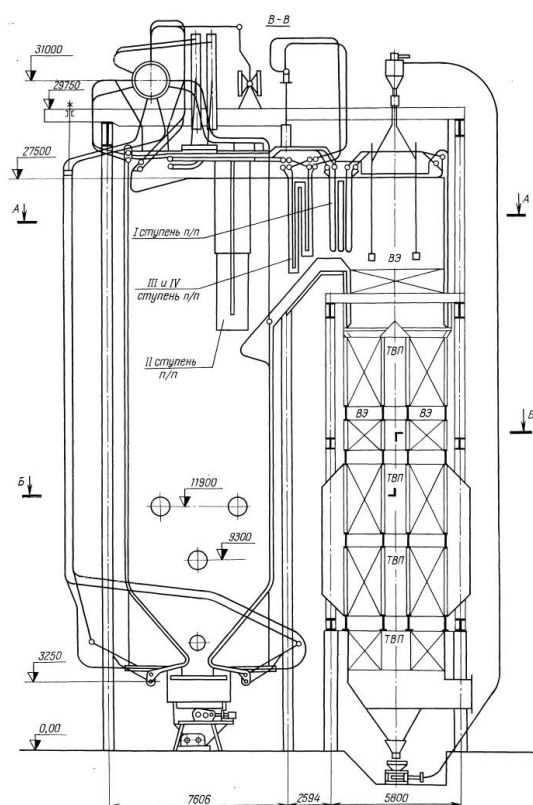


Рисунок 2.3.1 – Продольный разрез котла БКЗ-210-140 (ПП – пароперегреватель, ВЭ – водяной экономайзер, ТВП – трубчатый воздухоподогреватель)

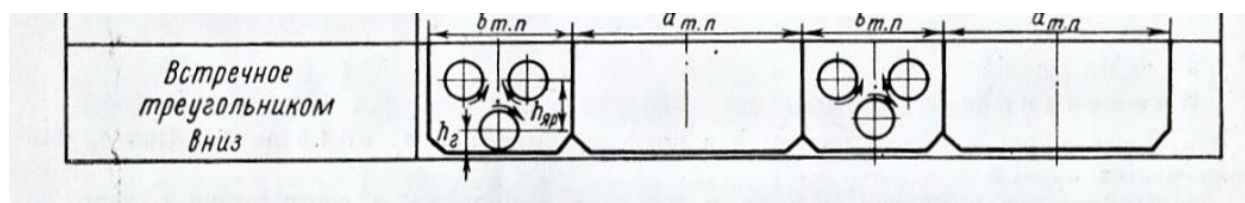


Рисунок 2.3.2 – Схема компоновки и крутки горелок

Пыль в каждую горелку подаётся по пылепроводу отдельным пылепитателем. Мазутная форсунка и газовый запальник при необходимости размещаются в центральном канале горелки. Природный газ подводится к газовому коллектору горелки и далее распределяется по газораздающим трубкам.

Барaban котла БКЗ-210-140 имеет внутренний диаметр 1600 мм, длина цилиндрической части 11300 мм, толщина стенки 112 мм, сталь 16ГНМА. Средний уровень воды в барабане расположен на отметке -200 мм от

геометрической оси. Колебания уровня возможны в пределах ± 50 мм от среднего. Осушка пара осуществляется внутрибарабанными циклонами при помощи дырчатых листов. В котле применяется двухступенчатое испарение для уменьшения расхода непрерывной продувки. Во вторую ступень испарения входят выносные циклоны 426х36 (по 2 с каждой стороны котла) вместе со средними экранами боковых стен. Для предотвращения попадания пара в опускные трубы у нижней части барабана и циклонов установлены антикавитационные решётки и крестовины. Экраны разбиты на 14 самостоятельных контуров циркуляции.

2.4 Расчётные исследования влияния угла поворота горелки на режим работы котла в условиях изменения свойств угля

По результатам расчётных исследований топочного процесса с использованием программы Boiler Designer необходимо решить следующие задачи:

Определить, в каких пределах меняется температура газов на выходе из топки при максимально возможных колебаниях характеристик угля;

Оценить возможный диапазон регулирования температуры газов на выходе из топки за счёт изменения положения факела по высоте;

Определить оптимальный рабочий диапазон изменения угла поворота горелок, при котором достигается достаточная степень регулирования топочного режима в условиях нестабильных характеристик топлива, но не возникают избыточные колебания режимных показателей работы котла и не имеет место чрезмерное усложнение конструкции горелки.

Исходными данными для создания модели служили проектные показатели котла с учетом корректировок некоторых показателей по режимной карте и экспресс-испытаниям (Приложение А). Характеристики сжигаемого угля приняты по результатам лабораторного анализа опытной партии. Уголь с данными свойствами принят в качестве базового по результатам статистической оценки. Она показала, что основные характеристики опытной

партии угля близки к усреднённым показателям топлива, сжигаемого на ТЭС в течение продолжительного периода времени.

Расчётные схемы работы котла при нагрузке 100% показаны на рис. 2.4.1-2.4.3.

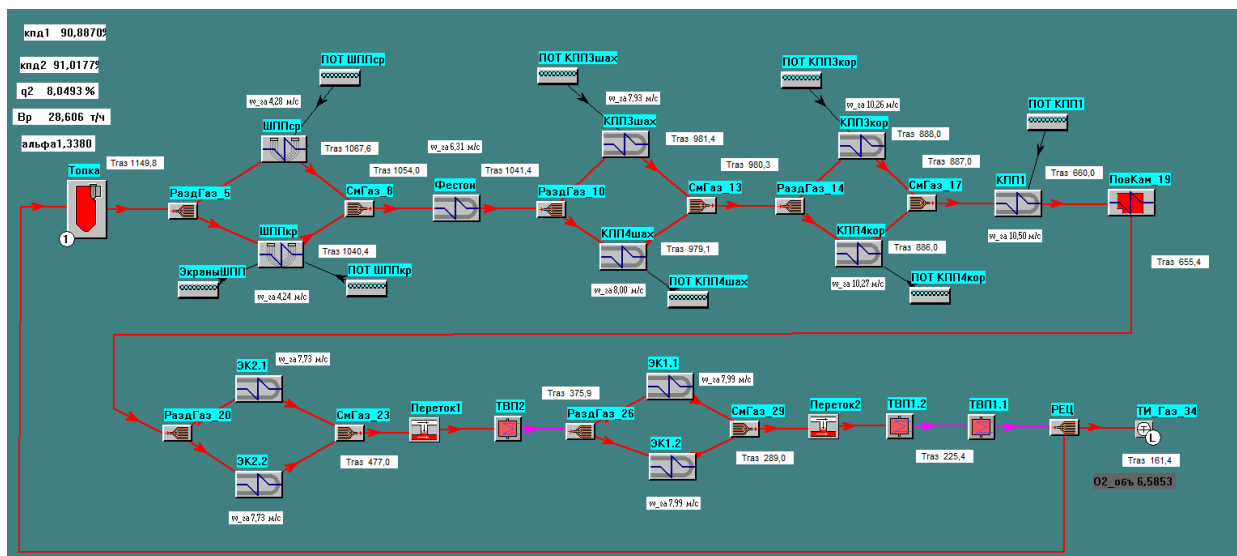


Рисунок 2.4.1 – Расчётная схема газового тракта котла

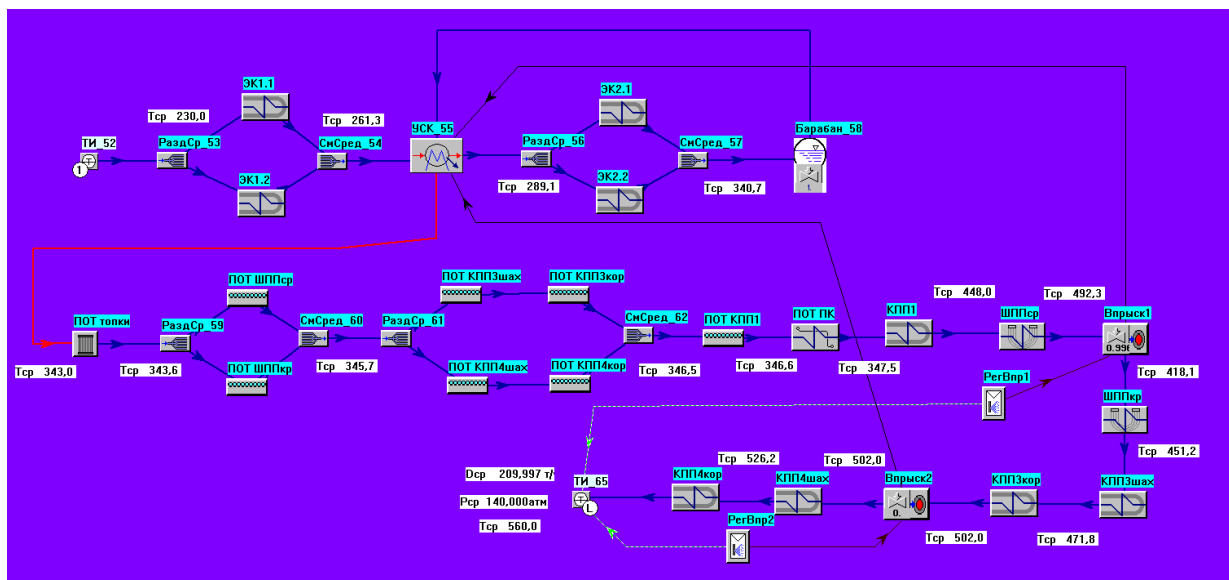


Рисунок 2.4.2 – Расчётная схема пароводяного тракта котла

Была проведена верификация расчётной модели котла в Boiler Designer с опытными данными. Сопоставление показателей работы котла,

зафиксированных в ходе экспресс-испытаний, с параметрами, полученными по результатам расчёта, приведено в табл. 2.4.1.

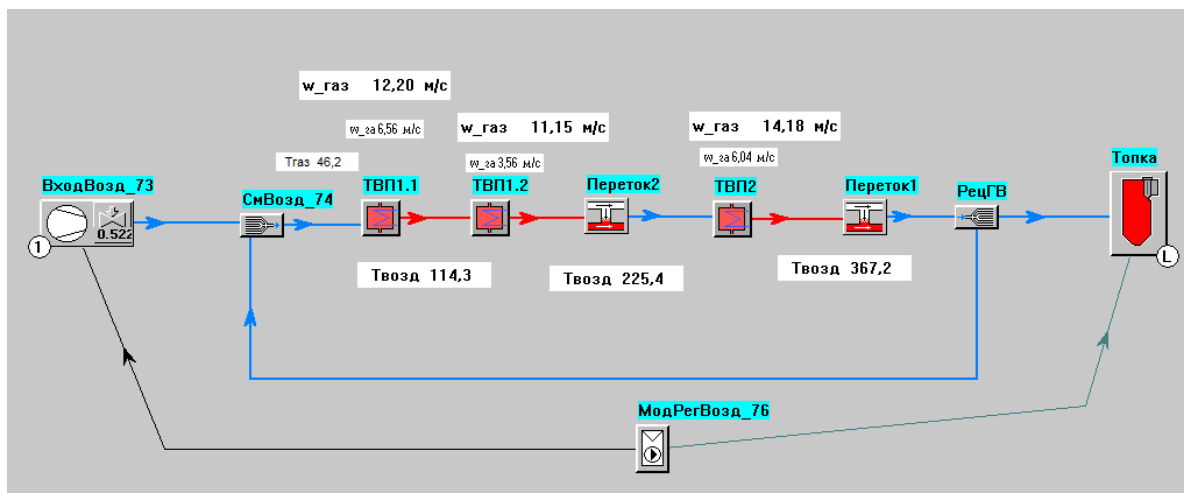


Рисунок 2.4.3 – Расчётная схема воздушного тракта котла

Таблица 2.4.1 - Сравнение опытных и расчётных значений показателей работы котла при сжигании базового угля и нагрузке 100%

№	Показатель	Значение	
		Опытное	Расчётное
1	Температура газов перед экономайзером II ступени, °C	648	656
2	Температура газов перед ТВП II ступени, °C	465	474
3	Температура газов перед ТВП I ступени, °C	281	287
4	Температура уходящих газов, °C	158	161
5	Температура горячего воздуха, °C	366	367

Анализ данных табл. 2.4.1 показывает высокую сходимость расчётных и опытных показателей. Отсюда можно сделать вывод: расчётное и опытное значения температуры газов на выходе из топки достаточно близки, что подтверждает достоверность результатов расчёта и возможность применения программы Boiler Designer.

Как отмечается в нашей статье «Исследование влияния положения факела в топке на режим работы пылеугольного котла»: «Далее были выполнены расчёты котла при использовании угля марки Д двух видов с существенно различающимися свойствами, которые были приняты в результате анализа статистики максимальных колебаний характеристик топлива. При этом

полагалось, что при реализации разрабатываемой системы управления можно будет сжигать уголь с характеристиками, изменяющимися в диапазонах 5-20% по зольности и 10-25% по влажности. Для расчёта были выбраны два крайних вида угля: «улучшенный» (зольность и влажность минимальны) и «ухудшенный» (зольность и влажность максимальны). Все прочие характеристики, включая теплоту сгорания, пересчитывались по новой влажности и зольности на основе базового угля» (Теплоэнергетика, № 4, 2024, с. 52-61). Характеристики трёх рассматриваемых углей представлены в табл. 2.4.2.

Таблица 2.4.2 – Основные характеристики трёх исследуемых углей

№	Показатель	Тип угля		
		Базовый	Улучшенный	Ухудшенный
1	Влажность на рабочую массу, %	18,71	10,0	25,0
2	Зольность на рабочую массу, %	10,99	5,0	20,0
3	Низшая рабочая теплота сгорания, МДж/кг (ккал/кг)	20,14 (4810)	24,66 (5889)	15,50 (3703)

В табл. 2.4.3 приведены основные показатели работы котла при 100%-ной нагрузке, полученные в результате расчёта в программе Boiler Designer для базового, «улучшенного» и «ухудшенного» топлив.

Результаты расчётов температуры газов на выходе из топки при сжигании трёх исследуемых углей на нагрузках 100 и 50% сведены в табл. 2.4.4. В ходе диссертационного исследования нами был сделан вывод о том, что «для углей с разными свойствами температура газов на выходе из топки может меняться: на 104°C при 100%-ной нагрузке и на 81°C при 50%-ной нагрузке котла. Столь значительные колебания температуры газов при отсутствии дополнительных средств регулирования положения факела по высоте топки оказывают существенное влияние на работу котла» (Теплоэнергетика, № 4, 2024, с. 52-61).

Таблица 2.4.3 – Основные показатели работы котла при 100%-ной нагрузке по результатам расчёта в программе Boiler Designer для трёх вариантов углей

№	Показатель, размерность	Значение		
		Базовый уголь	Улучшенный уголь	Ухудшенный уголь
1	Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки	1,338	1,280	1,338
2	Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	1,457	1,414	1,445
3	Температура газов на выходе из топки, °С	1150	1207	1103
4	Температура уходящих газов, °С	161	159	165
5	Температура горячего воздуха, °С	367	367	366
6	КПД котла, %	91,02	91,72	90,42
7	Расчётный расход топлива, т/ч	28,61	23,20	37,42
8	Температура перегретого пара, °С	560	560	560
9	Суммарный расход конденсата на впрыск, т/ч	6,80	8,91	4,83

Таблица 2.4.4 – Результаты расчёта температуры газов на выходе из топки при сжигании разных углей

№	Нагрузка, %	Температура газов на выходе из топки, °С		
		Базовый уголь	Улучшенный уголь	Ухудшенный уголь
1	100	1150	1207	1103
2	50	948	991	910

Высота положения ядра факела в топке котла при расчётах по нормативному методу характеризуется параметром М. Данный параметр рассчитывается в зависимости от относительной высоты расположения горелок в топке, типа и взаимного расположения горелок и прочих факторов. При использовании поворотных устройств для расчёта относительной высоты расположения горелок в соответствии с [108] вводится поправка $\pm 0,1$ на $\pm 20^\circ$ поворота. Были определены значения температуры газов на выходе из топки при разных углах поворота горелки для трёх исследуемых углей (табл. 2.4.5).

Поворот на $\pm 10^\circ$ даёт средний диапазон регулирования температуры газов 61°C . Это ощутимо меньше величины разброса в 104°C при колебании свойств угля, которую необходимо компенсировать с помощью регулирования положения факела. Очевидно, что для достаточной компенсации влияния непостоянства свойств угля следует рассматривать только углы поворота $\pm 15-20^\circ$. Расчётные данные показывают, что изменение угла поворота горелки в диапазоне $\pm 15^\circ$ позволяет регулировать температуру газов на выходе из топki, в среднем диапазоне $\sim 90^\circ\text{C}$, а поворот на $\pm 20^\circ$ даёт регулирование в среднем диапазоне $\sim 120^\circ\text{C}$.

Таблица 2.4.5 - Изменение температуры газов на выходе из топki при повороте горелок

Угол поворота горелок, °	Параметр М	Температура газов на выходе из топki, °C (расчёт в Boiler Designer)		
		Базовый уголь	Улучшенный уголь	Ухудшенный уголь
-20	0,444	1097	1149	1053
-15	0,432	1109	1162	1064
-10	0,420	1122	1176	1076
-5	0,407	1136	1191	1089
0	0,394	1150	1207	1103
+5	0,382	1165	1225	1116
+10	0,369	1182	1244	1132
+15	0,357	1198	1262	1147
+20	0,344	1216	1281	1164

Поворот на $\pm 20^\circ$ логично обеспечивает больший диапазон регулирования температуры, однако с точки зрения достижения поставленной задачи и поворот на $\pm 15^\circ$ почти полностью компенсирует эффект колебания характеристик угля. Поэтому при определении оптимального значения диапазона угла поворота следует принимать во внимание влияние дополнительных факторов. Во-первых, это усложнение конструкции горелки при увеличении угла поворота, возникающее в результате:

необходимости увеличения размера амбразуры;

возрастания риска прямого воздействия факела на экраны;

увеличения длинны хода подвижного щита, следовательно – большего перепада температур металла щита;

усложнения узлов уплотнения внешнего канала горелки и щита с топкой ввиду увеличения объёма уплотняющего материала в условиях ограниченного пространства и др.

Во-вторых, увеличение диапазона угла поворота до $\pm 20^\circ$ приводит к более заметным колебаниям топочного режима по сравнению с диапазоном $\pm 15^\circ$, как показывают данные табл. 2.4.6.

Таблица 2.4.6 – Изменение режимных показателей работы котла при различных диапазонах угла поворота горелок

Угол поворота горелок	Параметр	Диапазон изменения показателя (расчёт в Boiler Designer)		
		Базовый уголь	Улучшенный уголь	Ухудшенный уголь
-20/+20	Расчётный расход топлива, т/ч	28,560 – 29,668	23,141 – 24,189	37,352 – 38,668
	Диапазон изменения расхода топлива, т/ч	1,108	1,048	1,316
	Температура уходящих газов, °С	159,4 – 165,2	156,5 – 162,4	162,5 – 168,3
	Диапазон изменения температуры уходящих газов, °С	5,8	5,9	5,8
-15/+15	Расчётный расход топлива, т/ч	28,571 – 29,350	23,149 – 23,922	37,367 – 38,257
	Диапазон изменения расхода топлива, т/ч	0,779	0,773	0,890
	Температура уходящих газов, °С	159,9 – 164,2	156,9 – 161,4	163,0 – 167,2
	Диапазон изменения температуры уходящих газов, °С	4,3	4,5	4,2

При повороте горелок изменяется паропроизводительность котла. В результате регулятор расхода топлива изменяет расход таким образом, чтобы компенсировать колебания паропроизводительности. Соответственно, чем больше диапазон поворота горелок, тем сильнее выражается изменение расхода топлива. По сути реализуется регулируемое колебание режима, и нужно стремиться его минимизировать. В этом плане меньший диапазон

поворота предпочтительнее в случае, если он позволяет решить исходную задачу. То же относится к диапазону изменения температуры уходящих газов: при повороте на $\pm 20^\circ$ она изменяется на $1,5^\circ\text{C}$ больше, чем при повороте на $\pm 15^\circ$. Рост температуры уходящих газов на $1,5^\circ\text{C}$ при прочих неизменных условиях приводит к снижению КПД котла примерно на 0,10%. Это достаточно заметная величина, такое снижение нужно максимально нивелировать.

Каждый из перечисленных факторов по отдельности можно считать незначительным, но в совокупности они позволяют сделать вывод о том, что диапазон поворота горелок $\pm 15^\circ$ является оптимальным.

В нашей статье «Исследование влияния положения факела в топке на режим работы пылеугольного котла» отмечается, что «опыт эксплуатации котлов показывает, что при изменении условий тепловосприятости в топке следует провести оценку надёжности циркуляции в экранах котла [97, 93].

Расчётные исследования циркуляции при повороте угла горелок показали, что существенных изменений в работе циркуляционных контуров топки не происходит» (Теплоэнергетика, № 4, 2024, с. 52-61).

Скорость циркуляции изменялась в пределах 0,9-1,3 м/с, что существенно выше предельной величины в 0,3 м/с [55]. Скорость смеси колебалась в пределах 1,4-2,2 м/с, что примерно в 5 раз меньше предельной величины по условию эрозионно-коррозионного износа, равной 10 м/с [31]. Минимальный коэффициент запаса по условию устойчивого движения среды наблюдался по условию опрокидывания и составил 1,2 для первой панели фронтального экрана, что выше рекомендуемого в [14] значения, равного 1,1. Кратность циркуляции незначительно изменялась в пределах 3%, поэтому проверка на кризис теплообмена признана нецелесообразной.

2.5 Оценка изменения допустимой температуры газов по условиям отсутствия шлакования в условиях колебания свойств угля

Как отмечается в нашей статье «Исследование влияния положения факела в топке на режим работы пылеугольного котла», «Допустимое значение температуры газов на выходе из топки во многом определяется шлакующими свойствами сжигаемого угля. При этом характеристики углей Кузнецкого бассейна, как уже отмечалось в Главе 1, могут изменяться в широком диапазоне даже в пределах одного разреза. Таким образом, уголь одной и той же марки может обладать совершенно разными шлакующими свойствами. Например, в [117] представлены характеристики угля марки ДР разреза Моховский, близкого по нескольким показателям углю, используемому на Томской ГРЭС-2. Для данного угля значения температуры начала шлакования $t_{\text{шл}}$ колеблются в диапазоне от 980 до 1040°C. Однако существуют угли и с большим диапазоном колебания $t_{\text{шл}}$ (разность температур составляет 100°C и более)» (Теплоэнергетика, № 4, 2024, с. 52-61).

Для базового угля был выполнен анализ химического состава минеральной части, что позволило провести расчёт температуры начала шлакования $t_{\text{шл}}$ и допустимой температуры газов на выходе из топки по условиям отсутствия шлакования ширм (Приложение Б). Результаты расчёта приведены в табл. 2.5.1.

Таблица 2.5.1 – Условия шлакования ШПП и КПП для базового угля

№	Показатель	Значение
1	Допустимая температура газов на выходе из топки по условиям отсутствия шлакования, °C	1148
2	Расчётная температура газов на выходе из топки, °C	1150
3	Температура начала шлакования $t_{\text{шл}}$, °C	1013
4	Допустимая температура газов перед КПП1 по условиям отсутствия шлакования, °C	$0,95 \cdot t_{\text{шл}} = 962$
5	Расчётная температура газов перед КПП1, °C	1041

Данные табл. 2.5.1 показывают, что при сжигании базового угля существует большой риск шлакования КПП (при этом следует отметить, что критерий проверки $0,95 \cdot t_{\text{шл}}$ не является универсальным и требует экспериментальной проверки в фактических условиях работы котла).

Характеристики «улучшенного» и «ухудшенного» углей принимались на основе обобщения статистических данных, соответственно провести анализ состава их минеральной части не представлялось возможным. Для примерной оценки возможного диапазона колебания шлакующих свойств по [117] были подобраны аналоги – угли, по своим основным характеристикам максимально близкие к «улучшенному» и «ухудшенному». В качестве аналога «ухудшенного» был принят уголь Осинниковского разреза, для «улучшенного» - уголь разреза Киселевского.

Выполненные расчёты показали, что для трёх исследуемых углей диапазон колебания допустимой по условиям отсутствия шлакования температуры газов составил 67°C . В ходе диссертационного исследования нами был сделан вывод о том, что при сжигании углей со значительным диапазоном изменения $t_{\text{шл}}$ допустимое значение температуры газов на выходе из топки по условиям шлакования также будет меняться в широких пределах. В подобных случаях чрезвычайно важно иметь возможность оперативно регулировать топочный режим, что позволит обеспечить необходимую температуру газов на выходе из топки.

2.6 Проведение математического моделирования топочного процесса с регулированием положения факела по высоте в программе ANSYS Fluent

2.6.1 Построение расчётной сетки. Принятые допущения

В основе моделирования с использованием ANSYS Fluent лежит метод конечных объёмов, применение которого подразумевает необходимость построения расчётной сетки. Качество сетки существенно влияет на результаты моделирования. В случае неправильного построения сетки могут

возникать искажённые картины взаимодействия потоков, аномальные значения по температурам, давлению и турбулентной вязкости.

Количество элементов расчётной сетки существенно влияет на корректность результатов моделирования: большее число ячеек повышает точность расчётов. Однако при этом растёт и значение требуемой оперативной памяти компьютера, а также возникает необходимость увеличения количества ядер процессора задействованных в расчёте (иначе время решения задачи может оказаться чрезмерным). Ввиду сказанного целесообразна реализация сбалансированной расчётной сетки, количество ячеек в которой – минимально возможное по условиям обеспечения корректных результатов расчёта.

Для определения оптимального количества ячеек проводится серия расчётных опытов с постепенным увеличением количества элементов в расчётной сетке (за счёт уменьшения размеров ячеек). Процесс заканчивается на этапе, когда дальнейшее измельчение сетки не оказывает значимого влияния на выходные значения параметров.

После построения сетки необходима проверка её качества (требуется исключить наличие отрицательных объёмов элементов и др). Для контроля качества сетки применяются три критерия: качество ортогональности (orthogonal quality) для прямоугольных ячеек и призм, соотношение сторон (aspectratio) и коэффициент скошенности (skewness). Ячейки низкого качества имеют значение orthogonal quality, близкое к 0, ячейки высокого качества – близкое к 1 (при любых условиях значение параметра не должно быть менее 0,01).

Коэффициент скошенности характеризует разницу между фактическим и оптимальным (эквивалентного размера) элементами сетки (рекомендуется, чтобы коэффициент не превышал 0,95).

ICEM и Meshing – генераторы сетки, встроенные в ANSYS Fluent. И тот, и другой реализуют аналогичные в целом алгоритмы генерации сетки. В настоящей работе использовался более простой по интерфейсу генератор

Meshing. Наиболее распространёнными элементами сетки являются тетраэдры и призмы. Для расчёта моделей с относительно небольшими скоростями потоков (до 50 м/с), и с минимальным влиянием конвективного теплообмена применение призматических ячеек нецелесообразно, так как значительно перегружает сетку. Поэтому при расчёте горения угольной пыли в традиционных топках применяется тетраэдральная сетка с локальным сгущением. Именно такой подход был использован для моделирования топки котла БКЗ-210-140.

В нашей статье «Описание конструкции и моделирование работы вихревой поворотной горелки при сжигании угля и природного газа» отмечается, что «предыдущий опыт расчётов в ANSYS котлов со встречным расположением горелок показал, что эффекты в области взаимодействия потоков от встречно ориентированных горелок (с учётом направления их крутки) не оказывают существенного влияния на результаты моделирования. Вследствие этого, поскольку расположение горелок на рассматриваемом котле встречное, и все показатели работы по двум сторонам топки идентичны для увеличения скорости расчёта была смоделирована половина реальной топочной камеры (рис. 2.6.1) с вводом граничного условия симметричности» (Теплоэнергетика, № 8, 2024, с. 82-94).

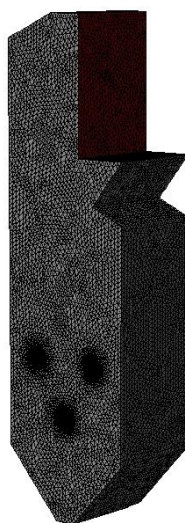


Рисунок 2.6.1 – Модель топки с расчётной сеткой

Это позволило обеспечить существенное сокращение числа ячеек без ухудшения качества расчёта. Общее количество ячеек составило 3 000 000, что является оптимальным по опыту расчёта пылеугольных котлов подобной конфигурации с точки зрения точности и умеренного времени расчёта.

Задачи с горением угля крайне требовательны к качеству ячеек и особенно – к их размеру в корне факела. Это связано с тем, что расчёт взаимодействия углеродных частиц и окислителя считается в формате псевдо-динамики, поэтому учитывается время пребывания элементарного объёма газа и пыли в ячейке. Если это время будет слишком большое, то уголь в расчётной модели может не воспламениться. Следует отметить, что в настоящей работе рассматривается задача с вихревыми горелками, особенностью которых является наличие зоны обратных токов. Для корректного формирования векторной картины течения газов в этой зоне также требуется сгущение (измельчение сетки). Для учёта указанных факторов в области расположения корня факела выполняется сгущение сетки методом Sphere of Influence. В этом случае, используя инструментальный ANSYS Meshing, задаётся координата мнимой сферы внутри объёма, её радиус и размер ячейки. Далее алгоритм строит сетку с учётом глобального размера ячейки, а вторым шагом выделяет все ячейки, попавшие в мнимую сферу, и уменьшает их размер до заданного, сохраняя при этом взаимосвязи с внешним объёмом.

Для сокращения количества ячеек при построении сетки моделируются только выходные поверхности горелок в плоскости экранов топки. В качестве характеристик потока задаётся массовый расход, направление движения, температура, состав (концентрация веществ) и др. Экраны топки задаются плоскими поверхностями. За выход из модели принята плоскость выходного окна топки, проходящая через первый ряд труб ширмового пароперегревателя. Присосы воздуха отнесены к плоскости в нижней части холодной воронки (зона выхода твёрдого шлака).

2.6.2 Выбор математических моделей

2.6.2.1 Модель турбулентности

Для задания условий турбулентности потоков с точки зрения сочетания точности расчёта и минимизации вычислительных мощностей подходит модель RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) - осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса [119]. Данные уравнения решаются относительно параметров, осреднённых по времени [134, 122, 124]. Для получения замкнутой системы уравнений требуется использовать модели турбулентности [119, 136]. В последние годы для решения подобных задач часто применяют модели турбулентности Standard k-ε model и Realizable k-ε model [122, 124]. Опыт ЛИТС показывает, что при моделировании топочного процесса пылеугольных котлов наибольшую точность расчётов позволяет обеспечить Realizable k-ε model, которая использовалась и в данной работе.

2.6.2.2 Модель радиационного теплообмена

Для моделирования излучения в ANSYS представлены модель Discrete Ordinates [123] и модель P-1. Модель Discrete Ordinates (DO) характеризуется большей точностью и, соответственно, требует применения повышенных вычислительных мощностей. Она подходит для всех условий излучения и даёт корректные результаты при любой величине толщины излучающего слоя. С учётом того, что в топочной камере преимущественную роль играет именно радиационный теплообмен, выбор модели DO является предпочтительным.

2.6.2.3 Модель движения частиц угля

При доле твёрдой фазы в расчётной объёме менее 10% (условие, соответствующее топке пылеугольного котла, где основную долю объёма занимают воздух и дымовые газы) при моделировании движения частиц угля в ANSYS рекомендуется использовать метод Эйлера-Лагранжа (Discrete Phase Model, DPM). Движение дискретной фазы в газовой фазе в этом случае

реализуется с учётом аэродинамики потоков в топке, их взаимного обмена импульсом, энергией и массой.

При выборе модели DPM задаются необходимые исходные данные: температура и размер твёрдых частиц, направление и скорость их движения и др. Размер частиц задаётся с учётом закона Розина-Раммлера, определяющего разбивку частиц по фракционному составу. При этом вводится значение коэффициента полидисперсности, минимальный, максимальный и средний диаметры частиц. Размеры частиц при использовании модели DPM могут быть существенно меньше размера ячеек расчётной сетки.

2.6.2.4 Модель выхода летучих

В ANSYS предлагается несколько моделей выхода летучих (Single Kinetic Rate [119], Constant Rate [119], Chemical Percolation Devolatilization [119, 118] и др). В данной работе использовалась модель Single Kinetic Rate (кинетическая модель единичного расхода) как наиболее апробированная и не требующая применения большого массива исходных данных. В данной модели выход летучих моделируется с учётом закона Аррениуса со стандартными данными по энергии активации и предэкспоненциальному множителю [120].

2.6.2.5 Модель горения

Горение летучих рассчитывалось с использованием модели Species Transport [119] и модели Multiple-Surface-Reaction с заданием кинетики горения углерода. Модуль Species Transport реализует смешение и перемещение химических веществ, подразумевая как возможность протекания химических реакций, так и её отсутствие. В случае исследуемой задачи (гетерогенный процесс сжигания угольной пыли) горение может протекать на поверхности частицы, в объёме или в пористой области.

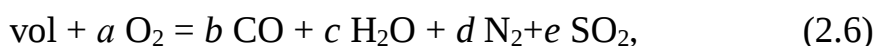
Горение углерода моделируется с помощью следующих химических реакций:



где $C < S >$ – Содержание твёрдого углерода (carbon solid).

Реакция (2.1) определяет механический недожог топлива.

Также при моделировании задаются реакции горения водорода, монооксида углерода и летучих:



где vol – Летучие компоненты топлива (volatiles), a, b, c, d, e – стехиометрические коэффициенты.

Также в программу вводятся основные параметры указанных реакций: энергия активации и предэкспоненциальный множитель (табл. 2.6.1).

Таблица 2.6.1 – Параметры реакций

Номер реакции	Параметр реакции	
	Энергия активации (E_a), Дж/кмоль	Предэкспоненциальный множитель (k)
2.4	$3,1 \times 10^7$	$9,87 \times 10^8$
2.5	$1,7 \times 10^8$	$2,239 \times 10^{12}$
2.6	$2,027 \times 10^8$	$2,119 \times 10^{11}$

2.6.3 Сходимость задачи и валидация выбранной модели

Решение задачи при численном моделировании осуществляется итерациями – до достижения сходимости. Критерии достижения сходимости следующие:

Основные расчётные переменные принимают постоянные значения, не меняющиеся при дальнейших итерациях;

Небаланс энергии и массы на входе и выходе из модели незначителен [135];

Абсолютные значения невязки переменных для всех уравнений (за исключением излучения и энергии) не превышают 10^{-3} , а для уравнений излучения и энергии не превышают 10^{-6} .

Для подтверждения достоверности результатов численного моделирования следует подтвердить корректность применяемых математических моделей в условиях топки пылеугольного котла. С этой целью обычно проводится валидация – сопоставление предварительных результатов моделирования с достоверными экспериментальными данными.

Валидация моделей для котла БКЗ-210-140 проводилась путём сравнительного анализа результатов моделирования с результатами испытаний проведённых непосредственно на котельной установке Томской ГРЭС-2. После корректировки ряда констант и значений энергии активации была зафиксирована высокая степень корреляции модельных и опытных данных. Кроме того, исследования опирались на большой опыт ЛИТС в части моделирования в ANSYS пылеугольных котлов: П-57 Троицкой ГРЭС, БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-5 и др. В данных случаях экспериментальные исследования [52, 105, 34] также показали, что результаты моделирования в ANSYS с применением выбранных моделей дают хорошую сходимость с фактическими показателями работы котлов.

2.6.4 Результаты численного моделирования

Расчёты выполнялись как для исходного (базового) варианта работы котла (угол положения горелок 0°), так и для их положений относительно горизонтальной оси $+15$ и -15° . Результаты расчёта базового варианта работы котла представлены на рис. 2.6.2-2.6.5.

Как отмечается в нашей статье «Описание конструкции и моделирование работы вихревой поворотной горелки при сжигании угля и природного газа», «Предварительно было выполнено моделирование топочного режима при

использовании исходных (неповоротных) горелок (Приложение В). Сравнительный анализ результатов моделирования показал, что условия воспламенения топлива при использовании новых горелок улучшаются: в этом варианте зона обратных токов (присос горячих газов в область воспламенения) выражена сильнее. Концентрация СО на выходе из топки в варианте с исходными горелками выше, что обуславливает более высокие потери с недожогом. Потери с механическим недожогом невелики в обоих вариантах, но при использовании новых горелок достигается небольшое снижение q_4 » (Теплоэнергетика, № 8, 2024, с. 82-94).

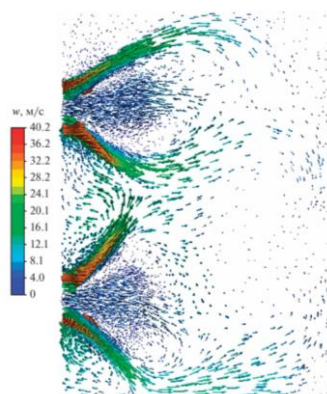


Рисунок 2.6.2 – Векторное поле скоростей на уровне верхнего яруса горелок

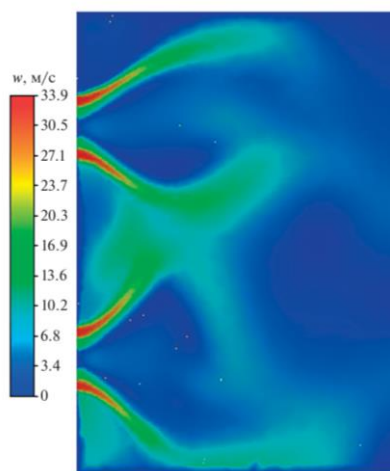


Рисунок 2.6.3 – Поле скоростей на уровне верхнего яруса горелок

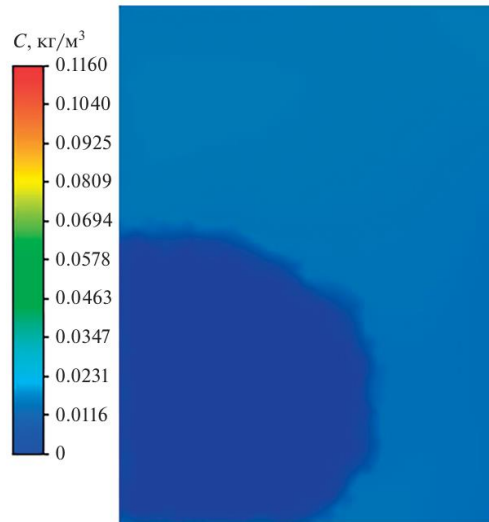


Рисунок 2.6.4 – Поле концентрации СО перед ширмовым пароперегревателем

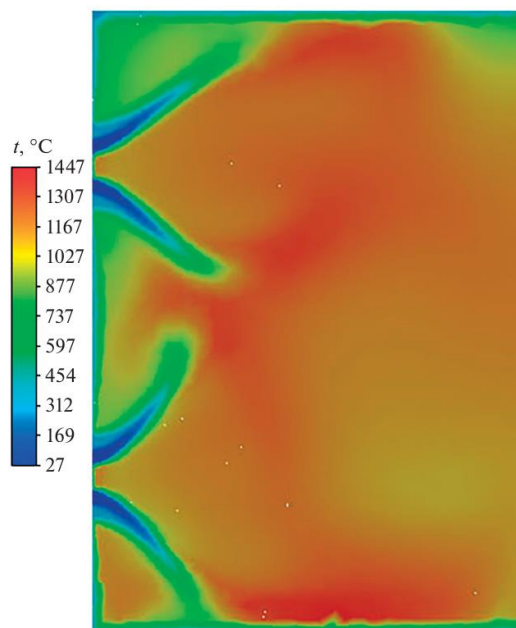


Рисунок 2.6.5 – Поле температур на уровне верхнего яруса горелок

На рис. 2.6.6 показано распределение температур в топке. Средняя расчётная температура газов на выходе из топки составляет 1150°C, что практически идеально соответствует результатам расчёта по нормативному методу.

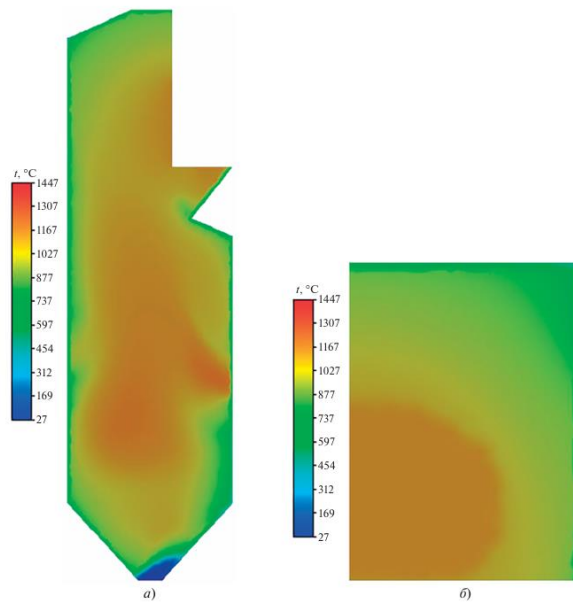


Рисунок 2.6.6 – Поле температур при угле поворота горелки 0° в поперечном сечении топки (а) и в выходном окне топки (б)

Картина воспламенения и выгорания угля представляется логичной: на начальном этапе выделяется летучие компоненты (рис. 2.6.7), которые сгорают в первую очередь [88].

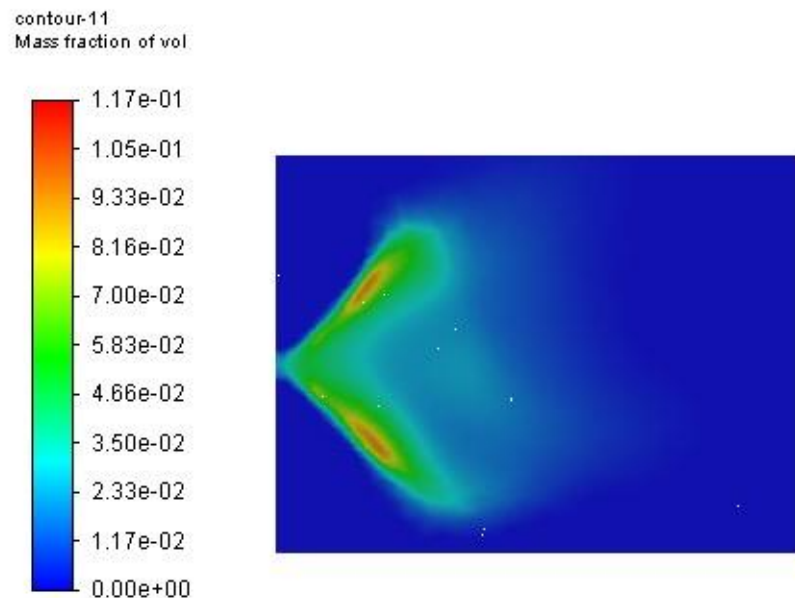


Рисунок 2.6.7 – Поле летучих на уровне горелок

В зоне горения образуется СО (рис. 2.6.8), который практически полностью выгорает до выхода газов из топки.

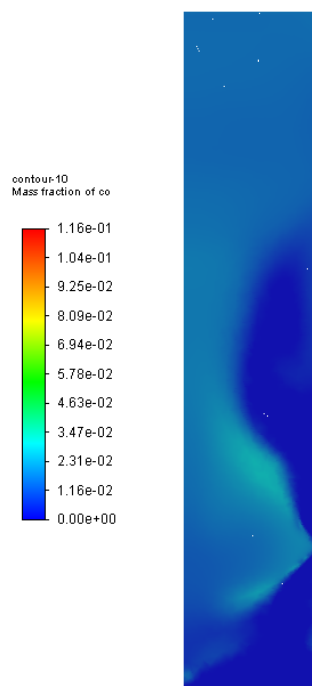


Рисунок 2.6.8 – Поле CO в продольном сечении топки

Значительная концентрация твёрдых частиц присутствует только на начальном участке факела (рис. 2.6.9).

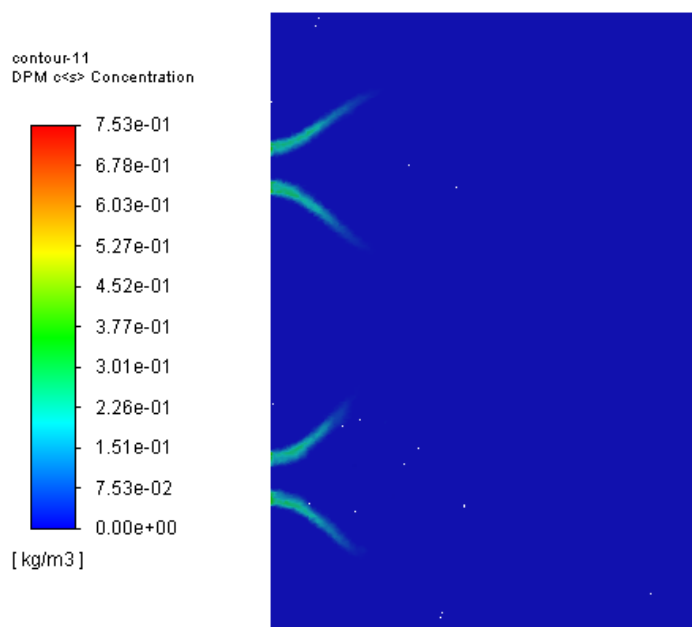


Рисунок 2.6.9 – Поле концентрации твёрдой фазы на уровне горелок

На рис. 2.6.10-2.6.11 представлены результаты расчёта варианта с поворотом горелок вверх на 15° , которые показывают, что температура газов на выходе из топки при повороте горелок вверх на 15° повышается в среднем на 50°C .

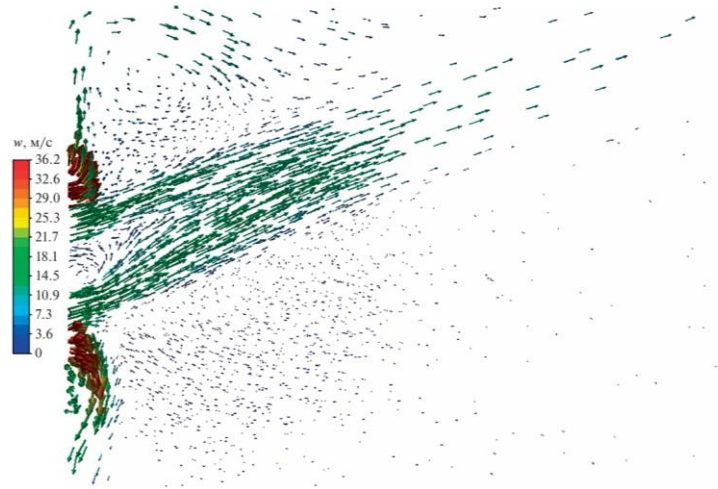


Рисунок 2.6.10 – Векторное поле скоростей при угле поворота горелки $+15^\circ$

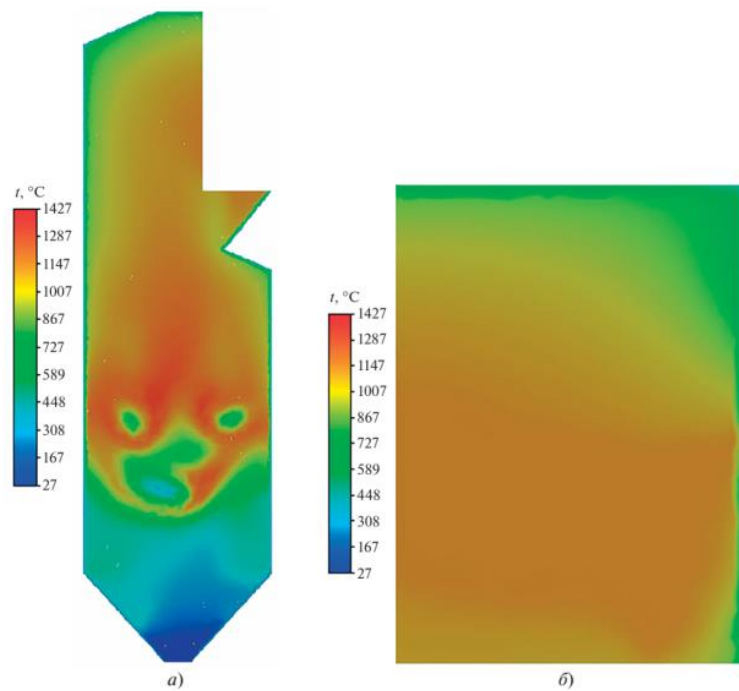


Рисунок 2.6.11 – Поле температур при угле поворота горелки $+15^\circ$ в поперечном сечении топки (а) и в выходном окне топки (б)

Значение потерь с механическим недожогом остаётся примерно на том же уровне, как и при нулевом угле поворота – средняя расчётная концентрация твёрдых частиц составляет $0,00250 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 2.6.12-2.6.13 представлены результаты расчёта варианта с поворотом горелок вниз на 15° .

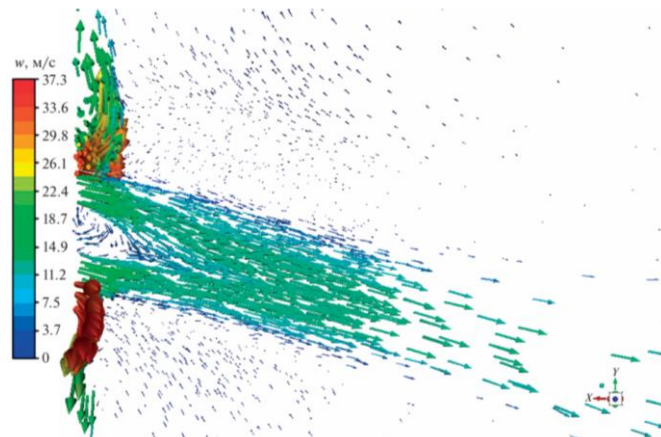


Рисунок 2.6.12 – Векторное поле скоростей при угле поворота горелки -15°

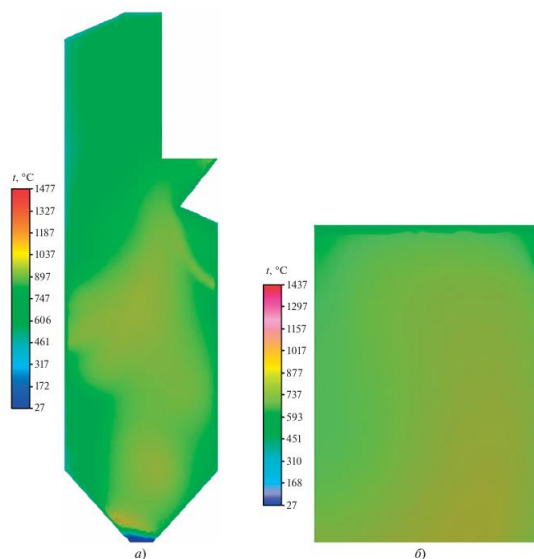
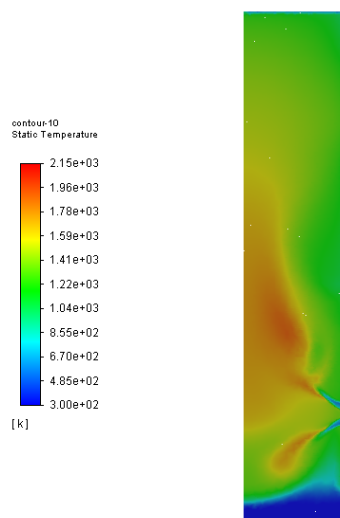


Рисунок 2.6.13 – Поле температур при угле поворота горелки -15° в поперечном сечении топки (а) и в выходном окне топки (б)

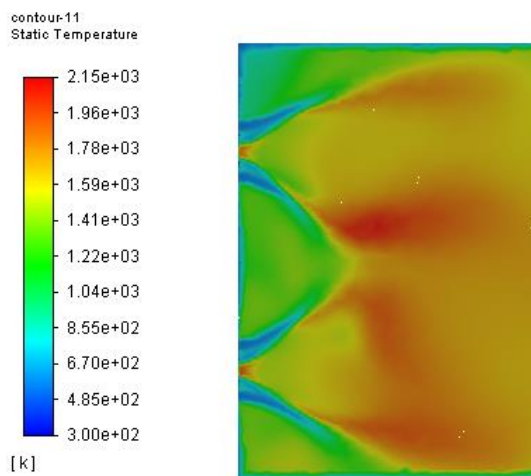
В ходе диссертационного исследования нами был сделан вывод о том, что «температура газов на выходе из топки в этом варианте закономерно снижается, причём значительно: примерно на 70°C . Наблюдается некоторое

увеличение недожога (средняя расчётная концентрация твёрдых частиц составляет $0,00756 \text{ кг/м}^3$) относительно предыдущих вариантов расчёта» (Теплоэнергетика, № 8, 2024, с. 82-94).

Для «улучшенного» и «ухудшенного» углей было выполнено моделирование топочного процесса при угле поворота горелки 0° с целью получения дополнительных данных при сравнении результатов расчёта по НТР и ANSYS. Результаты моделирования при сжигании «улучшенного» угля представлены на рис. 2.6.14-2.6.15.



*Рисунок 2.6.14 – Поле температур в продольном сечении топки
(вариант с «улучшенным» углем)*

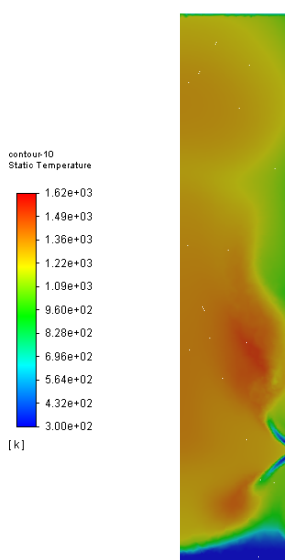


*Рисунок 2.6.15 – Поле температур на уровне верхнего яруса горелок
(вариант с «улучшенным» углем)*

Как отмечается в нашей статье «Описание конструкции и моделирование работы вихревой поворотной горелки при сжигании угля и природного газа», «Расчётная температура газов на выходе из топки в данном варианте составила 1218°C , что весьма близко к значению этого показателя в программе Boiler Designer (1207°C). Как и предполагалось, сжигание «улучшенного» угля сопровождается снижением недожога: средняя расчётная концентрация твёрдых частиц составляет $0,00139 \text{ кг/м}^3$ - это минимальное значение из всех рассмотренных вариантов» (Теплоэнергетика, № 8, 2024, с. 82-94).

Результаты моделирования при сжигании «ухудшенного» угля представлены на рис. 2.6.16-2.6.17.

Расчётная температура газов на выходе из топки при сжигании «ухудшенного» угля составила 1103°C , что практически идеально соответствует результатам расчёта в программе Boiler Designer. Использование высоковлажного и высокозольного угля приводит к некоторому увеличению недожога: средняя расчётная концентрация твёрдых частиц составляет $0,00307 \text{ кг/м}^3$. Однако это увеличение можно считать незначительным.



*Рисунок 2.6.16 – Поле температур в продольном сечении топки
(вариант с «ухудшенным» углем)*

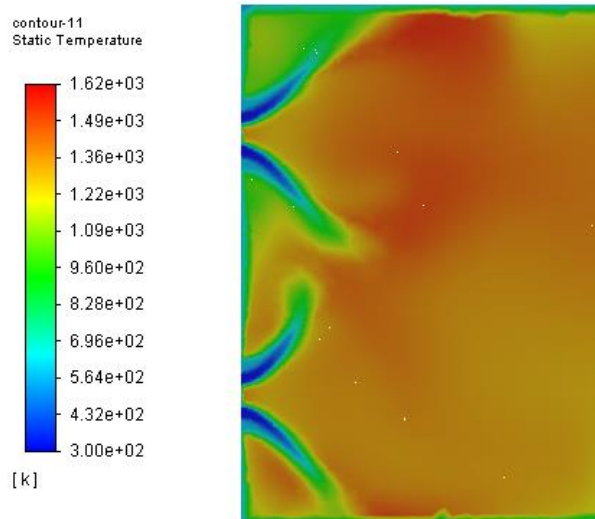


Рисунок 2.6.17 – Поле температур на уровне верхнего яруса горелок
(вариант с «ухудшенным» углем)

В табл. 2.6.2 приведены сравнительные результаты расчёта температуры газов на выходе из топки по НТП и по ANSYS Fluent.

Таблица 2.6.2 – Сравнение результатов расчёта по НТП и в ANSYS Fluent

№	Угол поворота горелок, °	Температура газов на выходе из топки, °C	
		расчёт по НТП	расчёт в ANSYS
1	-15	1109	1085
2	0	1150	1155
3	+15	1198	1205

Следует отметить, что при повороте вверх изменения температуры от средней величины практически совпадают: 48°C в Boiler Designer, 50°C в ANSYS Fluent. А вот изменения от средней величины при повороте вниз значительно отличаются: 41°C в Boiler Designer, 70°C в ANSYS Fluent. При расчёте по НТП для всех трёх углей тенденция такова, что эффект увеличения температуры газов при повороте горелок вверх на 5-10°C выше, чем эффект её снижения при повороте вниз. По результатам в ANSYS Fluent для базового угля наблюдается обратная картина.

Результаты моделирования показывают, что при смещении факела вниз возникает некоторое увеличение потерь с механическим недожогом за счёт

сепарации несгоревших частиц пыли в холодную воронку (растёт концентрация частиц несгоревшего углерода на уровне холодной воронки). Можно высказать гипотезу о том, что ввиду роста недожога при повороте горелок вниз в топке в целом выделяется несколько меньше тепла, чем при горизонтальном положении горелок или при их повороте вверх. В этом случае поправка к параметру M при повороте горелки вниз должна быть большей, чем при повороте вверх.

При расчёте в *Boiler* для базового угля температура газов на выходе из топки при повороте горелок вниз, близкая к значениям, полученным в *ANSYS*, достигается при величине параметра $M=0,450$. Такое значение M получается в случае принятия величины поправки на поворот горелок не $0,1$ на 20° поворота (как сейчас указано в НТР), а $0,15$ на 20° поворота. Таким образом при повороте вверх действует поправка $0,1/20^\circ$, а при повороте вниз $0,15/20^\circ$.

Однако в настоящее время расчётных и опытных данных недостаточно для однозначных выводов, требуется продолжение исследований и накопление базы данных для разных систем сжигания.

В ходе диссертационного исследования нами был сделан вывод о том, что «результаты расчёта основных параметров топочного режима в программе *ANSYS Fluent* подтверждают высокую эффективность регулирования уровня температур в топке за счёт изменения вектора начального участка факела. При этом диапазон угла поворота горелок $\pm 15^\circ$ является оптимальным с точки зрения регулирования топочного процесса» (Теплоэнергетика, № 8, 2024, с. 82-94).

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Результаты расчётных исследований на основе котла БКЗ-210-140 позволяют сделать вывод о том, что нестабильные значения основных характеристик сжигаемых углей обуславливают колебания температуры газов на выходе из топки в широком диапазоне. Для углей с разными свойствами температура газов на выходе из топки менялась: на 104°C при 100%-ной нагрузке и на 81°C при 50%-ной нагрузке котла. Столь значительные колебания температуры газов при отсутствии дополнительных средств регулирования положения факела по высоте топки оказывают существенное влияние на температуру перегретого пара.

Моделирование топочного процесса в котле БКЗ-210-140 с использованием программы ANSYS Fluent показывает, что изменение вектора начального участка факела по высоте позволяет добиться диапазона регулирования температуры газов на выходе из топки на уровне 100-120°C. Расчёты в программе Boiler Designer подтверждают эффективность регулирования положения факела, но с более узким диапазоном – 90°C. Сделан вывод о том, что поправка, вводимая для параметра М при повороте горелок вниз, должна быть больше, чем поправка при повороте вверх. При повороте вверх действует поправка 0,1/20°, а при повороте вниз 0,15/20°.

Оптимальным диапазоном угла регулирования положения факела по высоте является $\pm 15^\circ$. Данный угол поворота горелок достаточен для эффективного регулирования топочного режима. Увеличение диапазона угла поворота нецелесообразно ввиду усложнения конструкции поворотной горелки и избыточного колебания режимных показателей работы котла.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ВИХРЕВОЙ ПОВОРОТНОЙ ГОРЕЛКЕ

3.1 *Общее описание конструкции горелки*

Требования к современному горелочному устройству, которые необходимо учитывать при разработке конструкции вихревой поворотной горелки, описаны в Главе I.

С учётом рекомендаций [30, 45, 56] были рассчитаны основные параметры горелочного устройства в условиях котла БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2 (табл. 3.1.1).

Таблица 3.1.1 – Основные параметры горелки

№	Параметр, размерность	Значение/характеристика
1	Мощность, МВт	27
2	Количество каналов аэросмеси	1
3	Количество каналов вторичного воздуха	1
4	Тип закручивающих аппаратов	Аксиальный
5	Номинальный расход угля, т/ч	4,78
6	Номинальный расход аэросмеси, м ³ /с	3,39
7	Номинальный расход вторичного воздуха, м ³ /с	13,5
8	Скорость первичного воздуха, м/с	15-18
9	Скорость вторичного воздуха, м/с	30-34
10	Угол поворота в вертикальной плоскости, °	±15

Горелка должна иметь один канал по пыли (аэросмеси) и один канал по вторичному воздуху, а также обеспечивать возможность сжигания, наряду с угольной пылью, природного газа и мазута.

На стадии проработки конструкции горелки было принято решение помимо вертикального поворота на $\pm 15^\circ$ реализовать также возможность горизонтального поворота горелки (с помощью поворотной насадки) на $\pm 5^\circ$. Реализация поворота в горизонтальной плоскости может обеспечить дополнительные возможности по регулированию режима горения, в частности – осуществить частичную ступенчатость сжигания по горизонтали и более глубокое снижение выбросов NO_x [38, 98].

Принципиальная конструкция горелки показана на рис. 3.1.1-3.1.3. В горелке расположены центральный канал для размещения запального устройства и мазутной форсунки, один канал подачи аэросмеси и один канал подачи вторичного воздуха. Также предусмотрены коллектор подвода природного газа и газораздающие трубки. На конструкцию горелочного устройства получено несколько патентов [63, 79].

В каналах аэросмеси и вторичного воздуха размещаются аксиальные лопаточные завихрители. В канале аэросмеси равномерно по окружности решено установить делители потока (см. раздел 3.2).

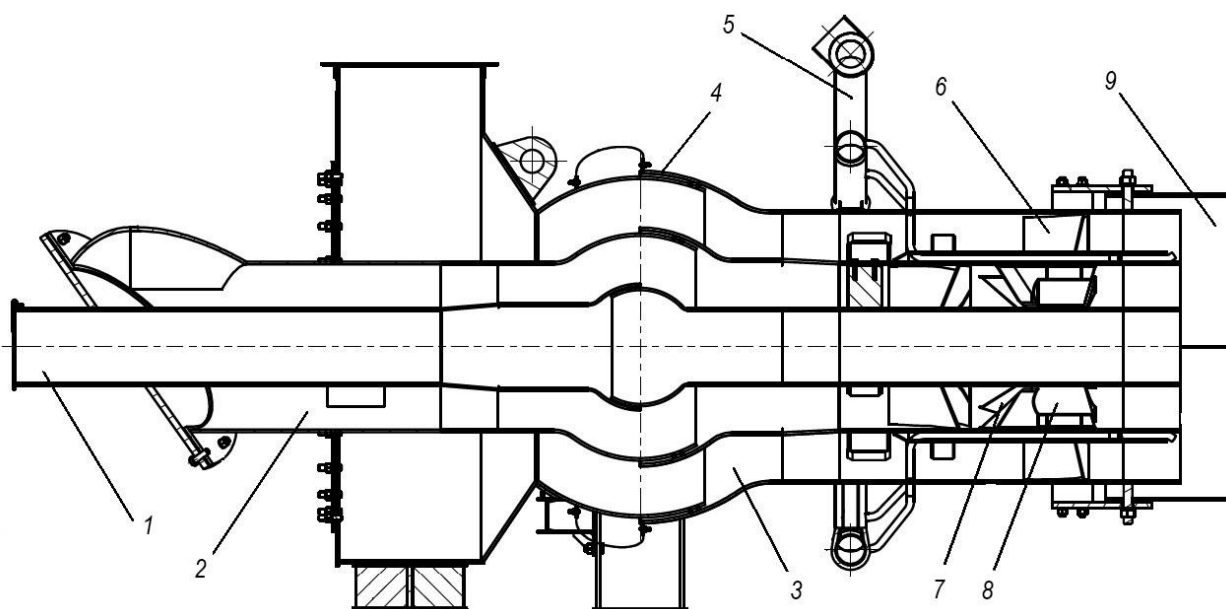


Рисунок 3.1.1 – Вид горелки сбоку в разрезе (1 – центральный канал (место размещения запального устройства и мазутной форсунки); 2, 3 – канал подачи аэросмеси и вторичного воздуха; 4 – узел сопряжения статичной и поворотной частей горелки; 5 – газовый коллектор; 6, 7 – аксиальный лопаточный аппарат каналов вторичного воздуха и аэросмеси; 8 – рассекатели потока аэросмеси; 9 – выходная насадка для горизонтального поворота)

Горелка выполнена поворотной с возможностью изменения направления подачи потока как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Все каналы горелки содержат неподвижную часть – прямую цилиндрическую трубу, и подвижную часть, представляющую собой последовательно

соединённые с помощью сварки прямую цилиндрическую трубу и прямую цилиндрическую жаропрочную насадку (сталь 20Х23Н18). Прямые цилиндрические трубы сочленены одна с другой шарнирным соединением.

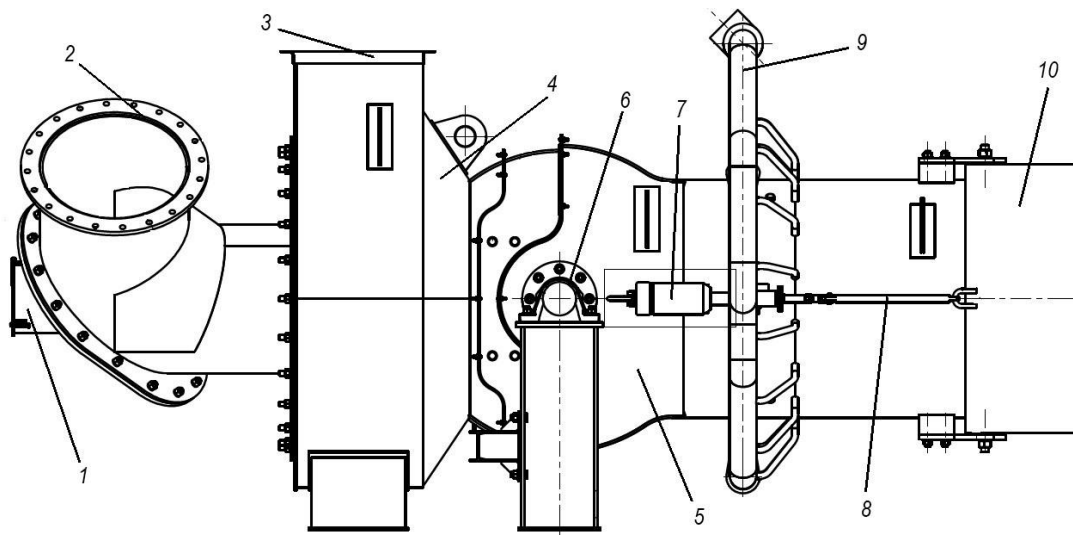


Рисунок 3.1.2 – Вид горелки сбоку (1, 2 – входные патрубки центрального канала и аэросмеси; 3 – входной короб вторичного воздуха; 4, 5 – статичная и поворотная части горелки; 6 – подшипник поворотного вала горелки; 7 – механизм электрический прямоходный (МЭП); 8 – тяга от МЭП к поворотной насадке; 9 – газовый коллектор; 10 – выходная насадка для горизонтального поворота)

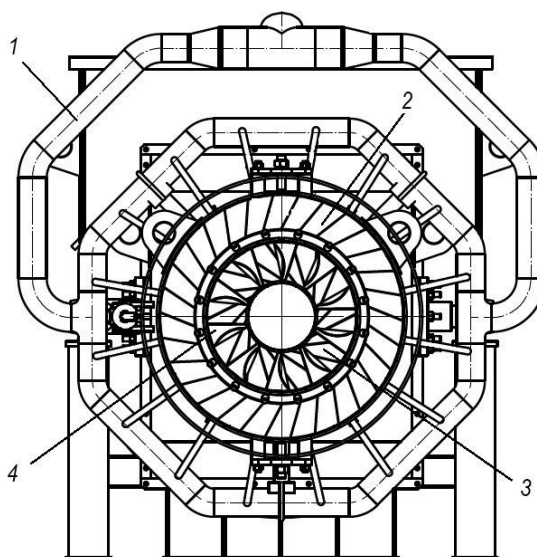


Рисунок 3.1.3 – Вид горелки со стороны топki котла (1 – газовый коллектор; 2, 3 – аксиальный лопаточный аппараты каналов вторичного воздуха и аэросмеси; 4 – рассекатели потока аэросмеси)

3.2 Мероприятия по снижению выбросов оксидов азота NO_x

В современную горелку уже на стадии проектирования должны быть заложены решения, направленные на снижение вредных выбросов. Для традиционных технологий сжигания речь идёт, главным образом, о снижении выбросов оксидов азота NO_x [37].

В нашей статье «Описание конструкции и моделирование работы вихревой поворотной горелки при сжигании угля и природного газа» отмечается, что «у разрабатываемой горелки в канале аэросмеси равномерно по окружности установлены делители потока, каждый из которых имеет желоб с определенным отношением глубины к ширине. Все делители выполнены с остrokонечным входным рассекателем, имеющим форму лезвия с односторонним косым срезом (рис. 3.2.1). Таким образом, поток аэросмеси закручивается с помощью аксиально-лопаточного завихрителя по направлению к расположенным далее по ходу потока аэросмеси желобам рассекателей и распределяется с помощью делителей на отдельные струи.

Рассекатели формируют на входе в топку струи асимметричной формы (рис. 3.2.2). При этом частицы твёрдого топлива концентрируются на границе струи первичного воздуха, что обеспечивает их прямой контакт с поджигающими высокотемпературными газовыми вихрями, образующимися у торцов делителей и подсасываемыми к корню факела из зоны активного горения. В результате воспламенение угольной пыли происходит при пониженной концентрации кислорода, что приводит к уменьшению эмиссии топливных оксидов азота.

Высокоэффективные и малотоксичные вихревые горелки ВТИ с рассекателями потока пыли уже внедрялись на котлах России, в частности на Троицкой ГРЭС и Омской ТЭЦ-5. Следует отметить, что снижение концентрации оксидов азота наблюдалось при использовании экибастузского угля и шубаркольского угля марки Д. Согласно имеющимся результатам моделирования [105] и опытным данным [52], полученным при использовании

горелок с делителями потока, снижение выбросов NO_x составляет в среднем 35% от исходного уровня» (Теплоэнергетика, № 8, 2024, с. 82-94).

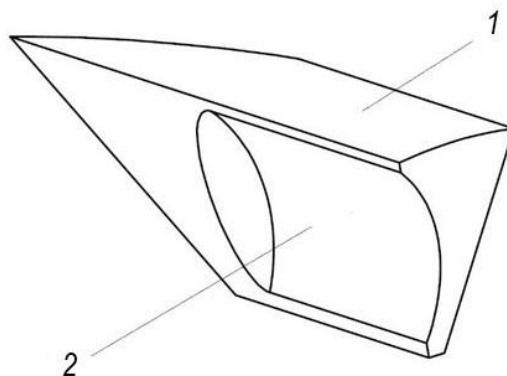


Рисунок 3.2.1 - Делитель потока (1) и желоб рассекателя (2)

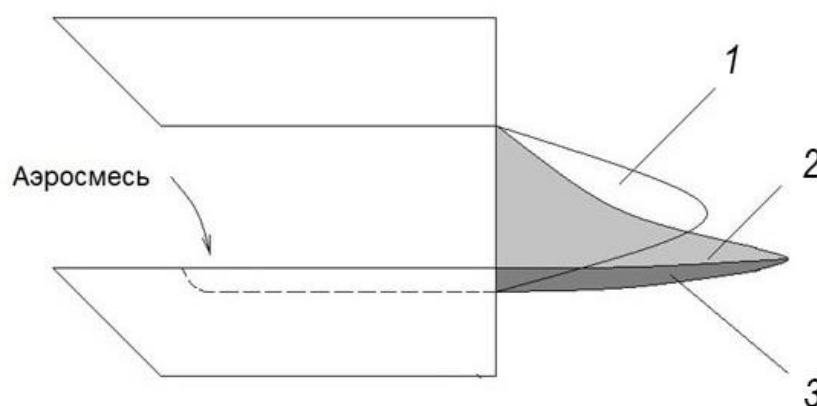


Рисунок 3.2.2 – Формирование зоны повышенной концентрации частиц твёрдого топлива
(1 – первичный воздух; 2 – частицы твердого топлива; 3 – зона повышенной концентрации частиц твёрдого топлива)

Рассекатели потока находятся в зоне действия высоких температур (главным образом – излучения из топки), поэтому должны изготавливаться из жаропрочной стали, например 20Х23Н18.

Вопрос выбора оптимальной формы рассекателя потока с точки зрения эффективности подавления NO_x , с одной стороны, и изготовления и ремонтпригодности, с другой стороны, требует дальнейших исследований в натурных условиях на головном образце.

3.3 Система вертикального поворота горелки

На основании выполненного в Главе I анализа существующих вариантов поворотных механизмов, сделано заключение, что оптимальным вариантом для осуществления вертикального поворота вихревой горелки является реализация гидросистемы.

Как отмечается в нашей статье «Описание конструкции и моделирование работы вихревой поворотной горелки при сжигании угля и природного газа»: «Гидроцилиндры располагаются по боковым сторонам устройства и фиксируются задним креплением на элемент металлоконструкций, передним креплением – на опорный вал, приваренный под поворотной частью горелки (рис. 3.3.1). Для подачи рабочей жидкости (масла) под давлением через систему каналов от насосной установки в гидросистему исполнительного механизма – гидроцилиндра используется маслостанция. Маслостанция размещается на площадке обслуживания котла и соединяется с гидроцилиндрами системой труб, по которым масло подаётся на напор (движение горелки вверх) и слив (движение горелки вниз)» (Теплоэнергетика, № 8, 2024, с. 82-94).

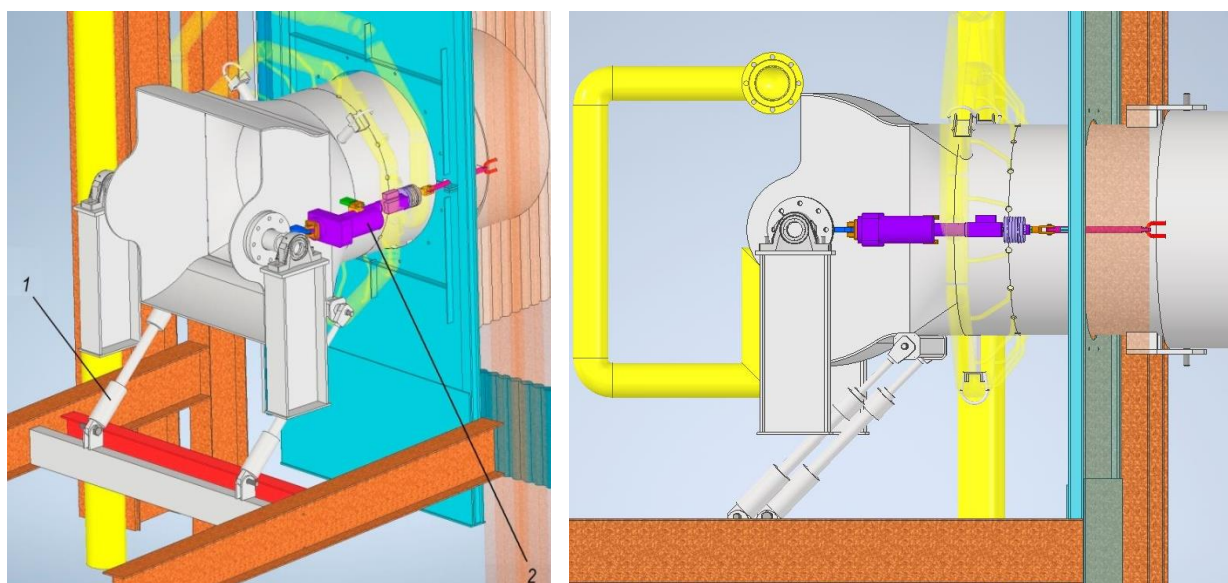


Рисунок 3.3.1 – Исходная схема установки гидроцилиндров для реализации вертикального поворота (1 – гидроцилиндр; 2 – МЭП)

Подробное описание устройства гидросистемы представлено в Приложении Г.

В ходе опытного опробования горелки значение угла поворота определяется показаниями переносного электронного угломера. После автоматизации системы управления горелкой угол поворота измеряется датчиком поворота (энкодером) с точностью до $0,1^\circ$ с передачей показания на щит управления.

3.4 Система горизонтального поворота

Горизонтальный поворот горелки на $\pm 5^\circ$ (рис. 3.4.1) осуществляется с помощью механизма электрического прямоходного (МЭП) – рис. 3.1.2, 3.3.1. МЭП тягой соединяется с выходной поворотной насадкой горелки, находящейся внутри топочной камеры (рис. 3.1.1, 3.1.2, 3.3.1). Поворотная насадка находится в зоне высоких температур, поэтому она и элементы её крепления выполняются из жаропрочной стали 20Х23Н18.

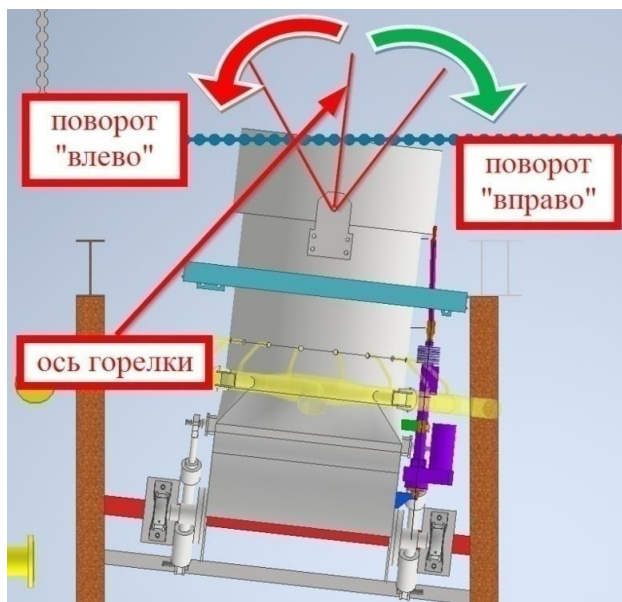


Рисунок 3.4.1 – Вид горелки сверху, пояснение по направлениям горизонтального поворота

Для поворота насадки используется механизм марки МЭП-СП2Т-15/13-300-ЦШ-ТВ-НВ-А-ОГ-Д-Г-20. Конструкция МЭП показана на рис. 3.4.2, его технические характеристики представлены в табл. 3.4.1.

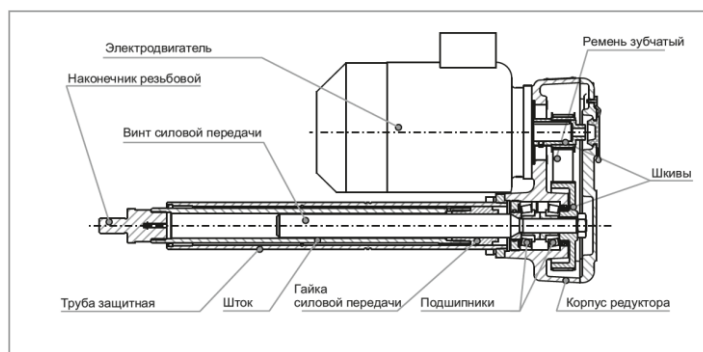


Рисунок 3.4.2 – Конструкция МЭП

Таблица 3.4.1 – Технические характеристики МЭП

Номинальное усилие, кН	Скорость штока, мм/с	Ход штока, мм	Мощность электродвигателя, кВт	Номинальный ток, А	Масса, кг
15	13	300	0,54	31	26

Управление МЭП возможно осуществлять ручным приводом, предназначенным для перемещения штока при отключенном питании электродвигателя, а также в аварийных ситуациях. Угол горизонтального поворота фиксируется по результатам тарировки хода штока МЭП путём замера изменения расстояния между осями тяги (табл. 3.4.2).

Таблица 3.4.2 – Зависимость угла горизонтального поворота от величины хода штока

Угол поворота насадки, °	Расстояние между осью задней вилки и осью передней вилки тяги, мм
нейтральное положение поворотной насадки	
0	909...910
поворот «вправо»	
+1	899...900
+2	890...891
+3	881...882
+4	872...873
+5	863...864
поворот «влево»	
-1	918...919
-2	928...929
-3	937...938
-4	947...948
-5	956...957

Для полноценных испытаний влияния горизонтального поворота на режим котла необходима автоматизация системы управления МЭП.

3.5 Технические решения по подвижному щиту горелки

В ходе диссертационного исследования нами был сделан вывод о том, что «соединение подвижной части горелки с топкой оптимально осуществлять через уплотнительную коробку и подвижный щит (рис. 3.5.1). Крайняя кромка уплотнительной коробки находится примерно на уровне экранных труб топочной камеры. Подвижный щит расположен в пазах, позволяющих ему свободно перемещаться вверх и вниз в заданном диапазоне. Для увеличения плавности хода щита при повороте горелки щит устанавливается на котле вместе с системой противовеса, состоящей из двух симметрично расположенных грузов (рис. 3.5.2)» (Теплоэнергетика, № 8, 2024, с. 82-94).

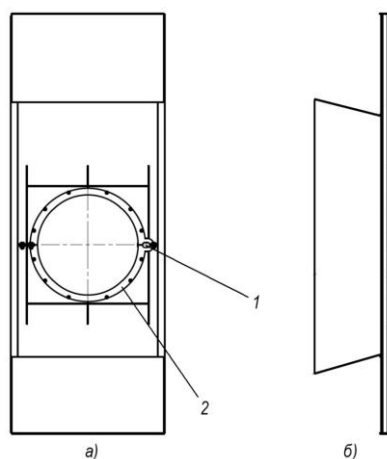


Рисунок 3.5.1 – Уплотнительная коробка (а) и подвижный щит горелки (б)
(1 – отверстие для прохода тяги от МЭП к насадке горизонтального поворота;
2 – фланец входа горелки)

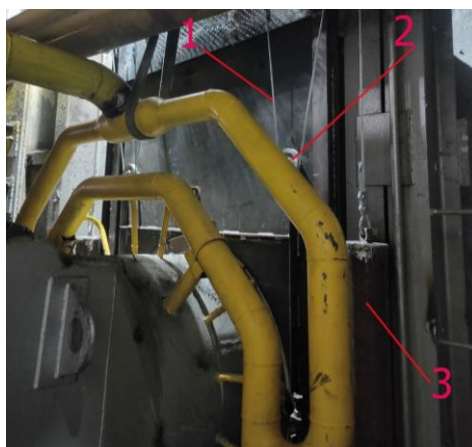


Рисунок 3.5.2 – Система противовеса щита (1 – трос; 2 – шкиф; 3 – один из двух грузов)

Подвижный щит, состоящий из двух полущитов (смыкаемых при монтаже вокруг обечайки горелки), является одним из наиболее сложных и ответственных узлов поворотной системы. Он подвержен воздействию максимальных температур со стороны топки, поэтому сам щит и все его вспомогательные элементы должны изготавливаться из жаропрочной стали 20Х23Н18. При разработке конструкции щита необходимо учитывать множество факторов, которые могут привести к нарушению его нормальной работы (температурные расширения, коробление под действием высоких температур, коллизии с другими элементами при повороте горелки и др).

С учётом сказанного, сформулированы основные требования к конструкции подвижного щита, которые были реализованы на головном образце горелки:

1) Для решения проблемы тепловых расширений щита по горизонтали в плоскости, перпендикулярной оси горелки, проделаны в каждой половине щита 3 прорези (1 вертикальная по центру, 2 диагональные меньшей длины). Ширина каждого разреза составляет 5 мм, на конце каждого разреза выполнено круглое отверстие диаметром 10 мм для снятия концентрации напряжений (рис. 3.5.3). Для 100%-ной гарантии надёжной компенсации расширений в каждом полушите целесообразно вырезать симметрично дополнительные 4 прореза толщиной 5 мм.

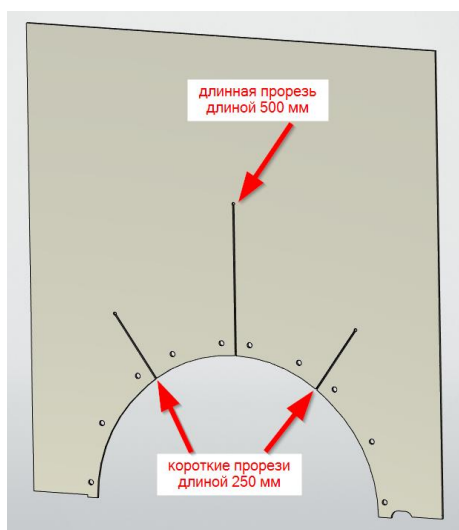


Рисунок 3.5.3 – Прорези для компенсации тепловых расширений

Для устранения присосов, теплоизоляции и укрепления области вертикальных разрезов с каждой стороны разреза (снаружи и внутри щита) приварены пластины, закрывающие разрез. Одна сторона пластины приваривается, вторая сторона остаётся свободной для движения при тепловом расширении. Стороны приварки пластины снаружи и внутри щита выбираются одинаковыми. Для боковых прорезей щита накладные пластины привариваются только со стороны топки.

Для компенсации расширения щита по вертикали в плоскости, перпендикулярной оси горелки, необходимо, прежде всего, выдерживать зазор между центральной точкой щита и горелкой. Зазор по вертикали между щитом и обечайкой обеспечивается установкой четырех дополнительных пластин (по 2 с каждой стороны) толщиной 10 мм на стыке двух половин щита (рис. 3.5.4). Таким образом, увеличивается «эллиптичность» щита и при его эксплуатации на горячем котле обеспечивается постоянный зазор между щитом и верхом/низом горелки.

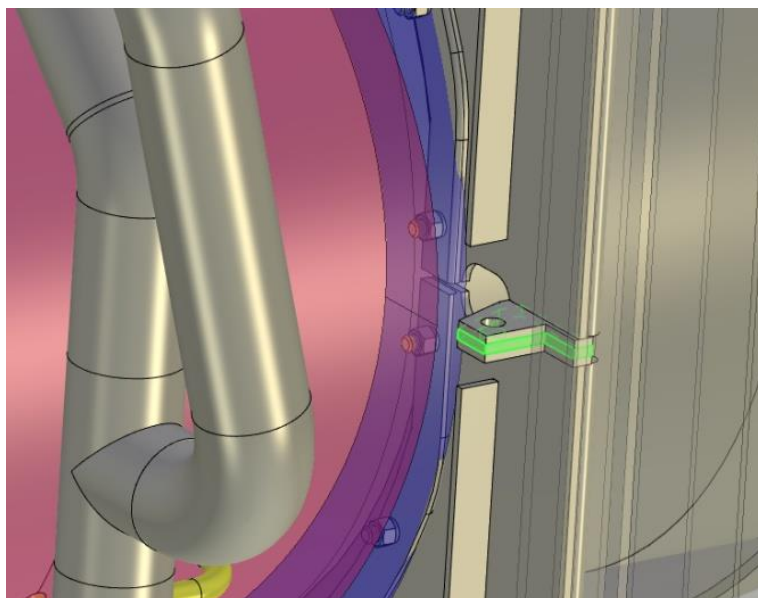


Рисунок 3.5.4 – Регулирование зазора между полуцилиндрами

2) Поскольку наличие прорезей в щите, необходимых для компенсации тепловых расширений, разупрочняет конструкцию, для её укрепления предложена приварка дополнительных полос из жаропрочной стали,

выступающих в качестве рёбер жёсткости (рис. 3.5.5). Основные рёбра жесткости (высотой 40 мм) расположены со стороны цеха. На каждом полуците есть два боковых продольных ребра, а также имеется по 2 ребра, расположенных у каждой прорези длиной 250 мм. Эти рёбра ориентированы вдоль прорезей и равноудалены от них.

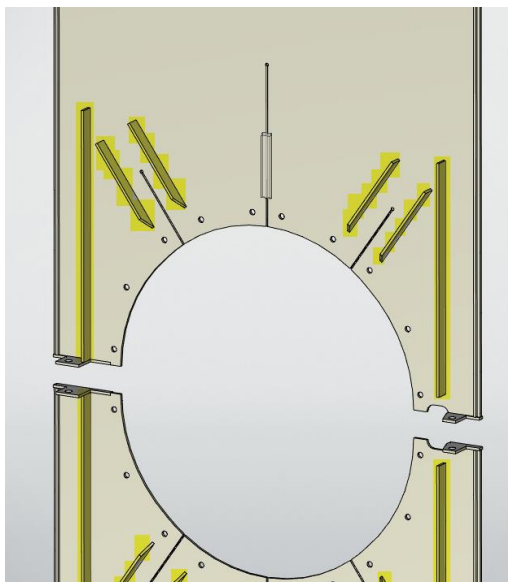


Рисунок 3.5.5 – Рёбра жёсткости щита (в верхней части также видна одна из накладных пластин, закрывающих прорези)

3) Для снижения коэффициента трения между поверхностью контакта щита и коробом, внутри которого он передвигается, на поверхность щита, обращённую в сторону топки, привариваются 4 полосы стали, играющие роль полозьев. Данные полосы вырезаются из листа стали толщиной 8 мм. Две полосы привариваются по краям продольных сторон щита и 2 полосы привариваются в центральной части. Центральные полосы придадут дополнительную жёсткость щиту в области центральной прорези, а также исключат возможность щита прогнуться вдоль центральной линии, что могло бы привести к зацеплению накладной пластины центральной прорези с каркасом щита. На поверхность щита, обращённую в сторону цеха, также привариваются полосы из листа стали толщиной 8 мм (рис. 3.5.6). Все прутки вырезаются из жаропрочной стали и обтачиваются для придания им округлой формы.

Описанные мероприятия позволяют снизить пятно контакта щита с внутренней поверхностью каркаса и повысить эффективность хода щита при повороте горелки.

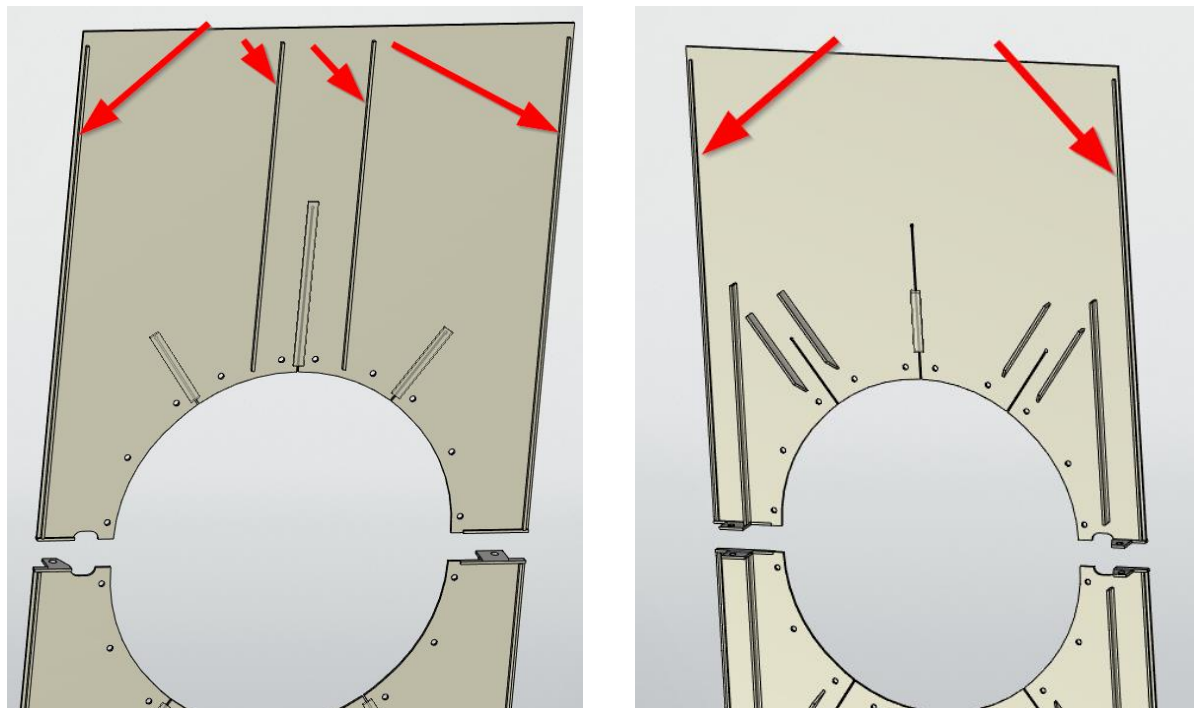


Рисунок 3.5.6 – Приварка полосок для уменьшения поверхности контакта щита с каркасом (слева вид со стороны топки, справа – вид со стороны цеха)

3.6 Уплотнение каналов горелки и места стыка горелки с подвижным щитом

В нашей статье «Описание конструкции и моделирование работы вихревой поворотной горелки при сжигании угля и природного газа» отмечается, что «для обеспечения плотности между каналами горелочного устройства на стыках статической и поворотной частей была разработана конструкция комплексного двойного уплотнения [64] (рис. 3.6.1). Кольцевое уплотнение выполняется следующим образом. На коллекторе, изготовленном из стали 20, кольцевого уплотнения имеются проточки, с каждой стороны которых методом наплавки металлом сделаны два буртика, образующих паз. В паз, с помощью высокотемпературного клея-герметика (KUDO KSK707) способом конопачения крепится огнеупорный уплотнительный шнур из кремнеземной

нити с наполнением из кремнеземного холста ШКН(Х)-1-12. Удержание шнура в пазу обеспечивается благодаря адгезии между металлом, клеем-герметиком и шнуром и плотной посадкой в паз, размер которого меньше размеров шнура. Для снижения трения открытой части шнура об ответную часть коллектора шнур снаружи покрывают высокотемпературной медно-графитовой смазкой. Наружный канал вторичного воздуха закрывается тканевым уплотнением из высокотемпературного огнестойкого материала (тканевый компенсатор ТК-В-1000-1240-225) – рис. 3.6.2» (Теплоэнергетика, № 8, 2024, с. 82-94).

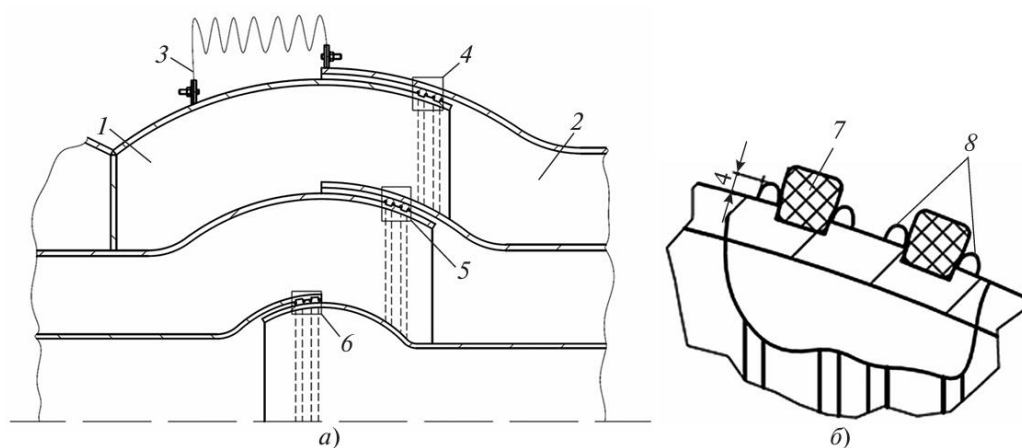


Рисунок 3.6.1 – Общий вид уплотнения каналов горелки (а) и устройство кольцевого уплотнения (б) (1, 2 – статичная и поворотная части горелки; 3 – тканевое уплотнение наружного канала; 4, 5, 6 – уплотнение сопряжения каналов вторичного воздуха, аэросмеси и центрального; 7 – уплотнительный кремнеземный шнур; 8 – наплавка из прутка)

Ширина полотна тканевого уплотнения должна выбираться с учётом того, что при поворотах горелки полотно будет несколько натягиваться (рис. 3.6.3). В нашем случае ширина полотна с необходимым запасом составляет 445 мм.

Ещё одним узлом, нуждающимся в глубокой проработке конструкции уплотнения, является место входа горелки в топку, т.е. место сочленения горелки с подвижным щитом. Трудности здесь очевидны: в условиях подвижной горелки традиционное уплотнение данного узла (ТИ полотно,

сетка, смесь асбеста и цемента) неприменимо. При этом герметичность соединения должна обеспечиваться как по условиям безопасности, так и по условиям экономичной эксплуатации котла (отсутствие лишних присосов воздуха в топку).

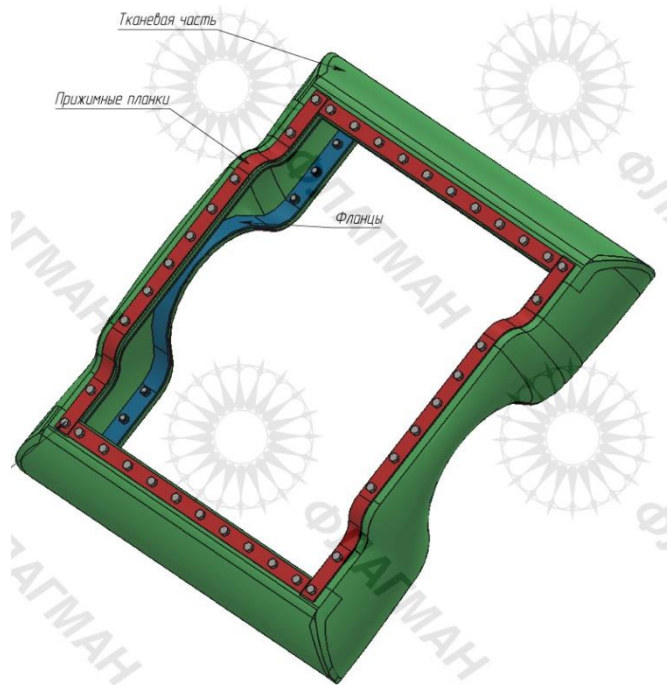
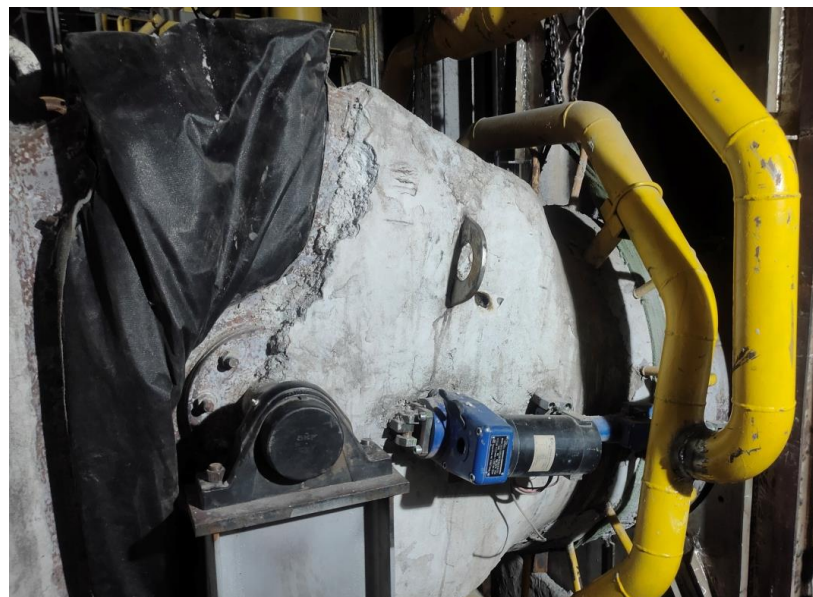


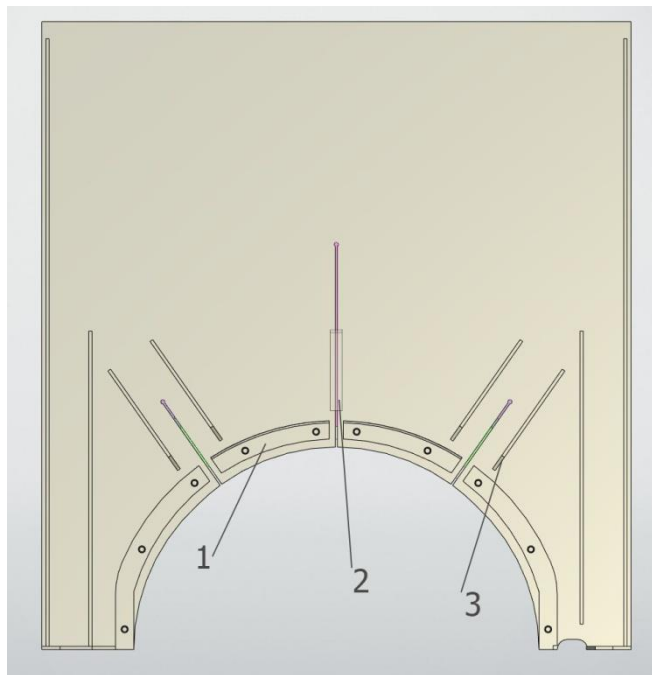
Рисунок 3.6.2 – Вид тканевого компенсатора в сборе



*Рисунок 3.6.3 – Вид тканевого компенсатора при повороте горелки вниз
(т. к. размер полотна выбран с запасом, натягивания компенсатора не наблюдается)*

Была разработана схема уплотнения с использованием того же полотна, что применяется для тканевого уплотнения горелки. Данный материал предназначен для работы в условиях высоких температур (более 400°С) и устойчив к механическим воздействиям при повороте горелки.

Полотно крепится с одной стороны к щиту, а с другой стороны – к наружной обечайке горелки. Предложено крепление к щиту осуществлять с помощью прижимных пластин. Для каждого полушита используется по 4 отдельных пластины, каждая из которых прижимает брезент к щиту и фиксируется болтовыми соединениями. На листе щита и на пластинах предусматриваются дополнительные отверстия под болтовые соединения. На рис. 3.6.4 показана конструкция крепления полотна к листу щита с прижимными пластинами.



*Рисунок 3.6.4 – Конструкция узла крепления полотна к листу щита
(1 – сегмент прижимной пластины; 2 – накладная пластина над прорезью;
3 – прорези для компенсации тепловых расширений)*

Способ крепления полотна должен минимизировать риск его механического повреждения вследствие взаимодействия с металлом (болты и др.), либо в результате «зажёвывания» в отверстие между горелкой и щитом в

процессе поворота горелки. Оптимальным признан вариант вывода полотна с наружной стороны пластин.

Граница тепловой изоляции подвижной части горелки представляет собой изогнутую линию и находится на расстоянии ~ 200 мм от щита (рис. 3.6.5). Данное решение обусловлено необходимостью исключить риск коллизии ТИ и щита при поворотах горелки.

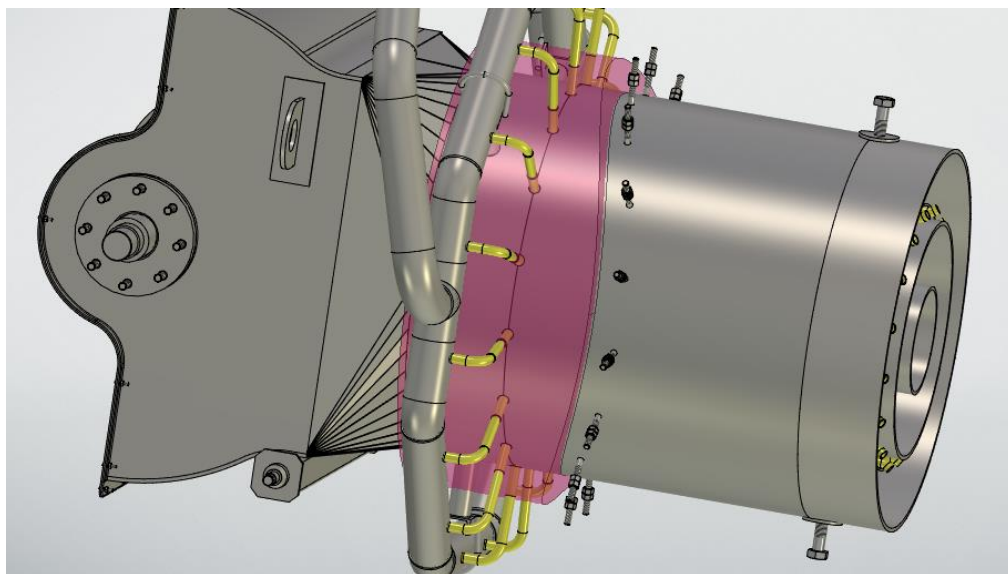


Рисунок 3.6.5 – Нанесение тепловой изоляции на подвижную часть горелки

Таким образом участки горелки, непокрытые тепловой изоляцией, должны оказаться под брезентом, используемым для уплотнения щита. Крепление полотна к обечайке осуществляется с помощью металлических прижимных пластин посредством болтовых соединений.

3.7 Газовая часть горелки

Система подвода и сжигания природного газа в основных аспектах осталась неизменной по сравнению со старой горелкой. Газ подводится к коллектору, расположенному вокруг поворотной части горелки, оттуда газораздающими трубками подаётся в топку. Выходные участки газораздающих труб выполняются из жаропрочной стали 20Х23Н18. На выходе из горелки каждая газовая трубка имеет отгиб в сторону канала вторичного воздуха для обеспечения лучшего смешения и воспламенения

реагентов. Между газовым коллектором горелки и подводящим газопроводом устанавливается гибкий металлорукав необходимой длины (рис. 3.7.1), что позволяет газовому коллектору свободно перемещаться вместе с горелкой при поворотах.



Рисунок 3.7.1 – Металлорукав между подводящим газопроводом и газовым коллектором горелки

Система автоматического розжига горелки на газе осталась неизменной. Однако в новых условиях потребовалось внести некоторые изменения в схемы размещения запальной горелки и датчика пламени, участвующих в системе автоматического розжига и контроля факела горелки.

В прежнем исполнении и запальник, и датчик пламени постоянно находились в центральном канале горелки. Однако в новых условиях поворот горелки окажется невозможен, если в центральном канале поворотной части будут находиться дополнительные устройства. Рассматривались различные варианты решения проблемы – в том числе с использованием выдвижных аппаратов, которые осуществляли бы изменение положения запальника и фотодатчика в центральном канале горелки при необходимости поворота. Однако данная схема требует дополнительных затрат и сложна в эксплуатации. В итоге решено было остановиться на более простых решениях.

Запальная горелка по-прежнему размещается в центральном канале: при необходимости поворота запальник вручную выдвигается в сторону цеха, при горизонтальном положении горелки задвигается обратно. Для удобства перемещения и надёжности работы запальник располагается в специальном тубусе.

Для верхнего яруса горелок фотодатчики решено установить в дополнительные разводки экранных труб снизу каждой горелки с направлением каждого из фотодатчиков на противоположную горелку этого яруса. Для нижнего яруса горелок решено установить фотодатчики в дополнительные разводки экранных труб сверху каждой горелки с направлением каждого фотодатчика на горелку под ним.

3.8 Модернизация отдельных узлов поворотной горелки в ходе опытного опробования

Экспериментальное обоснование разработанных технических решений было выполнено на котле БКЗ-210-140. В процессе модернизации конструкции горелочного устройства по результатам первичного опытного опробования отдельные элементы горелки были доработаны по сравнению с проектными видами. В данном разделе описаны все значимые изменения конструкции по сравнению с видами рис. 3.1.1-3.1.3.

3.8.1 Модернизация конструкции рассекателей потока пыли

Количество рассекателей, показанное на рис. 3.1.3, было признано избыточным, в итоге их общее число сократилось до 8 шт. Опыт эксплуатации более ранних образцов горелок с рассекателями потока пыли (котёл П-57 Троицкой ГРЭС, котёл БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-5) показал, что избыточное количество рассекателей может приводить к отложениям пыли в каналах аэросмеси и повышенному износу делителей потока. Моделирование процесса образования NO_x в ANSYS на примере указанных котлов показало, что деление канала на 8 секций является оптимальным: дальнейшее увеличение

количества рассекателей уже не приводит к существенному снижению концентрации NO_x .

Следует отметить, что объёмные рассекатели с желобом (рис. 3.2.1) сложны в изготовлении и отличаются ограниченной ремонтопригодностью, что особенно критично в реальных условиях функционирования ТЭС. С этой точки зрения предпочтительнее применение упрощённой конструкции рассекателей (в случае, если их использование также обеспечивает достаточный уровень снижения концентрации NO_x). В процессе апробации поворотной горелки было рассмотрено несколько возможных решений по конструкции рассекателей (рис. 3.8.1).

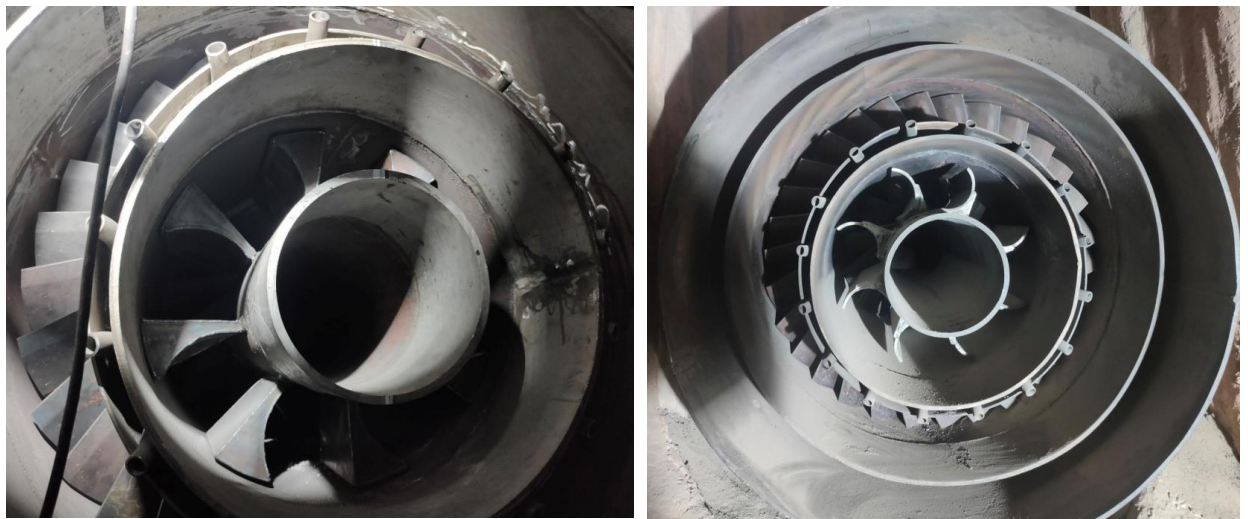
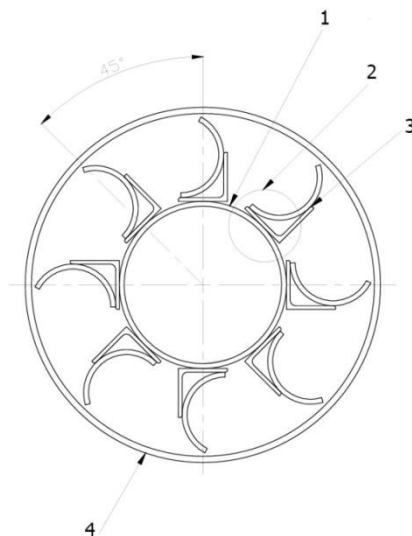


Рисунок 3.8.1 – Разное исполнение рассекателей на пилотном образце поворотной горелки (слева – исходный вариант с объёмными рассекателями, справа – новый вариант с рассекателями из половины трубы)

Концентрированные струи пыли на выходе из канала аэросмеси наблюдаются в обоих случаях, т.е. требуемый эффект с точки зрения снижения концентрации NO_x обеспечивают оба варианта конструкции рассекателей. В этих условиях оптимальной следует признать упрощённую конструкцию рассекателей, выполняемых из типовой жаропрочной трубы (рис. 3.8.2).

Представленная конструкция рассекателей более технологична и ремонтопригодна. Кроме того, такие рассекатели менее подвержены

абразивному износу, поскольку у них отсутствует тонкая торцевая стенка, подверженная интенсивному воздействию набегающего потока пыли.



*Рисунок 3.8.2 – Упрощённая конструкция рассекателей из половины трубы
(1 – центральный канал, 2 – узел приварки уголка, 3 – рассекатель, 4 – канал аэросмеси)*

3.8.2 Модернизация системы вертикального поворота горелки

Первичное опробование гидросистемы выявило ряд недостатков исходного варианта установки гидроцилиндров. Будучи отдалены от передней части горелки ГЦ при повороте вверх несколько подталкивали горелку в сторону топки, что в ряде случаев приводило к заклиниванию подвижного щита при повороте. Был сделан вывод, что при исходной схеме установки ГЦ их усилие используется нерационально.

В результате решено было установить ГЦ под большим углом по сравнению с изначальной схемой. Рассматривалось несколько вариантов установки ГЦ, включая вариант установки под углом 90° . Однако при такой установке ГЦ в крайнем нижнем положении горелки при попытке поворота вверх возникал неоптимальный вектор воздействия на ГЦ, сопряжённый с риском повреждения оборудования. По результатам моделирования оптимальным признан вариант установки ГЦ под углом 74° (рис. 3.8.3). Данное значение угла соответствует максимальному повороту горелки вниз (-

15°). Для правильного выставления горелки и ориентации ГЦ целесообразно осуществлять монтаж горелки в положении максимального поворота вниз.

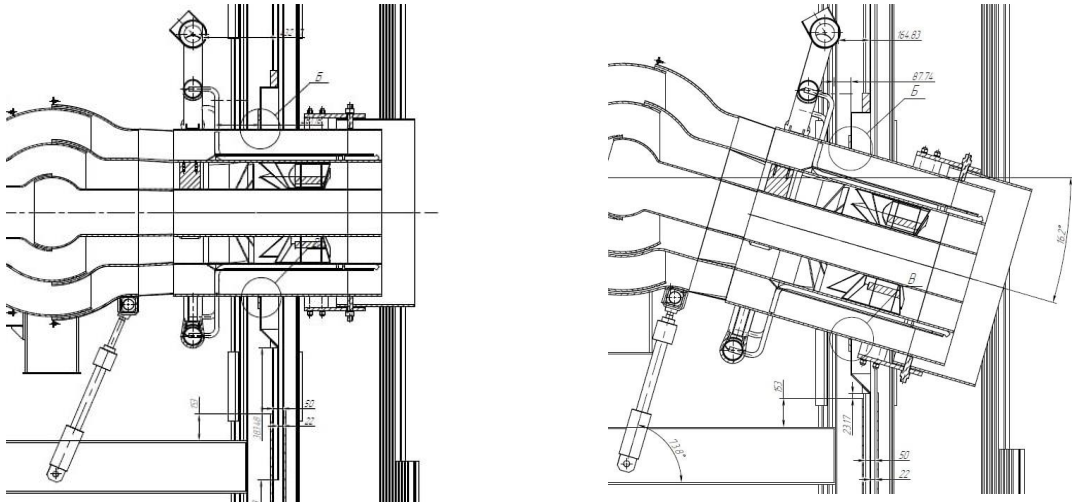


Рисунок 3.8.3 – Новая схема установки гидроцилиндров (слева показано горизонтальное положение горелки, справа – максимальный поворот вниз)

Рассмотренный вариант установки ГЦ был реализован (рис. 3.8.4). Опробование системы поворота подтвердило большую эффективность данной схемы установки ГЦ.



Рисунок 3.8.4 – Гидроцилиндры, смонтированные по новой схеме (слева вид ГЦ при горизонтальном положении горелки, справа – при повороте на +15° при разомкнутом щите)

3.8.3 Модернизация крепления поворотной насадки горелки

Первые опыты с вертикальным поворотом горелки показали, что исходная конструкция крепления поворотной насадки упирается в щит при угле вертикального поворота 13° (таким образом проектный диапазон $\pm 15^\circ$ оказывается недостижим). Ввиду этого была разработана новая конструкция крепления насадки, подразумевающая установку 4-х пластин («воротников») сверху и снизу поворотной обечайки (с внутренней и внешней стороны – рис. 3.8.5-3.8.6). Все элементы нового крепления выполняются из жаропрочной стали.

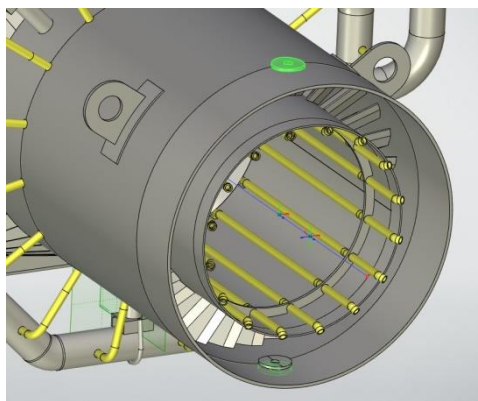


Рисунок 3.8.5 – Новая конструкция крепления поворотной насадки



Рисунок 3.8.6 – Сравнение старого (слева) и нового (справа) варианта крепления поворотной насадки

Новое крепление характеризуется большей компактностью. Испытания подтвердили, что при таком исполнении крепления не происходит коллизии со щитом при вертикальном повороте.

3.8.4 Модернизация подвижного щита горелки

Первичная эксплуатация горелки показала, что при работе котла на высоких нагрузках (особенно при сжигании угля) температура металла щита в области над горелкой при отсутствии дополнительной защиты может достигать 500-600°C. Поэтому для обеспечения надёжной работы щита, необходимо предусмотреть защиту металла щита от излучения из топки.

Чтобы решить данную проблему, следует предусмотреть установку перед щитом защитного экрана со стороны топки. Для каждого полушита экран формируется из 5-ти секций, вырезанных из листа стали 20Х23Н18 толщиной 2 мм. Для крепления к щиту в верхней части каждой секции экрана приваривается переход с реализацией шпоночных соединений для свободного хода при тепловых расширениях.

На каждую секцию экрана также наносятся прорези с реализацией шпоночных соединений для свободного расширения экрана вниз. В качестве дополнительных мер защиты металла применяются специальные покрытия: на щит со стороны топки наносится слой высокотемпературной жидкой термоизоляции, а металл экрана со стороны топки красится высокотемпературной белой краской.

Сборка модифицированного щита включает следующие мероприятия:

крепление огнеупорного полотна МТПКВ Blanket (рабочая температура 1430°C) в пространстве между щитом и защитным экраном с помощью крючьев/провода из жаропрочного металла;

крепление секций защитного экрана к щиту внахлест с помощью шпоночных соединений (для верхнего полушита крепление осуществляется сверху, для нижнего полушита – снизу; секции крепятся только в одной точке для свободного расширения);

накрывание прорезей защитного экрана пластинками таким образом, чтобы пластинки не допускали прямого контакта теплоизоляции с излучением от факела.

Общий вид конструкции защитного экрана показан на рис. 3.8.7.

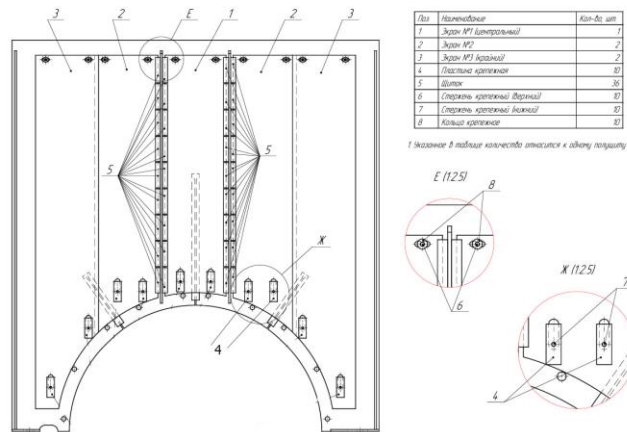


Рисунок 3.8.7 – Конструкция защитного экрана подвижного щита

3.8.5 Изменение ориентации газового коллектора горелки

Важный момент, на который следует обратить внимание при проектировании и монтаже, – исключение риска коллизий газового коллектора с другими трубопроводами возле котла во всём диапазоне поворота горелки. Для исключения подобных рисков было решено изменить ориентацию верхней части газового коллектора по сравнению с рис. 3.1.1-3.1.2. В прежнем исполнении существовал риск столкновения коллектора со щитом при больших углах поворота горелки. Отклонение верхней части коллектора в сторону от топki на 20° решает эту проблему, при этом в схеме подвода газа ничего не меняется (рис. 3.8.8).



Рисунок 3.8.8 – Итоговая конфигурация газового коллектора с отклонением верхней части в сторону от топki

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Разработаны основные технические решения по конструкции вихревой поворотной горелки. Конструкция горелки предусматривает возможность сжигания как угольной пыли, так и природного газа и мазута. Горелка имеет один канал аэросмеси и один канал вторичного воздуха, в обоих каналах устанавливаются аксиальные закручивающие аппараты. В канале аэросмеси также устанавливаются рассекатели потока пыли – апробированное конструктивное решение для снижения выбросов топливных оксидов азота.

Конструкция горелки обеспечивает возможность вертикального поворота устройства в диапазоне $\pm 15^\circ$ и горизонтального поворота в диапазоне $\pm 5^\circ$. Вертикальный поворот реализуется с помощью двух гидроцилиндров, ход штока которых осуществляет подъём/опуск подвижной части горелки. Гидроцилиндры управляются маслостанцией. Горизонтальный поворот реализуется за счёт установки в выходной части горелки поворотной насадки. Поворот насадки осуществляется тягой, управляемой МЭП.

В месте входа горелки в топочную камеру устанавливается подвижный щит, состоящий из двух полуцилиндров. При вертикальном повороте горелки щит перемещается вверх/вниз. Конструкция щита предусматривает компенсацию тепловых расширений и крепление тканевого уплотнения между щитом и выходной частью горелки. Место стыка стационарной и подвижной частей горелки оснащается тканевым компенсатором.

По результатам первичного опробования на котле была выполнена модификация нескольких узлов горелочного устройства:

конструкция рассекателей потока пыли унифицирована с целью повышения ремонтпригодности; общее количество рассекателей потока сокращено до 8 шт.;

место и угол установки гидроцилиндров вертикального поворота скорректированы с целью обеспечения более эффективного воздействия

усилия на поворотную часть горелки и повышения плавности поворота. Оптимальный угол установки гидроцилиндров составил 74° ;

конструкция крепления поворотной насадки горелки выполнена более компактной;

принято решение оснастить подвижный щит горелки защитным экраном со стороны топки с целью снижения интенсивности воздействия излучения на металл щита;

ориентация газового коллектора горелки изменена для исключения коллизий при вертикальном повороте.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ПОВОРОТНОЙ ГОРЕЛКИ НА КОТЛЕ БКЗ-210-140 ТОМСКОЙ ГРЭС-2

4.1 Цели экспериментальных исследований

Цели экспериментальных исследований:

Подтверждение работоспособности горелки и стабильности её работы;

Опытная оценка влияния угла вертикального поворота горелки на режим работы котла по температуре перегретого пара;

Получение количественной зависимости изменения температуры перегретого пара от угла поворота горелки для обоснования рекомендаций по управлению топочным режимом.

На текущем этапе опробования системы сжигания с поворотными горелками было решено установить на котле одну новую горелку. По условиям удобства организации площадки обслуживания горелки для замены была выбрана горелка № 3 второго яруса (рис. 4.1.1).

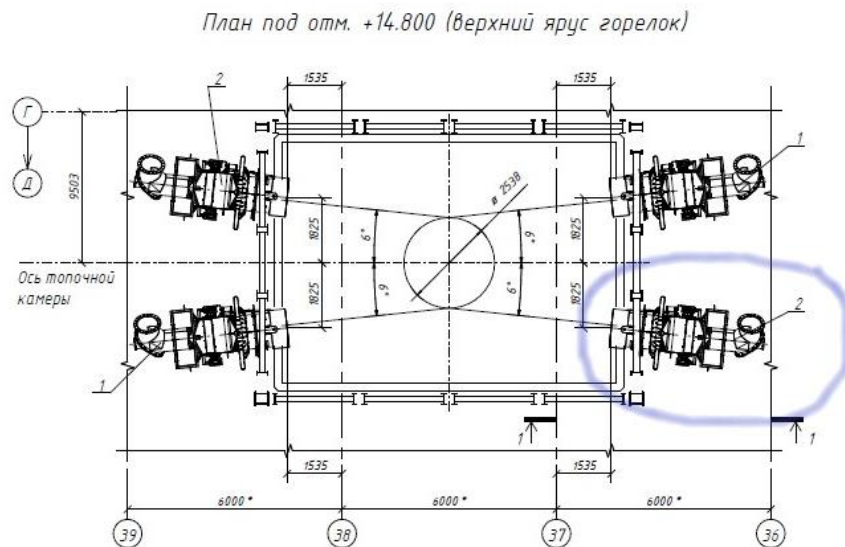


Рисунок 4.1.1 – Выбор места установки пилотного образца горелки

Перечень факторов, которые важно учитывать в процессе изготовления и монтажа поворотной горелки, представлен в Приложении Д.

4.2 Опробование поворотной системы на холодном котле

Вид горелки после реализации описанных выше технических решений представлен на рис. 4.2.1-4.2.2.

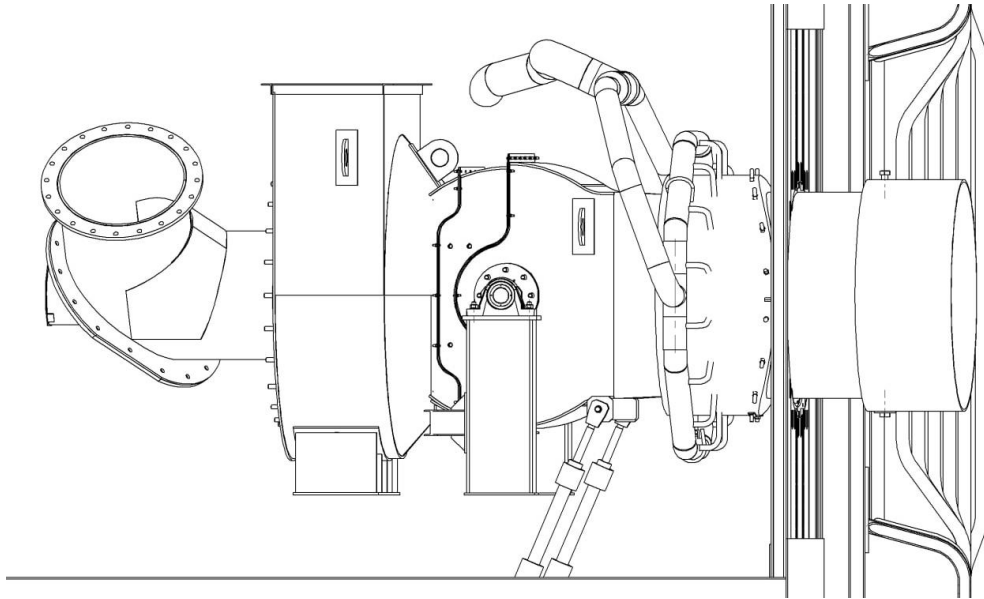


Рисунок 4.2.1 – Вид модернизированной поворотной горелки сбоку

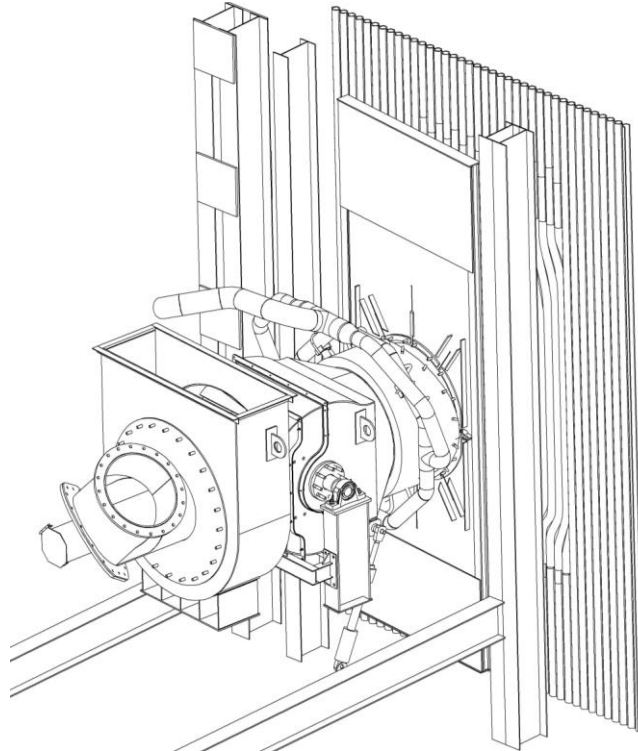


Рисунок 4.2.2 – 3D-модель модернизированной поворотной горелки и подвижного щита

Опробование поворота горелки на холодном котле показали плавный ход горелки и отсутствие коллизий при повороте. Диапазон значений угла вертикального поворота соответствовал проектным $\pm 15^\circ$ (рис. 4.2.3-4.2.4).



Рисунок 4.2.3 – Поворот горелки на холодном котле на $+15^\circ$, вид снаружи топки



*Рисунок 4.2.4 – Поворот горелки на холодном котле, вид изнутри топки
(слева поворот на $+15^\circ$, справа поворот на -15°)*

4.3 Испытания горелки на работающем котле

Испытания включали две серии опытов:

1) Опыты по отладке режимов сжигания угольной пыли и газа при горизонтальном положении горелки.

Целью опытов было получение базовых данных при работе горелки без поворота, оценка стабильности работы горелочного устройства и общих показателей работы котла.

2) Опыты по изменению угла поворота горелки.

Целью опытов было исследование влияния поворота горелки на режим работы котла и получение зависимости температуры перегретого пара от угла поворота горелки.

Общая методика проведения испытаний соответствует рекомендациям [111]. Определение состава дымовых газов производится в соответствии с [102].

В дальнейшем планируется проведение расширенных испытаний с целью углублённой оценки влияния поворотной горелки на работу котла в целом. Поскольку отследить влияние на режим одной горелки из шести представляется нетривиальной задачей, была разработана специальная методика испытаний.

4.3.1 Опыты по оценке работы горелки в горизонтальном положении

Наладочные опыты включали в себя подготовительные мероприятия, включая пуск горелки на природном газе. При горизонтальном положении горелки зафиксирован стабильный факел (рис. 4.3.1).

При переходе на сжигание пыли зафиксирован стабильный факел горелки, при этом ясно видна структура пылеугольного факела с разделением пыли на концентрированные потоки (рис. 4.3.2). Данный эффект достигается за счёт использования рассекателей потока в канале аэросмеси и обеспечивает снижение образования топливных оксидов азота.

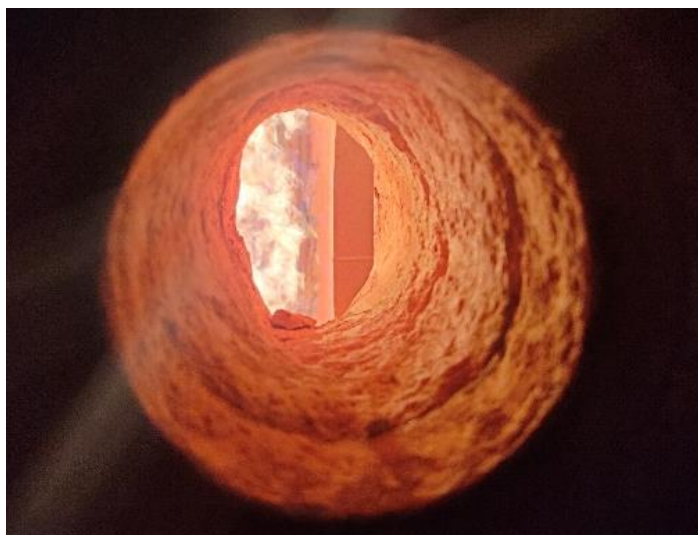


Рисунок 4.3.1 – Вид факела через боковой лючок

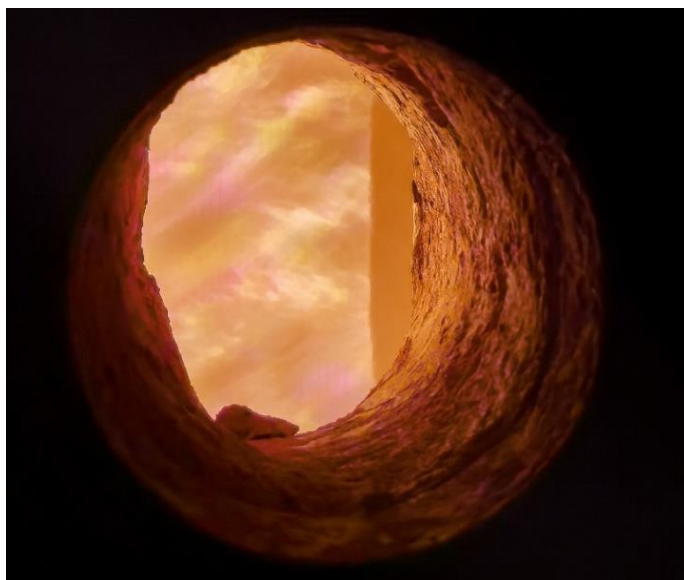


Рисунок 4.3.2 – Вид структуры пылеугольного факела

Отмечается, что при переводе горелки на пыль вырос расход конденсата на впрыски: с 1,5 до 2,3 т/ч. Это подтверждает имеющуюся информацию о том, что при сжигании угля на котле могут возникать проблемы с ростом температуры перегретого пара выше номинального значения.

По результатам нескольких серий опытов ограничений по рабочим нагрузкам котла не выявлено, котёл работает в штатном диапазоне нагрузок – 130-210 т/ч. Горелка № 3 обеспечивает стабильное сжигание как природного газа, так и угольной пыли.

Отмечено влияние регулирования соотношения «топливо-воздух» в горелке № 3 на значения концентрации вредных веществ на хвосте котла. Это влияние минимально, т.к. одной горелки из 6-ти недостаточно для установления чётких трендов. Тем не менее, в ряде опытов просматривается закономерность: при увеличении количества воздуха на горелку имеет место рост концентрации оксидов азота NO_x и снижение концентрации CO ; снижение количества воздуха даёт обратный эффект.

Концентрация оксидов азота NO_x при сжигании угля с подсветкой газом на нагрузках 170-150 т/ч менялась в диапазоне 925-1152 мг/нм³, на нагрузках 210-190 т/ч – в диапазоне 662-785 мг/нм³. Следует отметить, что подсветка газом обеспечивает значительное снижение концентрации NO_x по сравнению с работой на чистом угле. Для сравнения в 2021г в ходе экспресс-испытаний котла на номинальной нагрузке при сжигании чистого угля была зафиксирована концентрация оксидов азота 1232 мг/нм³.

Концентрация CO оставалась низкой практически во всех режимах работы котла за исключением отдельных пробных опытов, а также опытов на нагрузке 210 т/ч. На номинальной нагрузке имели место достаточно высокие значения концентрации CO , что обусловлено, в основном, газовой подсветкой. Но и при данной нагрузке были найдены режимы, обеспечивающие низкое содержание CO в уходящих газах.

Во всех исследованных режимах работы котла на пыли (кроме одного пробного опыта со снижением количества воздуха на котёл) имели место низкие значения потерь тепла с механическим недожогом q_4 : 0,41-0,60% на низких нагрузках, 0,73-0,91% на нагрузке 210 т/ч. В ходе экспресс-испытаний котла в 2021г также были зафиксированы низкие потери с механическим недожогом – 0,25%.

При работе котла на угольной пыли были выявлены особенности шлакования поворотной насадки горелки, описанные в Приложении Е.

По результатам серии опытов были выданы следующие рекомендации по эксплуатации горелки № 3:

Допустима эксплуатация горелки при её работе на природном газе во всём диапазоне нагрузок котла (130-210 т/ч). Во всех режимах целесообразно поддерживать давление газа перед горелкой в диапазоне 0,20-0,25 кгс/см², при этом УП шиберов вторичного воздуха перед горелкой выставляется на уровень 85-100%.

Допустима эксплуатация горелки при её работе на угольной пыли с подсветкой газом во всём диапазоне нагрузок котла (130-210 т/ч). При работе в диапазоне нагрузок 130-170 т/ч оптимальная загрузка пылепитателя горелки составляет 15% при УП шиберов вторичного воздуха 75-85%. При работе в диапазоне нагрузок 170-210 т/ч оптимальная загрузка пылепитателя горелки составляет 20% при УП шиберов вторичного воздуха перед горелкой 75-85%.

4.3.2 Описание опытов с поворотом горелки

Вследствие перегрева щита при высоких нагрузках котла (особенно – при работе на угле) поворот горелки удалось осуществить только при сжигании природного газа на малых нагрузках. Для исключения данной проблемы разработано техническое решение по модернизации щита (см. раздел 3.8.4). Сводка зафиксированных режимов с поворотом приведена в табл. 4.3.1.

Таблица 4.3.1 – Зафиксированные режимы с поворотом горелки

Номер опыта; Дата; время	Паропроизводительность, т/ч	Топливо	Примечание
№ 1; 2024.11.26; 14:00-16:00	130-120	газ	поворот горелки
№ 2; 2024.11.26; 16:00-17:00	120	газ	возврат горелки в нейтральное положение
№ 3; 2024.11.28; 11:30-12:10	90	газ	переходный режим с поворотом горелки

В опытах № № 1-2 удалось осуществить поворот горелки на $\pm 8^\circ$. Определение угла поворота в ходе данной серии опытов проводилось с

помощью электронного угломера. Дальнейший ход поворота шёл тяжело, с периодическим заклиниванием. Было принято решение снизить нагрузку котла (и следовательно – температурную нагрузку на щит) до минимально возможной и повторить опыт с поворотом.

Наиболее представительным с точки зрения влияния поворота горелки на температуру перегретого пара является опыт № 3, в котором был зафиксирован поворот горелки на $+13^\circ$ и -10° от нейтрального положения (рис. 4.3.3-4.3.4).

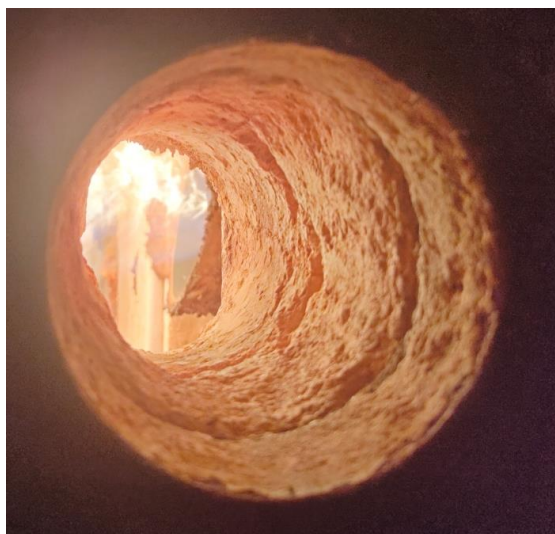


Рисунок 4.3.3 – Виды поворота горелки вверх и вниз через боковой лючок

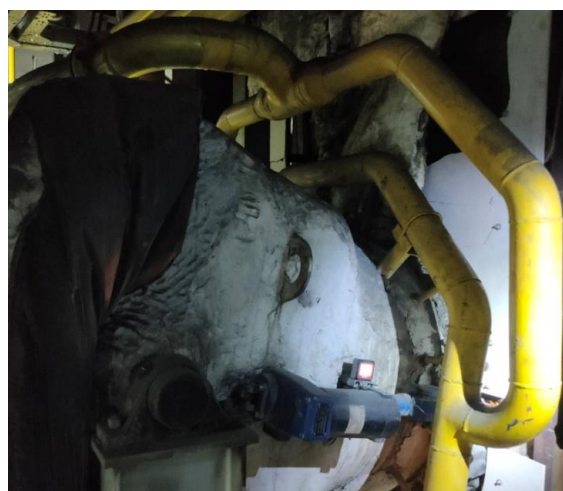
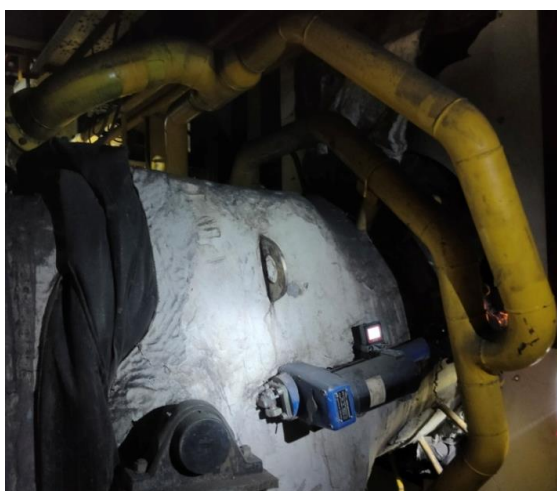


Рисунок 4.3.4 – Поворот горелки вверх и вниз в опыте № 7 (вид снаружи)

В ходе опыта № 3 ввиду ограниченного количества времени и переменного графика нагрузки котла не было возможности отключить автоматическое регулирование расхода конденсата на впрыск (хотя для чистоты эксперимента данный вариант был бы оптимален). По факту происходило как изменение расхода впрыска 1 (рис. 4.3.5), так и изменение температуры перегретого пара (рис. 4.3.6). Расход впрыска 2 в отличие от впрыска 1 был разным по веткам 1 и 2 и составлял существенно меньшую величину (1,55 т/ч и 0,5 т/ч, соответственно). Значение расхода конденсата на впрыск 2 оставалось практически неизменным.

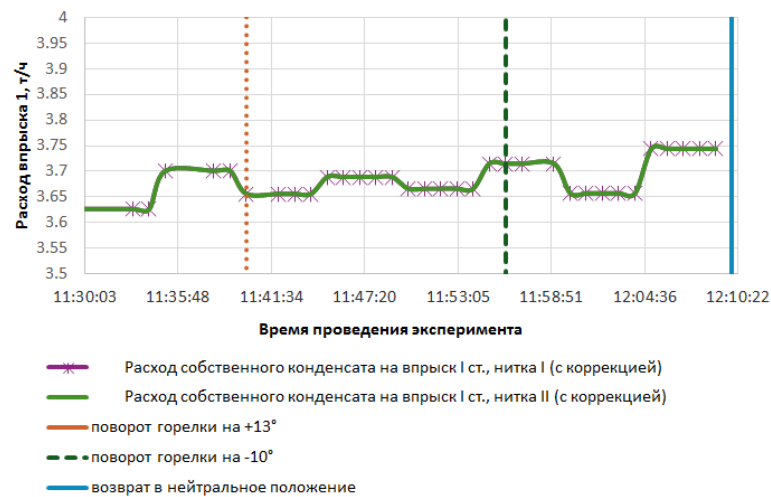


Рисунок 4.3.5 – Изменение расхода впрыска 1 в ходе опыта № 3

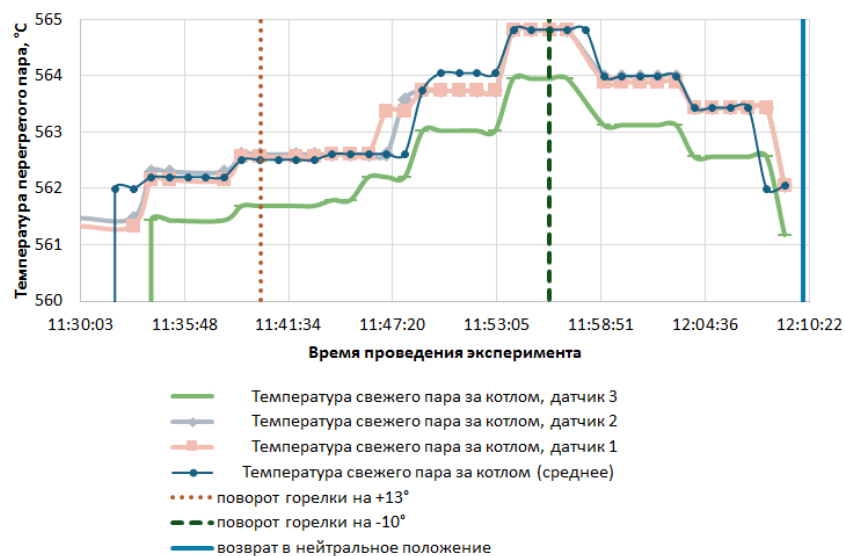


Рисунок 4.3.6 – Изменение температуры перегретого пара в ходе опыта № 3

В целом расход впрыска 1 во время опыта № 3 вырос на 2% от своей первоначальной величины. Само по себе изменение впрыска незначительно, но увеличение его расхода всё равно должно приводить к снижению температуры перегретого пара. С учётом этого особенно характерным представляется характер фактического тренда изменения $t_{пе}$.

В ходе эксперимента наблюдалось устойчивая зависимость температуры перегретого пара от угла поворота горелки. При повороте горелки на 13° вверх произошло увеличение температуры перегрева, в среднем на 3°C . При последующем повороте горелки на -10° начало фиксироваться снижение температуры перегрева. Ограниченное время опыта не позволило получить данные по полной выдержке режима, опыт завершился при величине температуры перегрева, близкой к номинальной.

Изменение температуры перегретого пара в переходном режиме даёт результат, сопоставимый с расчётным, что свидетельствует о корректности полученных результатов.

Таким образом подтверждена возможность регулирования $t_{пе}$ за счёт изменения положения факела по высоте топки. Эффект изменения $t_{пе}$ на 3°C при повороте одной горелки следует признать существенным, особенно в условиях проведения опыта с автоматическим регулированием впрысков.

По результатам испытаний определена зависимость $t_{пе}$ от изменения угла поворота горелки (табл. 4.3.2).

Таблица 4.3.2 – Зависимость температуры перегретого пара от угла поворота одной горелки

Угол поворота горелки, $^\circ$	Изменение $t_{пе}$, $^\circ\text{C}$
+15	+3
+5	+1
+1	+0,2
-1	-0,2
-5	-1
-15	-3

Поворот горелок влияет не только на $t_{пе}$, но и на паропроизводительность котла ($D_{пе}$). Поворот вниз приводит к росту тепловосприятости экранов топки,

снижению температуры газов на выходе из топки и увеличению $D_{\text{пе}}$. При повороте вверх, соответственно, тепловосприятие экранов снижается, температура газов на выходе из топки возрастает, $D_{\text{пе}}$ падает.

На рис. 4.3.7 показано изменение $D_{\text{пе}}$ котла в опыте с поворотом горелки. Видно, что после поворота горелки вверх постоянно возникает тенденция снижения $D_{\text{пе}}$, однако система регулирования реагирует и нивелирует данный эффект, меняя расход топлива. Эффект изменения расхода топлива при повороте горелок подтверждается и расчётными исследованиями (см. табл. 2.4.6). В целом, в опыте диапазон колебаний $D_{\text{пе}}$ невелик вследствие малого влияния одной горелки из 6-ти. После поворота вниз наблюдается довольно заметный скачок $D_{\text{пе}}$ вверх. Более резкий характер изменения по сравнению с первым поворотом объясним: изначально горелку повернули из нейтрального положения, а затем – сразу из верхнего в нижнее, отсюда и более выраженное изменение $D_{\text{пе}}$.

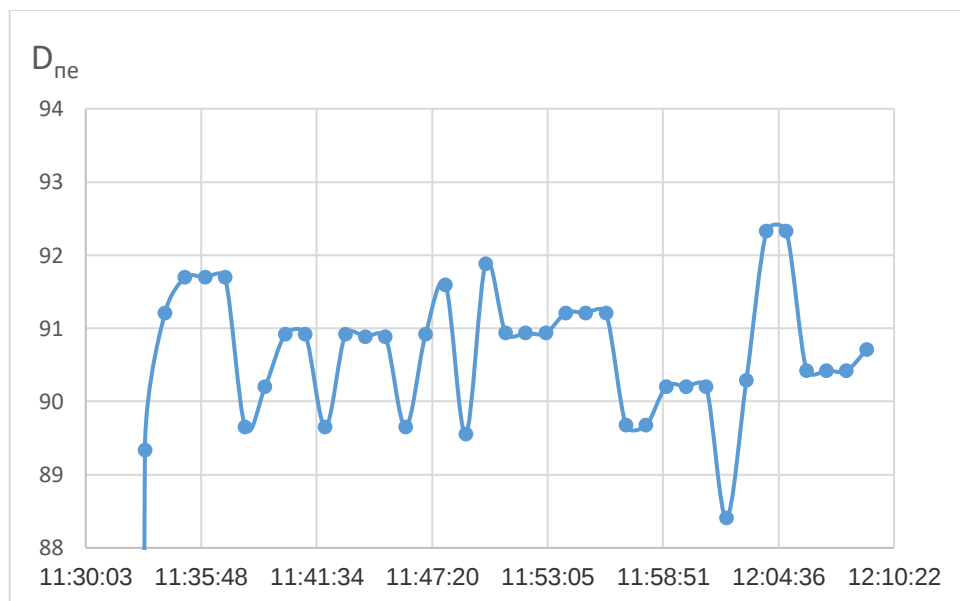


Рисунок 4.3.7 – Изменение расхода пара за котлом в опыте с поворотом горелки
(в 11-39 завершён поворот вверх, в 11-56 завершён поворот вниз)

В целом, как было показано в главе II, диапазон поворота горелок $\pm 15^\circ$ не приводит к чрезмерным колебаниям режима, регулятор расхода топлива их эффективно компенсирует.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

В ходе испытаний горелки на работающем котле при горизонтальном положении (угол поворота 0°) зафиксирована стабильная и надёжная работа горелочного устройства при сжигании угольной пыли и природного газа во всём рабочем диапазоне нагрузок котла. Разработана методика углублённых испытаний для оценки влияния одной горелки на показатели котла в целом.

Экспериментальные исследования показали, что вертикальный поворот горелки оказывает существенное влияние на температуру перегретого пара. Получена зависимость изменения температуры перегретого пара от угла поворота горелки. Поворот одной горелки на $\pm 15^\circ$ обеспечивает изменение $t_{\text{пе}}$ в диапазоне $\pm 3^\circ\text{C}$.

Колебания паропроизводительности котла при повороте горелки незначительны и эффективно нивелируются регулированием расхода топлива в автоматическом режиме.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТОПОЧНЫМ РЕЖИМОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ СЖИГАНИЯ С ПОВОРОТНЫМИ ГОРЕЛКАМИ

5.1 Общие принципы управления топочным режимом

Общая схема алгоритма управления системой контроля и корректировки режима горения представлена на рис. 5.1. В нашей статье «Исследование влияния положения факела в топке на режим работы пылеугольного котла» отмечается, что «в качестве исходных параметров, контролируемых в непрерывном режиме, приняты:

температура металла горелок $t_{м.г}$ (датчики устанавливаются в выходной части каждой горелки);

температура металла пылепроводов $t_{пш}$ (датчики размещаются на каждом пылепроводе перед горелкой), может использоваться в качестве косвенного параметра для оценки взрывобезопасности;

температура газов на выходе из топки t_T (охлаждаемые датчики (или пирометры) устанавливаются в верхней части топки));

температура перегретого пара $t_{пе}$ (щитовые показания).

При изменении различных исходных параметров может возникнуть потребность произвести определённые действия для корректировки режима горения, которые могут оказаться несовместимыми. Во избежание противоречивых команд в алгоритме вводится градация исходных параметров, а именно их ранжирование на параметры I и II категории важности.

При отклонении параметров от нормы система в первую очередь будет реагировать на изменение параметров I категории; если же они находятся в допустимых диапазонах, система отреагирует на изменение параметров II категории» (Теплоэнергетика, № 4, 2024, с. 52-61).

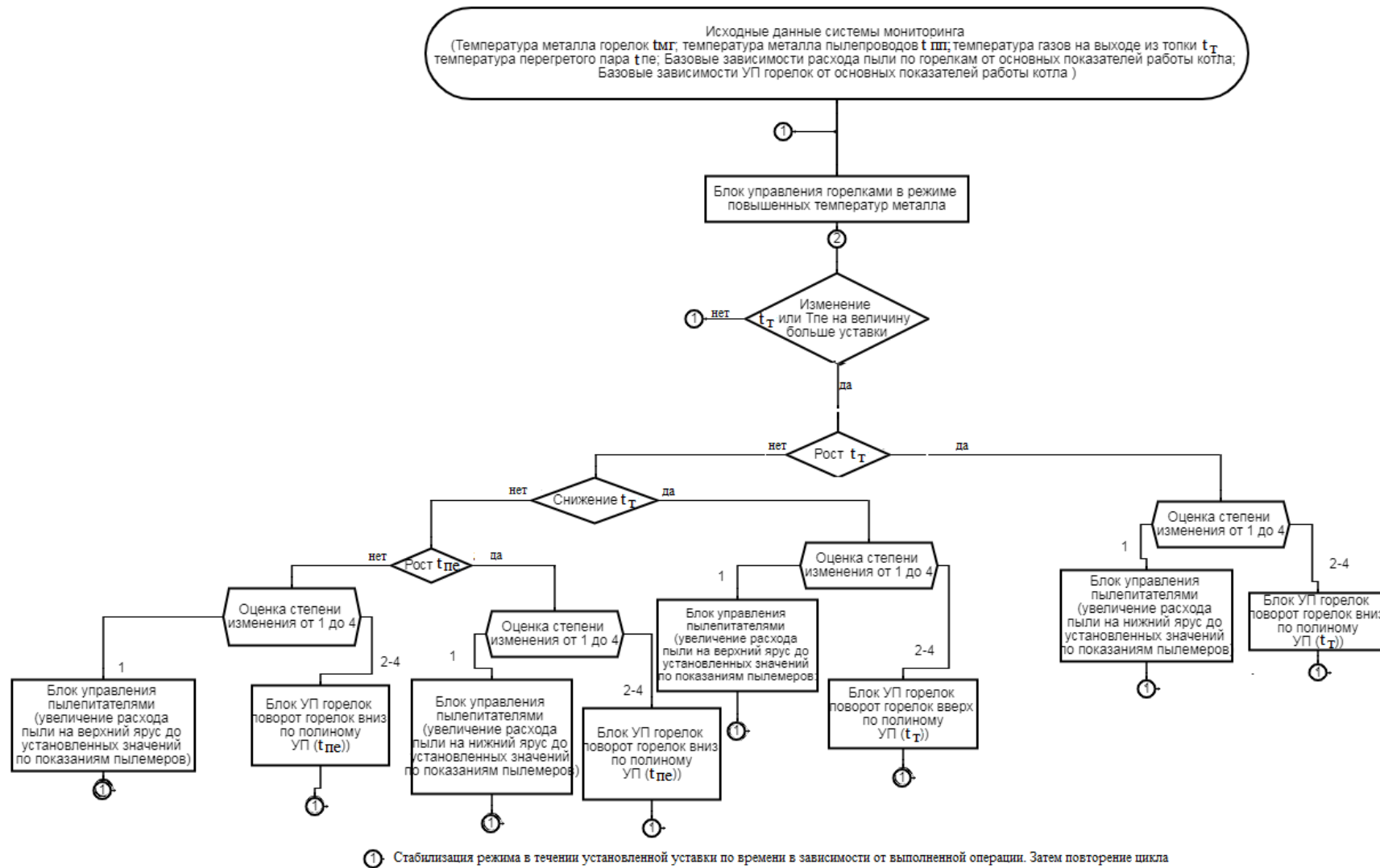


Рисунок 5.1 – Схема алгоритма контроля и корректировки режима горения

В ходе диссертационного исследования нами был сделан вывод о том, что «к параметрам I категории важности относятся температуры металла горелок и пылепроводов. Превышение этих температур сверх установленных значений может приводить к серьёзным повреждениям (прогоранию) горелок и пылепроводов вплоть до критических – требующих замены оборудования. Поэтому система должна обеспечивать, прежде всего, безопасный режим эксплуатации горелок.

К параметрам II категории важности относятся температуры в топочной камере (на выходе из топки и, при необходимости, над уровнем горелок) и температура перегретого пара. Колебания этих температур вне допустимых пределов негативно сказываются на надёжности металла труб пароперегревательных поверхностей нагрева (а температура перегретого пара должна поддерживаться постоянной во всех режимах работы котла). Кроме того, изменение температур в топочной камере является косвенным признаком шлакования поверхностей нагрева (экранов топки или поверхностей в соединительном газоходе). Поэтому при изменении указанных параметров сверх допустимых значений система контроля горения должна вносить корректировки в топочный режим.

Подсистема регулирования $t_{пе}$ является дополнением к штатной системе регулирования температуры перегрева с помощью впрысков» (Теплоэнергетика, № 4, 2024, с. 52-61). Стоит отметить, что нехватка конденсата/воды на впрыски и, соответственно, трудности с регулированием $t_{пе}$ – весьма распространённые проблемы для пылеугольных котлов.

Максимальной эффективности система сжигания с регулированием положения факела по высоте могла бы достигнуть при полной автоматизации управления поворотом горелок, т.е. при реализации алгоритма, в котором система сама реагирует соответствующим поворотом горелок на изменение различных показателей котельной установки.

Как отмечается в нашей статье «Исследование влияния положения факела в топке на режим работы пылеугольного котла»: «Автоматическая корректировка режима горения при изменении тех или иных входных параметров осуществляется в соответствии с математической моделью на основе полиномов. Эти полиномы получают экспериментальным путём по результатам испытаний котла при разных режимах работы. Например, в ходе испытаний выведена зависимость изменения температуры на выходе из топки от угла поворота горелок, и при повышении температуры на выходе из топки условно на 30°C программа, основываясь на построенном полиноме, будет инициировать поворот горелки таким образом, чтобы температура на выходе из топки снизилась на эти же 30°C. Все допустимые уставки параметров, времени стабилизации режимов и т.д. также определяются в ходе испытаний» (Теплоэнергетика, № 4, 2024, с. 52-61).

5.2 Рекомендации по управлению системой сжигания с обычными горелками (при отсутствии возможности регулирования положения факела по высоте)

Схема алгоритма контроля превышения допустимых значений температур металла горелок и пылепроводов представлена на рис. 5.2. На рис. 5.1 она обозначена одним элементом блок-схемы.

Как отмечается в нашей статье «Исследование влияния положения факела в топке на режим работы пылеугольного котла»: «Система проверяет, наблюдается ли увеличение температуры металла горелки или пылепровода (шесть датчиков по металлу горелок, шесть датчиков по пылепроводам). Если все температуры находятся в допустимых пределах, система переходит к действиям основной части алгоритма (см. рис. 5.1). Если температура превышает допустимое значение согласно показаниям хотя бы одного из 12-ти датчиков, система отключает эффекты воздействия по корректировке показателей II категории вплоть до устранения проблемы повышенных температур в горелках. Затем определяются горелки и пылепроводы с

повышенными температурами. После выявления проблемных зон на блок управления пылепитателями поступает команда по снижению расхода пыли в проблемные горелки и увеличению расхода пыли в остальные горелки.

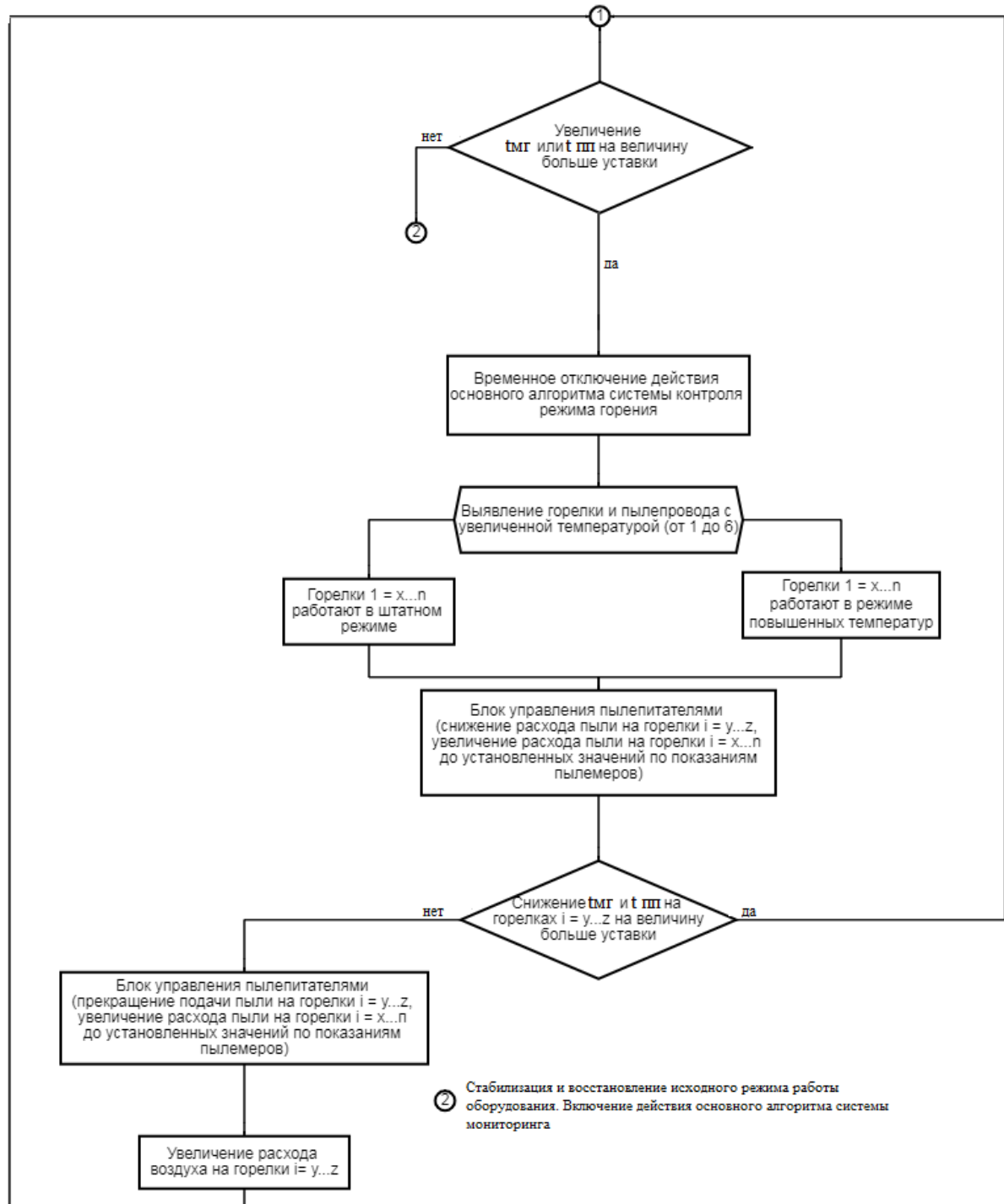


Рисунок 5.2 – Блок управления горелками в режиме повышенных температур металла

Перераспределение пыли в данном случае позволит, во-первых, поддержать паропроизводительность, а во-вторых, оценить возможность устранения проблемы без отключения горелки.

Далее вновь проверяется уровень температур по всем датчикам. Если температуры в проблемных зонах снизились, происходит стабилизация режима. Если снижения не наблюдается, система дает команду на прекращение подачи пыли в проблемные горелки (и увеличение расхода пыли в остальные горелки). Затем горелки продуваются воздухом с повышенным расходом в целях выдувания возможных отложений пыли и снижения температур металла.

После стабилизации температур восстанавливается исходный режим работы системы. Если проблема увеличения температур металла горелок и пылепроводов больше не наблюдается, система включает действие основной части алгоритма и начинает корректировку режима по параметрам II категории.

После шага контроля температур металла горелок система проверяет, происходит ли изменение температуры газов на выходе из топки или температуры перегретого пара превышают допустимые уставки. Если такие изменения есть, система выявляет проблему и соответствующим образом корректирует режим с учётом степени изменения отслеживаемых параметров.

Точные значения определяются в ходе испытаний, но в общем виде предполагается следующая схема. В программу закладываются четыре степени изменения отслеживаемых параметров. Для температуры перегретого пара один шаг изменения принимается равным 3°C , таким образом, возможное отклонение составит $\pm 12^{\circ}\text{C}$. Изменение температуры на 3°C (в любую сторону) соответствует 1-й степени отклонения параметра, изменение на $3\text{--}6^{\circ}\text{C}$ – 2-й степени, на $6\text{--}9^{\circ}\text{C}$ – 3-й степени, на $9\text{--}12^{\circ}\text{C}$ – 4-й степени отклонения. Контроль изменения $t_{\text{пе}}$ (температуры перегретого пара) важен при возникновении проблемных ситуаций, когда регулировка $t_{\text{пе}}$ впрыском

собственного конденсата оказывается недостаточно эффективной» (Теплоэнергетика, № 4, 2024, с. 52-61).

Если изменение температуры перегретого пара относительно невелико (1-я степень), система контроля горения пробует решить проблему за счёт перераспределения топлива между ярусами горелок, либо с помощью других доступных режимных мероприятий (изменение доли третичного воздуха при ступенчатой схеме сжигания и пр.).

5.3 Рекомендации по управлению системой сжигания с поворотными горелками (с возможностью регулирования положения факела по высоте)

Система сжигания с поворотными горелками позволяет осуществлять дополнительную корректировку топочного режима при существенном (2–4-я степени) отклонении температуры перегретого пара от номинального значения.

В нашей статье «Исследование влияния положения факела в топке на режим работы пылеугольного котла» отмечается, что «в этом случае на указатель положения горелок (УПГ) подается сигнал, в результате чего горелка поворачивается вверх или вниз в соответствии с заложенной в алгоритм зависимостью УПГ горелки от $t_{\text{пе}}$. Указатель положения горелки (вверх, вниз или горизонтально) меняется в зависимости от значения температуры перегретого пара. По результатам испытаний строится зависимость «если $t_{\text{пе}}$ меняется на x °C, угол поворота горелки меняется на y °». Например, при 2-й степени отклонения температуры горелка поворачивается на 5° в соответствии с построенной зависимостью, при 3-й степени – на 10°, при 4-й степени – на 15°.

Общая закономерность реакции системы на изменение температуры перегретого пара следующая. Если наблюдается рост этой температуры, с большой вероятностью происходит шлакование экранов топки и повышение тепловосприятия пароперегревательных поверхностей нагрева. В этом случае целесообразно подать больше топлива на нижний ярус горелок и (если этого

недостаточно) направить горелки вниз. Факел сместится вниз, экраны топки воспримут больше тепла, тепловосприятие пароперегревательных поверхностей уменьшится, температура перегретого пара снизится. При снижении температуры перегретого пара следует выполнить обратные действия – подать меньше топлива на нижний ярус и направить горелки вверх.

Изменение температуры газов на выходе из топки воздействует на систему аналогично изменению температуры перегретого пара. Однако температура газов меняется быстрее и в более широких диапазонах, чем температура перегретого пара, поэтому для данного параметра уставки принимаются другими. Например, в алгоритм будет заложена возможность изменения t_t в пределах $\pm 40^\circ\text{C}$. Тогда 1-я степень отклонения параметра будет соответствовать 10°C (система перераспределяет топливо по ярусам горелок), 2-я степень – 20°C (система поворачивает горелки на 5°), 3-я степень – 30°C (поворот горелок на 10°), 4-я степень – 40°C (максимальный поворот на 15°). Точные уставки и соответствующие изменения угла поворота горелок определяются в ходе испытаний.

В алгоритме (см. рис. 5.1) присутствуют блоки «Оценка степени изменения параметра от 1-й до 4-й». По результатам проведённой оценки система принимает решение, как именно скорректировать режим горения.

Порядок контроля параметров задан так, что сначала система проверяет температуру газов на выходе из топки и лишь затем – температуру перегретого пара. Температура газов быстрее реагирует на изменение режима, предположительно, мониторинг этого показателя позволит более оперативно корректировать режим горения» (Теплоэнергетика, № 4, 2024, с. 52-61).

Как очевидно из сказанного выше, реализация представленных принципов управления топочным режимом требует получения опытных зависимостей температуры перегретого пара от угла поворота горелок. С этой целью были проведены исследования работы головного образца поворотной горелки на котле БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2. Результаты данных исследований,

включая зависимость температуры перегретого пара от угла поворота горелки, приведены в Главе IV (см. табл. 4.3.2).

В нынешнем виде система регулирования положения факела на котле БКЗ-210-140 работает следующим образом. Если $t_{\text{гс}}$ меняется в пределах 1 градуса (в любую сторону), система не даёт никаких рекомендаций. Если $t_{\text{гс}}$ меняется на ≥ 1 градус, система выдаёт надпись на мониторе около горелки: «Высокое (низкое) значение $t_{\text{гс}}$, рекомендуется повернуть горелку № 3 вниз (вверх) на X° ». Где X определяется согласно данным из табл. 4.3.2. Если $t_{\text{гс}}$ изменилась больше, чем на 3 градуса, около горелки горит рекомендация максимального поворота в соответствующую сторону.

5.4 Перспективы развития и внедрения алгоритма управления топочным режимом с использованием поворотных горелок

Понятно, что в полной мере реализовать описанный алгоритм на действующем котле в настоящее время непросто. Например, можно отметить, что постоянное измерение температуры газов на выходе из топки – нетривиальная задача ввиду высокого уровня этих температур. На подавляющем большинстве котлов первая температура по газовому тракту, фиксируемая на щите, – температура газов в поворотной камере.

Шлакование поверхностей нагрева – один из тех процессов, которые крайне тяжело поддаются онлайн-мониторингу. Тем не менее, системы мониторинга шлакования исследуются рядом компаний, и в будущем эта проблема может быть эффективно решена.

Большим прорывом в деле автоматического регулирования режима горения стала бы возможность онлайн-контроля основных характеристик сжигаемого угля: точно зная текущие значения влажности, зольности, теплоты сгорания, выхода летучих и пр., можно было бы добиться высочайшей эффективности алгоритма корректировки топочного режима. Однако такая степень контроля свойств угля в настоящее время представляется совершенно невозможной.

Поэтому наиболее перспективным направлением практических исследований является реализация в максимальной степени алгоритма, представленного на рис. 5.1-5.2. Его апробация откроет широкие возможности для тиражирования на котлах РФ, например, по следующему плану:

формирование перечня котлов РФ с классификацией на группы по типу углей, схемам сжигания, часто возникающим проблемам и др;

разработка базовых вариантов алгоритма управления режимом и особенностей его реализации для каждой группы котлов.

Дальнейшие исследования влияния регулирования положения факела на особенности работы котла позволят добавить новые блоки в разработанный алгоритм. Например, для котлов, сжигающих попеременно уголь и природный газ, актуально исследование возможности повышения эффективности работы котла в переходных режимах за счёт использования поворотных горелок. Сжигание угля и газа характеризуется разными значениями коэффициентов тепловой эффективности экранов. При переходе с одного топлива на другое зачастую имеют место переходные режимы разной продолжительности, в течение которых распределение температур газов по высоте топки отличается от условий работы на чистом угле или на чистом газе. Как правило, данные режимы характеризуются ухудшением эффективности сжигания топлива. Проведя необходимые расчёты и построив зависимости температур газов от того или иного режима работы котла по топливу, можно разработать рекомендации по регулированию положения факела в переходных режимах.

Также заслуживает внимания исследование возможности снижения минимально допустимой нагрузки пылегазовых котлов при использовании поворотных горелок. К котлам, сжигающим уголь и природный газ (в смеси или даже попеременно), зачастую предъявляется требование по обеспечению минимальной нагрузки 30% от номинальной. Однако, как правило, такая нагрузка труднодостижима, особенно на старых котлах – для них минимальная нагрузка составляет около 50% от номинальной. Возможность

регулирования положения факела по высоте топки с помощью поворотных горелок может позволить решить ряд эксплуатационных проблем при снижении нагрузки котла.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

Разработана общая схема алгоритма управления топочным режимом, включающая варианты использования как обычных горелок, так и поворотных горелочных устройств. Сформирован перечень основных контролируемых параметров, разделённых на категории в зависимости от степени влияния на работу котла.

Для реализации описанных принципов управления топочным режимом на котле БКЗ-210-140 получены экспериментальные данные по влиянию угла поворота горелки на $t_{\text{пе}}$. В соответствии с полученной зависимостью система регулирования положения факела выдаёт рекомендации по необходимости поворота горелки, а также по направлению и величине угла поворота.

Апробация и дальнейшее развитие представленного алгоритма управления топочным режимом открывает возможность для внедрения системы сжигания с поворотными горелками на многих котлах РФ. Появление усовершенствованной версии алгоритма возможно по результатам исследования дополнительных аспектов влияния регулирования положения факела на особенности работы котла. К таким исследованиям относится оценка возможности повышения эффективности работы котла в переходных режимах (при переходе с угля на газ и наоборот), возможность снижения минимально-допустимой нагрузки котла и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационной работы можно сделать следующие выводы:

1. Проведены углублённые исследования влияния регулирования положения факела по высоте на топочный режим пылеугольного котла. Расчётные исследования в программе Boiler Designer на примере работы котла БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2 показывают, что изменение направления факела на начальном участке в пределах $\pm 15^\circ$ позволяет обеспечить диапазон регулирования температур газов на выходе из топки 90°C . Результаты моделирования топочного процесса в программе ANSYS Fluent показывают даже больший возможный диапазон регулирования температуры газов – $100\text{--}120^\circ\text{C}$. Обоснован вывод об оптимальном диапазоне угла поворота горелок $\pm 15^\circ$. Даны предварительные рекомендации по корректировке методики расчёта параметра относительного расположения максимума температур по высоте топки (параметра М).

2. Наиболее эффективно регулировать положение факела по высоте топки позволяет поворотная горелка. Разработаны основные технические решения по малоэмиссионной вихревой пылегазовой горелке с возможностью её поворота на $\pm 15^\circ$ в вертикальной плоскости. Обосновано применение в конструкции горелки конусообразных рассекателей, установленных по окружности в канале аэросмеси с целью снижения выбросов NO_x . По результатам первичного опробования головного образца вихревой поворотной горелки на котле БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2 была усовершенствована конструкция отдельных её узлов.

3. Получена зависимость температуры перегретого пара от угла поворота горелки. Установлено, что даже одна поворотная горелка позволяет регулировать значение температуры перегретого пара в диапазоне, как

минимум, ± 3 °С. После замены всех шести штатных горелок на поворотные диапазон регулирования $t_{\text{пе}}$ может расшириться до ± 20 °С.

4. Как отмечается в нашей статье «Исследование влияния положения факела в топке на режим работы пылеугольного котла», «Разработан алгоритм автоматической корректировки режима горения с использованием поворотных горелок, основу которого составляет двухступенчатая оценка категорий значимости параметров котла с четырьмя степенями отклонений этих параметров от номинального значения. Для построения полиномов математической модели, на базе которой будут разработаны реакции системы управления, в дальнейшем необходимо будет получить дополнительные эмпирические зависимости» (Теплоэнергетика, № 4, 2024, с. 52-61). Разработанный алгоритм частично реализован на котле БКЗ-210-140.

5. Разработанные основные технические решения по конструкции вихревой поворотной горелки могут быть использованы для проектирования поворотных горелок с последующим их тиражированием на энергетических котлах РФ. В перспективе такие горелки могут использоваться также для расширения диапазона рабочих нагрузок пылегазовых котлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов, И. А. Перспективы угля в топливно-энергетическом комплексе России и мира / И. А. Агафонов, О. С. Чечина, А. В. Васильчиков, Д. Е. Овчинников // Московский экономический журнал. – 2022. № 2. С. 366–382.
2. Алексеев, Д. И. Реализация процесса газификации для получения синтез-газа в промышленных масштабах / Д. И. Алексеев, Д. А. Чусова // Наука и производство Урала. – 2022. – № 19. С. 9–13.
3. Алехнович, А. Н. Характеристики и свойства энергетических углей / А. Н. Алехнович; ОАО «Инженерный Центр Энергетики Урала»; Филиал «УралВТИ». – Челябинск: Изд-во «Цицеро», 2012. – 549 с.
4. Ахмадалиев, У. А. Вихревые горелки с низким выбросом NO_x . У. А. Ахмадалиев, Х. М. У. Хайдаров, М. М. У. Маткосимов // Точная наука. – 2018 – № 26, С. 74–78.
5. Ашейчик, А. А. Экспериментальное исследование свойств уплотнительных резин при высоких и низких температурах / А. А. Ашейчик, В. Л. Полонский // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – 2016. Т. 17, № 3. С. 656-664.
6. Балякин, В. Б. Методы и средства снижения момента трения в торцовых уплотнениях / В. Б. Балякин, С. В. Фалалеев // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 5. – С. 604–611.
7. Баторшин, В. А. Повреждение малотоксичных горелок на ТЭС Lamtha // Энергетика за рубежом. – 2017. – № 2. – С. 43–50.
8. Беликов, С. Е. Котлы тепловых электростанций и защита атмосферы: [учебное пособие для студентов вузов и колледжей по специальности «Тепловые электростанции»] / С. Е. Беликов, В. Р. Котлер. – Москва: Аква-Терм, 2008. – 212 с.

9. Большаков, Б. О. Стабильность структуры и свойств материала композитных уплотнений px13m2-bn для паровых турбин при длительном термическом воздействии / Б. О. Большаков, Р. Ф. Галиакбаров, А. М. Смыслов // Электрические станции. – 2023. – № 2 (1099). – С. 7–11.

10. Бычихин, С. А. Использование малотоксичных горелок в теплоэнергетике на примере горелки DMPJE с низким выбросом оксидов азота / С.А. Бычихин, С.В. Бруев // сборник трудов международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвященной 165-летию В. Г. Шухова (Белгород, 1–20 мая 2018 г.). – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018. – С. 4486–4488.

11. Водород: формирование рынка и перспективы в России: Аналитический доклад Института проблем естественных монополий, апрель 2022. – URL: <https://ipem.ru/content/vodorod-formirovanie-rynka-i-perspektivy-rossii/> (дата обращения 21.08.2025). – Текст: электронный.

12. Воздушный сепаратор PRESEP LTR. Проспект фирмы «PSPEngineering», 2014. URL: <http://www.pspeng.com/cz/> (дата обращения 21.08.2025). – Текст: электронный.

13. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, 9 января 2025. – URL: <http://government.ru/docs/53923/> (дата обращения 21.08.2025). – Текст: электронный.

14. Гидравлический расчет котельных агрегатов: Нормат. метод / [О. М. Балдина, В. А. Локшин, Д. Ф. Петерсон и др.]; Под ред. В. А. Локшина [и др.]. – Москва: Энергия, 1978. – 255 с.

15. Дручок, В. М. Модернизация системы смазки и системы воздушного уплотнения подшипника ГТУ с целью оптимизации его работы / В.М. Дручок, Н.Н. Гордеев // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2021. – № S1. – С. 122–124.

16. Зайнуллин, С. Б., Черняев, М. В. Перспективы развития угольной отрасли в России: пессимистический и оптимистический сценарий // Экономические системы. – 2023. Том 16, № 2 (61). С. 143–154.

17. Заявка RU № 163352U1, МПК F16K1/226. Уплотнение затвора воздушного: опубл. 20.07.2016 бюл. № 20; авторы: Козляков В. И., Астахов Ю. В.; патентообладатель ООО «Полесье».

18. Заявка RU № 2014132122А, МПК F16J15/42. Способ уплотнения воздушных каналов: опубл. 20.03.2016 бюл. № 08; заявитель и автор Письменный В.Л.

19. Заявка RU № 2242691C2, МПК F28D19/04, МПКF23L15/02. Установка для газодинамического уплотнения регенераторных воздухоподогревателей: опубл.20.12.2004; авторы: Елисеев А. В., Копосов Н. А., Поликарпов А. И., Сергиевский Н. В., Скаковский Л. И., Туманов В. П.

20. Заявка RU № 2604265C2, МПК F16J15/00. Тканевое уплотнение: опубл. 10.12.2016 бюл. № 34.; авторы: Саравате Н. Н., Вебер Д. У., Морган В. Д., Самудрала О.; патентообладатель Дженерал Электрик компани.

21. Заявка RU № 2613361C 2, МПК F16L55/17, МПК F16L1/26. Устройство и способ для уплотнения трубы и способ изготовления указанного устройства: опубл. 16.03.2017 бюл. № 8.; авторы: Боуи А.Д.; патентообладатель Статс (ЮКей) Лимитед.

22. Заявка RU № 2684070C2, МПК F16J15/16. Радиальное уплотнение подвижного соединения: опубл. 03.04.2019 бюл. № 28; авторы: Органисчак М., Фоти К., Баарт П.; патентообладатель Актиеболагет СКФ.

23. Заявка RU № 2359843C2, МПК B60D5/00, МПК B64C1/14, МПК F16J15/52. Тканевый слой сильфонного уплотнения: опубл. 27.06.2009 бюл. № 18; авторы: Кох Р.; патентообладатель Хюбнер ГмбХ.

24. Заявка RU № 2515869C2, МПК B12H9/10, МПК F01D11/12.Сотовое уплотнение и способ его изготовления: опубл. 20.05.2014 бюл. № 14; авторы: Уолкер П. М., Фэйрбоурн Д.

25. Заявка RU № 2659429, МПК F16J15/06, МПК F16K1/226. Высокотемпературные уплотнения для использования в поворотных клапанах: опубл. 02.07.2018 бюл. № 19; автор Джексон Т. Ф.; патентообладатель Фишер Контролз Интернешнел ЛЛС (US).

26. Заявка RU № 2717590C2, МПК F16K41/04, МПК F16J15/18. Система уплотнения сжатым газом для регулирующих клапанов: опубл. 24.03.2020 бюл. № 9; авторы: Маккарти М. У.; патентообладатель Фишер Контролз Интернешнел ЛЛС.

27. Заявка RU № 2688607C 1, МПК F16K1/226. Газодинамическое уплотнение клапана: опубл. 21.05.2019 бюл. № 15; авторы: Куница С. П., Ланевский Т. М., Попарецкий А. В.; патентообладатель «Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ПАО «ОДК-УМПО»).

28. Зройчиков, А. Н. Решение проблемы выбросов оксидов азота в штате Калифорния (США) / А. Н. Зройчиков, Д. В. Шпаков, А. О. Никулин, В. Р. Котлер // Энергетика за рубежом. Приложение к журналу «Энергетик». – 2018. – № 6. – С.44–47.

29. Иванов, В. В. Сравнительный анализ технологий изготовления сотовых уплотнений / В. В. Иванов, С. В. Тагильцев // Газотурбинные технологии. – 2019. – № 6 (165). – С. 26–29.

30. Изюмов, М. А. Проектирование и расчет горелок: Учеб.пособие по курсу «Парогенераторы» / М. А. Изюмов, П. В. Росляков; Ред. Т. В. Виленский; Моск. энерг. ин-т. – Москва: Изд-во МЭИ, 1990. – 113 с.

31. Исследование причин повреждений испарительных труб контура низкого давления котлов-утилизаторов большой мощности / К. А. Плешанов, Р. С. Маслов, В. С. Панков, К. В. Стерхов, Д. А. Хохлов // Теплоэнергетика. – 2020. – № 8. – С. 58–69.

32. ИТС 38-2022. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии: Информационно-технический справочник по

наилучшим доступным технологиям (утв. приказом Росстандарта от 20.12.2022 № 3227). – URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/zaklyuchenie/0/its_38-2022_informatsionno-tekhnicheskiiy_spravochnik_po.html (дата обращения 21.08.2025). – Текст: электронный.

33. ИТС 38-2024. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии: Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (утв. приказом Росстандарта от 23.12.2024 № 3041). – URL: https://oei-analitika.ru/kurilka/order_info.php?order_id=631630 (дата обращения 21.08.2025). – Текст: электронный. (желательно включить в список источников этот стандарт)

34. Котлер, В. Р. Малотоксичное сжигание углей в топках мощных энергетических котлов / В. Р. Котлер, Д. В. Сосин, А. В. Штегман, И. А. Рыжий // Надёжность и безопасность энергетики. 2013. – № 4 (23). – С. 41–44.

35. Котлер, В. Р. Опыт внедрения малотоксичных горелок на крупных пылеугольных котлах // Энергохозяйство за рубежом. 2009. – № 3. – С.18–21.

36. Котлер, В. Р. Опыт перевода угольного котла на непроектное топливо. В. Р. Котлер, И. А. Рыжий, И. В. Маслак // Энергохозяйство за рубежом. – 2014. – № 2 (273). – С. 23–28.

37. Котлер, В. Р. Разработка и внедрение методов подавления оксидов азота на угольных котлах ТЭС / В. Р. Котлер, И. А. Рыжий // Электрические станции. – 2016. – № 6 (1019). – С.45–50.

38. Котлер, В. Р. Снижение выбросов оксидов азота в котельных установках ТЭС: учебно-методическое пособие / В. Р. Котлер; М-во образования и науки Российской Федерации, Ин-т повышения квалификации гос. служащих (ИПКГосслужбы), Каф. «Эксплуатация энергетических объектов и энергосбытовая деятельность». – Москва: ИПКГосслужбы, 2011. – 51 с.

39. Котлер, В. Р. Экологические проблемы угольных ТЭЦ // Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. – 2016. – № 8, С. 21–28.

40. Крысов, И. Н. Совершенствование уплотнения подвижных соединений (УПС) из полимерных материалов для силовых гидроцилиндров. / И. Н. Крысов, Н. Н. Яшин, В. С. Нагорский // Молодежь и наука. – 2016. – № 5. – С. 121.

41. Куней, Ю. А. Модернизация радиальных уплотнений регенеративных воздухоподогревателей паровых энергетических котлов / Ю. А. Куней, В. А. Поздеев, Т. А. Екимова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – № 1 (117). – С. 27–30.

42. Лисиенко, В. Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: справочник в 3 кн. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев; под ред. В. Г. Лисиенко. – Москва: Теплотехник, 2003. – 586 с.

43. Машиностроение. – Москва: Машиностроение, 1994. Разд. IV, Т. IV-18: Расчет и конструирование машин. Т. IV-18. Котельные установки / [Ю. А. Рундыгин и др.]; ред.-сост.: Ю. С. Васильев, Г. П. Поршневу; отв. ред. К. С. Колесников. – 2009. – 399 с.

44. Мельницы Vertimill для тонкого и сверхтонкого мокрого измельчения / Проспект фирмы MetsoCorporation, Финляндия, 2006. URL: <https://www.metso.com/ru/portfolio/vertimill/> (дата обращения 21.08.2025). – Текст: электронный.

45. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / АО открытого типа «Науч.-произв. об-ние по исслед. и проектированию энергет. оборудования им. И. И. Ползунова», Всерос. теплотехн. науч.-исслед. ин-т; [Ю. Л. Маршак и др.]; Под ред. Э. Х. Вербовецкого, Н. Г. Жмерика. – СПб.: АООТ НПО ЦКТИ, 1996. – 270 с.

46. Мешков, Г. Б. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год / Г. Б. Мешков, И. Е. Петренко, Д. А. Губанов // Уголь. – 2024. – № 3. – С 18–29.

47. Назмеев, Ю. Г. Системы топливоподачи и пылеприготовления ТЭС: справочное пособие / Ю. Г. Назмеев, Г. Р. Мингалеева. – Москва: Изд. дом МЭИ, 2005 (Москва:НИИ Геодезия). – 479 с.

48. Новак, А. Угольная промышленность XXI века: закат или ренессанс // Энергетическая политика. – 2022. – № 10(176). – С. 6–13.

49. Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоёмких технологий: Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50755> (дата обращения 21.08.2025). – Текст: электронный.

50. Общая энергетика: развитие топочных технологий: учебное пособие для вузов: в 2-х частях / под научной редакцией Б. В. Берга. Ч. 2. – Москва: Юрайт, 2022. – 209 с.

51. Ольховский, Г. Г. Разработка отечественной ПГУ с внутрицикловой газификацией топлива / Г.Г. Ольховский, С.И. Сучков, А.Н. Епихин // Теплоэнергетика. – 2010. – № 2. – С.19–26.

52. Опыт применения малоэмиссионных горелок для снижения вредных выбросов оксидов азота на энергетическом котле угольной ТЭЦ // А. В. Штегман, И. А. Рыжий, Д. В. Сосин, А. В. Соколова, И. И. Трушков // Теплоэнергетика. – 2025. – № 6. – С. 92–104.

53. Опытнo-промышленные испытания горнoвого газификатора / И. А. Рыжий, А. В. Штегман, А. Н. Тугов, Д. А. Сиротин, М. М. Гутник, Е. А. Фоменко, Д. В. Сосин, К. В. Тимашков, С. В. Алексеенко, А. С. Заворин, В. Е. Губин, А. С. Матвеев, Д. В. Гвоздяков, К. Б. Ларионов, С. А. Янковский, К. В. Слюсарский // Теплоэнергетика. – № 6. – 2021. – С. 55–67.

54. Основы современной энергетики. – 5-е изд., стер. – Москва: Изд. дом МЭИ, 2010. Т. 1: Современная теплоэнергетика. Т. 1 / [А. Д. Трухний и др.]; под ред. А. Д. Трухния. – 2010. – 469 с.

55. Особенности глубоких разгрузок энергетических барабанных котлов на давление свежего пара 130 кгс/см² ТЭЦ – филиалов ПАО «Мосэнерго» / Ю. А. Радин, М. Н. Ленев, К. В. Хансеев, Д. А. Мельников, В. Б. Смышляев // Электрические станции. – 2021. – № 9 (1082). – С. 17–22.

56. ОСТ 24.030.26–72. Горелки вихревые пылеугольные, пылегазовые и компоновка их с топками: Методы расчёта и проектирования. Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения; Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский котлотурбинный институт им. И. И. Ползунова, 1974. – 107 с.

57. Паровые котлы: регулирование температуры перегретого пара: учебное пособие по курсу «Паровые котлы для студентов, обучающихся по направлению 13.04.03 «Энергетическое машиностроение» / М. А. Изюмов, М. Н. Зайченко, К. А. Плешанов [и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский университет «МЭИ». – Москва: Изд-во МЭИ, 2024. – 61 с.

58. Патент СА № 2957983A1, МПК F23D1/02, МПК F23D14/22, МПК F23D11/38, МПК F23D14/32, МПК F23D14/48, МПК F23L7/00. Малотоксичная горелка: опубл. 10.03.2016; авторы: Bernhard Schreiner, Леннарт Рангмарк, Томас Экман, Амброджо Гусберти; патентообладатель Linde GmbH.

59. Патент CN № 210831994U, МПК F23D17/00. Циклонная горелка двойного назначения для пылевидного угля и газа с низким уровнем выбросов NO_x для котлов малой и средней мощности: опубл. 23.06.2020; авторы: Фэн Цзянь, Чжан Чубо, Чжан Вэньцзы, Ма Вэйпин; патентообладатель Компания Shandong Dongneng Power Technology Coltd.

60. Патент JP № 4969015B2, МПК: F23D1/00;F23L7/00\$ F23C99/00; F23C9/08; F23C6/04. Твердотопливная горелка и способ сжигания топлива с использованием твердотопливной горелки: опубл. 04.07.2012; авторы: Дзюити Дзинсю, Янь Лун Мушань, Маносукэ Мотидэн; патентообладатель Mitsubishi PowerLtd.

61. Патент PL № 1741977T3, МПК F23C7/00. Пылеугольная горелка с низким уровнем выбросов NO_x: опубл. 29.02.2012, авторы: Heinz Gräwe, Alfons Leisse; патентообладатель Application filed by Mitsubishi Hitachi Power Systems Europe GmbH.

62. Патент RU 2024667251. Программа для ЭВМ «Программа по расчёту допустимой по условию отсутствия шлакования температуры газов на выходе из топки при работе котла БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2 в условиях колебания свойств угля»: опубл. 22.07.2024 бюл. № 8; авторы Штегман А. В., Рыжий И. А., Сосин Д. В., Базулина А. В.; правообладатель АО «Томская генерация».

63. Патент RU 207329 U1, МПК F23D1/02. Пылеугольная горелка с поворотной выходной частью: опубл. 25.10.2021 бюл. № 30; авторы: Штегман А. В., Рыжий И. А., Фоменко Е. А., Сосин Д. В.; патентообладатель АО «Томская генерация».

64. Патент RU № 219202U1, МПК F23D1/00. Пылеугольная горелка с поворотной выходной частью и огнеупорным уплотнением трубопроводов: опубл. 04.07.2023 бюл. № 19; авторы: Штегман А. В., Рыжий И. А., Сосин Д. В., Базулина А. В., Натальин А. С.; патентообладатель АО «Томская генерация».

65. Патент RU № 132865U1, МПК F23D1/02. Горелочное устройство Дубровского: опубл. 27.09.2013 бюл. № 27; автор Дубровский В. А патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ).

66. Патент RU № 2499190C1, МПК F23D1/00. Двухпоточная пылеугольная горелка: опубл. 20.11.2013 бюл. № 32; авторы – Шульман В. Л., Дегтярев М. Б., Горячев Ф. В.; патентообладатель ОАО «Инженерный центр энергетики Урала».

67. Патент RU № 139936U1, МПК F23D1/02. Малотоксичная вихревая пылеугольная горелка с модифицированными рассекателями потока аэросмеси: опубл. 27.04.2014 бюл. № 12; авторы: Штегман А. В., Сосин Д. В., Котлер В. Р., Рыжий И. А.; патентообладатель ОАО «ВТИ».

68. Патент RU № 183126 U1, МПК F23B40/04. Устройство подачи топлива с поворотной ретортной горелкой: опубл. 11.09.2018 бюл. № 26; автор Игошин В. В.; патентообладатель ООО «Торгово-промышленная компания «Красноярскэнергокомплект».

69. Патент RU № 2006132141A, МПК F23C3/00. Вихревая горелка: опубл. 20.03.2008 бюл. № 8; заявитель и автор Тюкин К. К.

70. Патент RU № 2412398C2, МПК F23C99/00, F23D11/00, F23N5/00. Низконапорная прямоточно-вихревая горелка: опубл. 20.02.2011 бюл. № 5; авторы: Сень Л. И., Суменков В. М.; патентообладатели: Сень Л. И., Суменков В. М.

71. Патент RU № 2660230C2, МПК F23L13/06, F24B1/189, F23N3/00. Устройство регулирования подачи воздуха для горения: опубл. 05.07.2018 бюл. № 19; автор – Кайль Петер; патентообладатель Мертик Макситроль ГМБХ УНД КОКГ.

72. Патент RU № 2343349, МПК F23D1/06. Пылеугольная горелка с аэродинамическим преобразователем потока аэросмеси: опубл. 10.01.2009 бюл. № 1; заявитель – ОАО «ВТИ», авторы – Котлер В. Р., Штегман А. В., Сосин Д. В.; патентообладатель ОАО «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт (ВТИ)».

73. Патент RU № 2460941C1, МПК F23D1/02, МПК F23Q9/00, МПК F23C99/00. Способ сжигания угля микропомола и угля обычного помола в

пылеугольной горелке и устройство для его реализации: опубл. 10.09.2012 бюл. № 25; заявитель Институт теплофизики им. Кутателадзе Сибирского отделения РАН; авторы – Алексеенко С. В., Бурдуков А. П., Попов В. И., Попов Ю. С., Шторк С. И.; патентообладатель ИТ СО РАН.

74. Патент RU № 2531425. Гидравлическая система рулевого управления транспортного средства на гусеничном ходу: опубл. 20.10.2014 бюл. № 22; авторы – Новиков Д. М., Казаков В. А., Чупрынин Ю. В.; патентообладатель «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике».

75. Патент RU № 2021664896. Программа для ЭВМ «Программа по определению температуры газов на выходе из топки котла ТПЕ-223 Черепетской ГРЭС»: опубл. 15.09.2021 бюл. № 9; авторы: Штегман А. В., Рыжий И. А., Сосин Д. В., Фоменко Е. А.; правообладатель АО «Интер РАО» – Электрогенерация.

76. Патент RU № 2022662512. Программа для ЭВМ «Программа расчёта допустимой температуры газов на выходе из топки пылеугольного котла БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2 при регулировании топочного режима за счет изменения положения факела по высоте топки»: опубл. 05.07.2022 бюл. № 7; авторы Штегман А. В., Рыжий И. А., Сосин Д. В.; правообладатель АО «Томская генерация».

77. Патент RU № 2024667250. Программа для ЭВМ «Программа по расчёту критериев взрываемости углей при работе котла БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2 в условиях колебания свойств угля»: опубл. 22.07.2024 бюл. № 8; авторы Штегман А. В., Рыжий И. А., Сосин Д. В., Базулина А. В.; правообладатель АО «Томская генерация».

78. Патент RU № 115869U1, МПК F23D1/00. Горелка для концентрированной пыли: опубл. 10.05.2012 бюл. № 13; авторы и патентообладатели: Бондарев А. М., Иванова Н. А., Бондарев Д. А.

79. Патент RU № 207337U1, МПК F231/02. Малотоксичная вихревая пылеугольная горелка с остроконечными рассекателями и завихрителем

потока аэросмеси: опубл. 25.10.2021 бюл. № 30; авторы: Штегман А. В., Рыжий И. А., Фоменко Е. А., Сосин Д. В.; патентообладатель АО «Томская генерация».

80. Патент RU № 225055U1, МПК F23C5/00, МПК F23C5/24. Котел с пылеугольной горелкой: опубл. 12.04.2024 бюл. № 11; автор Казанцев О. В.; патентообладатель ООО «ЭнергоХолдинг».

81. Патент RU № 2418210, МПК F16C23/06, МПК F16C035/06. Опорное устройство для осевой фиксации вращающегося вала изделия: заявл. 29.12.2009 № 2009148690/11; опубл. 10.05.2011; заявители, авторы и патентообладатели: Блинов Д. С., Зябликов В. М., Киселева Е. И., Колобов А. Ю., Мельникова Г. Н.

82. Патент RU № 2573473, МПК B04B1/00/B14B11. Центробежный сепаратор: заявлен 31.08.2012 № 2014113537/05; опубл. 20.01.2016 бюл. № 2; авторы – Исакссон Роланд, Торвид Петер; патентообладатель Альфа Лаваль Корпорейт АБ.

83. Патент RU № 2715301C1. МПК F23D1/00. Вихревая пылеугольная горелка: опубл. 26.02.2020 бюл. № 6; авторы: Сербиновский М. Ю., Курепин М. П., Колесников А. А.; патентообладатель ОАО «Таганрогский котлостроительный завод «Красный котельщик».

84. Патент RU № 92149U1, МПК F23D1/06. Горелка для концентрированной пыли: опубл. 10.03.2010; заявители: Бондарев А. М., Ларионов П. В., Иванова Н. А.; авторы и патентообладатели: Бондарев А. М., Ларионов П. В., Иванова Н. А.

85. Патент RU № 2646164C1, МПК F23D1/02. Вихревая пылеугольная горелка: опубл. 10.03.2018 бюл. № 7; заявитель ООО «ЗиО-КОТЭС»; авторы: Цепенко А. И., Серант Ф. А., Ставская О. И., Белоруцкий И. Ю., Лавриненко А. А.; патентообладатель ООО «ЗиО-КОТЭС».

86. Патент RU № 32564U1, МПК F16J15/34. Торцевое уплотнение вращающегося вала: заявлен 19.05.2003 № 2003114609/20; заявитель

Бушуев В.И.; опубл. 20.09.2003; авторы – Дорофеев Ю. А., Ботян А. Н., Филиппов П. В.

87. Патент RU№ 193688U1, МПК F23D1/00. Горелочное устройство: опубл. 11.11.2019 бюл. № 32; авторы – Клепиков Н. С., Шестаков Н. С., Титов Д. А., Корябкин А. И.; патентообладатель ОАО «НПО ЦКТИ».

88. Патент RU№ 2021665143. Программа для ЭВМ «Математическая модель термического разложения летучих при сжигании Окино-Ключевского бурого угля марки ЗБ»: опубл. 20.09.2021 бюл. № 9; авторы Штегман А. В., Рыжий И. А., Сосин Д. В., Фоменко Е. А.; правообладатель АО «Интер РАО» – Электрогенерация.

89. Патент SU № 305317A1, МПК F23D13/00, МПК F23D11/00, МПК F23D1/04. Прямоточная поворотная горелка: опубл. 04.06.1971 бюл. № 18; авторы: Ахмедов Р. Б., Акбаров А.

90. Патент SU № 723300, МПК F23D17/00A2. Горелка: опубл. 25.03.1980 бюл. № 11; авторы Рябокобыленко И.В., Еременко Р. В., Шуваева Н.М.

91. Патент US № 10731850B2, МПК F23D1/02, МПК F23D1/00. Твердотопливная горелка: опубл. 04.08.2020; авторы: Масаюки Танигути, Акира Баба, Кодзи Курамаси, Шота Исии; патентообладатель Mitsubishi Power Ltd.

92. Перечень поручений по итогам встречи с руководителями угледобывающих регионов от 22.08.2019: Пр. 1707, п. 4. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/61368> (дата обращения 21.08.2025). – Текст: электронный.

93. Плешанов, К. А. Расчет циркуляции котла-утилизатора ПР–76–3.3–415 / К. А. Плешанов, К. В. Стерхов // «Пакет прикладных программ для расчета теплоэнергетического оборудования Boiler Designer-2014»: труды междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 27-29 мая 2014 г.). Москва: Торус Пресс, 2014. – С. 77–82.

94. Половян, А.В. Тренды угольной промышленности Донбасса / А. В. Половян, Н. В. Шемякина, С. Н. Гриневская. // Вестник института экономических исследований. – 2021. – № 2 (22). – С. 5–20.

95. Получение тонкой пыли с помощью мельницы с динамическим сепаратором / А. В. Штегман, И. А. Рыжий, А. В. Беляев, Д. В. Сосин, Е. А. Фоменко // Электрические станции. – 2017. – № 8 (1033). – С. 29–35.

96. Риполь-Сарагоси, Т. Л. Анализ конкурентоспособности различных типов уплотнений в пластинчатых теплообменниках / Т. Л. Риполь-Сарагоси, Я. В. Скуратов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (51). – С. 75–78.

97. Росляков, П. В. Исследование естественной циркуляции в испарителе котла-утилизатора с горизонтальными трубами / П. В. Росляков, К. А. Плешанов, К. В. Стерхов // Теплоэнергетика. – 2014. – № 7. – С. 3–11.

98. Рыжий, И. А. Перспективное топочное устройство для угольных котлов в Сибири и Приморье / И. А. Рыжий, В. Р. Котлер // Электрические станции. – 2012. – № 4. – С. 9–12.

99. Савин, Л. А. Мехатронные уплотнения вращающихся машин. Л. А. Савин, Р. Н. Поляков, А. И. Панченко, А. В. Внуков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 6 (326). – С. 96–104.

100. Саламов, А. А. Малотоксичные горелки. // Энергетика за рубежом. – 2018. – № 1. – С. 54–56.

101. Сальникова, Е. Б. Угольная промышленность России в условиях ориентации на углеродно-нейтральную экономику / Е. Б. Сальникова, М. Н. Гринева // Экономика и управление народным хозяйством. – 2022. – № 1(88). – С. 16–19.

102. СО 34.02.320-2003. Стандарт организации. Методические указания «Организация контроля газового состава продуктов сгорания стационарных паровых и водогрейных котлов». – Москва: СПО ОРГРЭС, 2003. – 30 с.

103. Сомова, Е. В. Современные угольные энергоблоки на суперсверхкритические параметры пара (обзор) / Е. В. Сомова, А. Н. Тугов, А. Г. Тумановский // Теплоэнергетика. – 2023. – № 2. – С. 5–23.

104. Сосин, Д. В. Опыт сжигания каменного угля марки Д разреза АО «Шубарколь Коми́р» в котлах блоков 225 МВт Черепетской ГРЭС / Д. В. Сосин, А. В. Штегман // Электрические станции. – 2017. – № 2. – С. 19–22.

105. Сосин, Д. В. Успешная реконструкция котла П–57 блока 500 МВт Троицкой ГРЭС / Д. В. Сосин, И. А. Рыжий, А. В. Штегман, В. Р. Котлер // Энергетик. – 2014. – № 4. – С. 34–38.

106. Сосин, Д. С. Опыт сжигания лузги подсолнечника в пылеугольных котлах Кумертауской ТЭЦ / Д. С. Сосин, Д. С. Литун, И. А. Рыжий, А. В. Штегман, Н. А. Шапошников // Теплоэнергетика. – 2020. – № 1. – С. 15–22.

107. Таймаров, М. А. Котельная установка с поворотными горелочными устройствами / М. А. Таймаров, А. И. Муртазин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 9-10, С. 27–31.

108. Тепловой расчет котельных агрегатов: (Нормат. метод) / Под ред. д-ра техн. наук Н. В. Кузнецова [и др.]; М-во тяжелого, энерг. и трансп. машиностроения СССР. Центр. науч.-исслед. и проектно-конструкт. котлотурбинный ин-т им. И. И. Ползунова «ЦКТИ». М-во энергетики и электрификации СССР. Всесоюз. теплотехн. науч.-исслед. ин-т им. Ф. Э. Дзержинского «ВТИ». – 2-е изд., перераб. – Москва: Энергия, 1973. – 295 с.

109. Тепловой расчет котлов: (Нормат. метод) / Под ред. С. И. Мочан [и др.]; Центр. науч.-исслед. и проектно-конструкт. котлотурбинный ин-т им.

И. И. Ползунова «ЦКТИ». ОАО «Всеросс. теплотехн. науч.-исслед. ин-т ОАО «ВТИ». – 3-е изд., перераб. и дополн. – Санкт-Петербург, 1998. – 257 с.

110. Теплоэнергетика и теплотехника. Кн. 3: Тепловые и атомные электростанции: Справочник / [Алхутов М.С. и др.]; Под общ.ред. А. В. Клименко и В. М. Зорина. – Москва: Изд-во МЭИ, 2003 (ОАО Тип.Новости). – 648 с.

111. Трёмбовля, В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля, Е. Д. Фингер, А. А. Авдеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 413 с.

112. Тугов, А. Н. Угольные ТЭС в мировом производстве электроэнергии // Энергетик. – 2025. – № 6. – С. 11–18.

113. Угольная промышленность районов крайнего севера: специфические особенности, текущее положение и концепция развития / М. С. Гончаров, Д. Ю. Савон, А. Е. Сафронов, В. И. Ряднов // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2023. – № 1. – С. 95–107.

114. Хзмалян, Д. М. Теория горения и топочные устройства: Учеб. пособие для теплоэнерг. специальностей вузов / Д. М. Хзмалян, Я. А. Каган; Под ред. д-ра техн. наук, проф. Д. М. Хзмаляна. – Москва: Энергия, 1976. – 487 с.

115. Христофорова, А. В. Математическое моделирование колебаний торцевого уплотнения кольцевого канала / А. В. Христофорова, В. С. Попов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 9. – С. 22–24.

116. Штегман, А. В. Технические решения по топочному устройству котла на сверхкритические параметры пара / А. В. Штегман, И. А. Рыжий Д. В. Сосин, В. Р. Котлер // Теплоэнергетика. – 2014. – № 4. – С. 30.

117. Энергетические угли восточной части России и Казахстана. Справочник / В. В. Богомолов, Н. В. Артемьева, А. Н. Алехнович, Н. В. Новицкий (УралВТИ), Н. А. Тимофеева (СибВТИ). – Челябинск: УралВТИ, 2004. – 304 с.

118. A chemical percolation model for devolatilization: summary / Thomas H. Fletcher, Alan R. Kerstein, Ronald Pugmire, Mark S. Solum, Ronald Pugmire, Mark S. Solum, David M. Grant // Brigham Young University. – 1992. – P. 1–66.

119. ANSYS fluent. Theory guide. – Canonsburg, Pennsylvania, USA: ANSYS, Inc., 2014. – 2616 p.

120. Behdad Moghtaderi. A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in pulverised coal-fired furnace // Fuel. – 2004. – T. 83, № 11-12. – P. 1543-1552.

121. CFD investigation of NO_x reduction with a flue-gas internal recirculation burner in a mid-sized boiler / Ho Ky Nhan, Minjun Kwon, Sewon Kim // Journal of Mechanical Science and Technologies. – 2019. – № 33(6). – P. 2967–2978.

122. Choi, C. R. Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler / C. R. Choi, C. N. Kim // Fuel. – 2009. – T. 88, № 9. – P. 1720–1731.

123. Chui, E. H., Computation of radiant heat transfer on a nonorthogonal mesh using the finite-volume method / E. H. Chui, G. D. Raithby // Numerical Heat Transfer. – 1993. – T. 23, № 3. – P. 269-288.

124. Constenla, I. Numerical study of a 350 MWe tangentially fired pulverized coal furnace of the As Pontes Power Plant / I. Constenla, J. L. Ferrín, L. Saavedra // Fuel processing technology. – 2013. – T. 116. – P. 189–200.

125. Development of a NO_x emission model with seven optimized input parameters for a coal-fired boiler / Yue-lan Wang, Zeng-yi Ma, Hai-hui You, Yi-jun Tang // Journal of Zhejiang University – Science A: Applied Physics & Engineering. – 2018. – № 19(40). – P. 315– 328.

126. Effects of Optimized Operating Parameters on Combustion Characteristics and NO_x Emissions of a Burner based on Orthogonal Analysis / Qian

Xu, Nevzat Akkurt, Gang Yang, Lidong Zhu // Journal of Thermal Science. – 2020. № 30(15). – P. 1212–1223.

127. Gao, Mingwei. Isamill fine grinding technology and it's industrial applications at Mount Isa mines / Mingwei Gao, Michael Young, Peter Allum. Australia, 2006, URL: <https://scispace.com/papers/isamill-fine-grinding-technology-and-its-industrial-bui7i0gcwc> (дата обращения 21.08.2025). – Текст: электронный.

128. Influence of mass air flow ratio on gas-particle flow characteristics of a swirl burner in a 29 MW pulverized coal boiler // Rong Yan, Zhichao Chen, Shuo Guan, Zhengqi Li //Frontiers in Energy, 2021. – 2021. – № 15. – P. 68–77.

129. Jung, O. High Efficiency Classifiers for MPS vertical roller mills / Otto Jung, Burkhard Kraft // ZKG International. – 2005. – № 6. – P.55–60.

130. Lalmi D. Study of Swirl Contribution to Stabilization Turbulent Diffusion Flame / Djemoui Lalmi, Redjem Hadeff // CFD Techniques and Energy Applications. – London-Berlin-New York City: Springer, Cham, 2018. – P. 179–194.

131. Leisse A. New experience gained from operating DS (Swirl Stage) burners. A. Leisse, D. Lasthaus // VGB Power tech. – 2008. – № 88 (11). P. 43–49

132. Nihad, Hodzic. Air Staging and Reburning to Achieve Low Emissions During Co-firing Coal and Biomass / Nihad Hodzic, Anes Kazagic, Kenan Kadich // New Technologies, Development and Application III. – London-Berlin-New York City: Springer, Cham, 2020. – P. 657-666.

133. Numerical study of an 870MW wall-fired boiler using De-NO_x burners and an air staging system for low rank coal / Min-Young Hwang, Seok-GiAhn, Ho-Chang Jang // Journal of Mechanical Science and Technologies, 2016.–№ 30(12). – P. 5715–5725.

134. Ranade, V. V. Computational modeling of pulverized coal fired boilers / V. V. Ranade, D. F.Gupta. – Boca Raton, Florida, USA: CRC press, 2014 – 288 p.

135. Walter, H. Numerical simulation of power plants and firing systems / H. Walter, B. Epple. – Luxembourg: Springer Vienna, 2017. – 851 p.

136. Wesseling, P. Principles of computational fluid dynamics. – Luxembourg: Springer, 2009 – 644 p.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ КОТЛА
БКЗ-210-140 ДО РЕКОНСТРУКЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПРЕСС-
ИСПЫТАНИЙ**

№ п/п	Наименование	Обозн.	Значение
1	2	3	4
1	Теплота сгорания угля, ккал/кг	Q^R_i	4810
2	Влажность угля, %	W^R	18,71
3	Зольность угля, %	A^R	10,99
4	Выход летучих, %	V^{daf}	40,73
5	Тонина помола пыли, %	R_{90}	22,96/28,6
6	Влажность пыли, %	$W_{пл}$	6,92/6,44
7	Содержание горючих в шлаке и уносе, %	$\Gamma_{ун}$	1
		$\Gamma_{шл}$	8
8	Концентрация O_2 за ДС, %	$O_{2ДС}$	7,5
9	Концентрация NO_x за ДС, мг/нм ³ при н.у.	$NO_{хДС}$	1232
10	Концентрация CO за ДС, ppm	$CO_{ДС}$	0
11	Концентрация O_2 на выходе из котла, %	$O_{2ВЗП}$	6,6
12	Концентрация O_2 на выходе из топки, %	$O_{2Т}$	5,2
13	Расход перегретого пара, т/ч	$D_{ПЕ}$	210
14	Давление перегретого пара, кгс/см ²	$P_{ПЕ}$	140
15	Температура перегретого пара, °С	$t_{ПЕ}$	560
16	Температура питательной воды фактическая, °С	$t_{ПВ}$	220
17	Температура питательной воды номинальная, °С	$t_{ПВном}$	230
18	Давление питательной воды, МПа	$P_{ПВ}$	15,67
19	Давление в барабане, МПа	$P_Б$	15,18
20	Расход непрерывной продувки, кг/с	$D_{ПР}$	0,583

1	2	3	4
21	Температура газов перед ВЗП1, °C	$T'_{ВЗП1}$	281
22	Температура газов перед ВЗП2, °C	$T'_{ВЗП2}$	465
23	Температура газов перед ЭК2, °C	$T'_{ЭК2}$	648
24	Температура уходящих газов с учётом поправок на номинальные значения температур холодного воздуха, питательной воды, воздуха перед ТВП, °C	$\nu_{ухпр}$	158
25	Температура холодного воздуха фактическая, °C	$t_{хв}$	6
26	Температура холодного воздуха номинальная, °C	$t_{хвном}$	30
27	Температура воздуха перед ВП фактическая, °C	$t_{вп}$	38,5
28	Температура воздуха перед ВП номинальная, °C	$t_{впном}$	40
29	Температура воздуха за ВЗП	$t_{гв}$	366
30	Температура аэросмеси (средняя), °C	$t_{асм}$	66
31	Расчётный расход угля, т/ч	B_p	28,80
32	Расход природного газа, тыс. м ³ /ч	$G_{газ}$	0

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РАСЧЁТ ШЛАКУЮЩИХ СВОЙСТВ БАЗОВОГО УГЛЯ

№	Наименование	Обозн.	Размерн.	Формула	Значение
1	2	3	4	5	6
1	Влажность на рабочую массу	W^p	%	Анализ состава угля	18,71
2	Зольность на рабочую массу	A^p	%	Анализ состава угля	10,99
3	Содержание серы на рабочую массу	S^p	%	Анализ состава угля	0,19
4	Содержание углерода на рабочую массу	C^p	%	Анализ состава угля	54,4
5	Содержание водорода на рабочую массу	H^p	%	Анализ состава угля	3,52
6	Содержание азота на рабочую массу	N^p	%	Анализ состава угля	1,48
7	Содержание кислорода на рабочую массу	O^p	%	Анализ состава угля	10,71
8	Низшая теплота сгорания	Q_n^p	ккал/кг	Анализ состава угля	4810
9	Зольность на сухую массу	A^c	%	Анализ состава угля	13,52
10	SiO ₂	-	%	Анализ минеральной части	58,94
11	Al ₂ O ₃	-	%	Анализ минеральной части	19,71
12	TiO ₂	-	%	Анализ минеральной части	1,02
13	Fe ₂ O ₃	-	%	Анализ минеральной части	5,57
14	CaO	-	%	Анализ минеральной части	4,90
15	MgO	-	%	Анализ минеральной части	2,10
16	K ₂ O	-	%	Анализ минеральной части	1,82
17	Na ₂ O	-	%	Анализ минеральной части	0,80
18	P ₂ O ₅	-	%	Анализ минеральной части	0,60
19	SO ₃	-	%	Анализ минеральной части	4,54

1	2	3	4	5	6
20	Сумма кислых оксидов	ΣK	%	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	79,67
21	Сумма основных оксидов	ΣO	%	$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	9,62
22	Отношение суммы кислых к сумме основных	$\frac{\Sigma K}{\Sigma O}$	-	$\frac{\Sigma K}{\Sigma O}$	8,28
23	Адиабатная температура	θ_a	°C	Расчёт топки	1685
24	Температура на выходе из топки	θ_T	°C	Расчёт топки	1150
25	Температура начала шлакования	$t_{\text{шл}}$	°C	При $\frac{\Sigma K}{\Sigma O} > 1,8$; $945 + 8,22 \cdot \frac{\Sigma K}{\Sigma O}$	1013
26	Показатель химического состава топлива	P_{cc}	-	$1 - 0,025 \cdot \frac{\Sigma K}{\Sigma O}$	0,793
27	Показатель склонности к натриевым отложениям	P_{Na}	-	$0,567 \cdot (\text{Na}_2\text{O})^{0,423} - 0,333$	0,183
28	Показатель склонности к железистым отложениям	P_{Fe}	-	$1 - (0,92A^T/100S^T) \cdot (1/(2,2 - 0,0008 \cdot \theta_a))$	0,375
29	Обобщенный критерий шлакования	R_F^{UR}	-	$0,577 \cdot \sqrt{P_{Fe}^2 + P_{cc}^2 + P_{Na}^2}$	0,517
30	Допустимая температура газов на выходе из топки по условиям шлакования	$\theta_{\text{Доп}}$	°C	$1317 - 326,5 \cdot R_F^{UR}$	1148

**ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА КОТЛА БКЗ-210-140
ПРИ РАБОТЕ КОТЛА СО СТАРЫМИ ГОРЕЛКАМИ**

Результаты моделирования топочного процесса при работе котла БКЗ-210-140 со старыми (неповоротными) горелками представлены на рис. ПЗ.1-ПЗ.4.

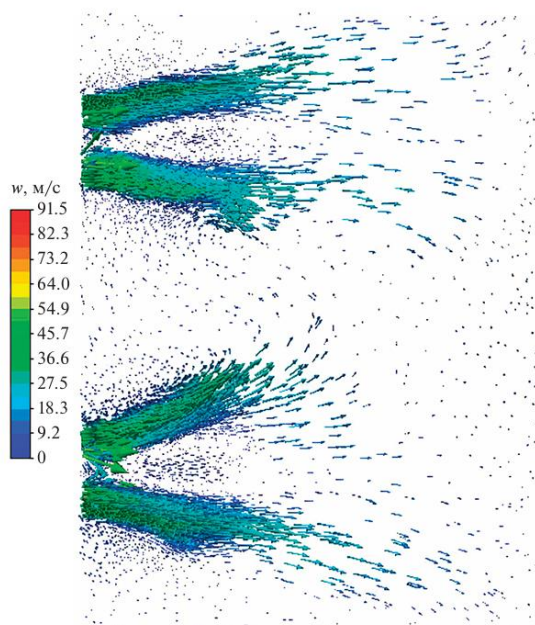


Рисунок ПЗ.1 – Векторное поле скоростей на уровне верхнего яруса горелок

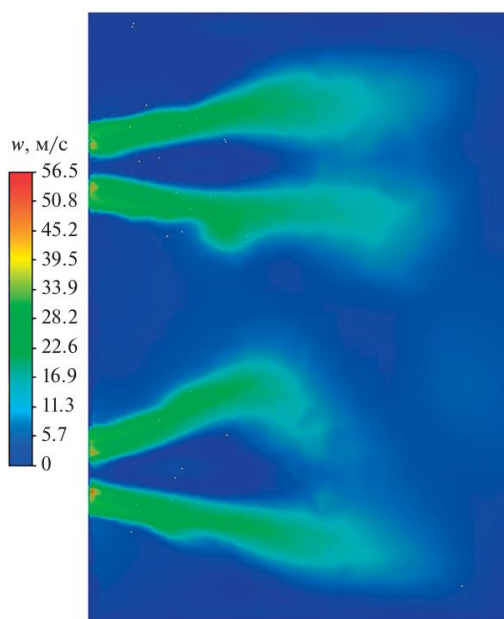


Рисунок ПЗ.2 – Поле скоростей на уровне верхнего яруса горелок

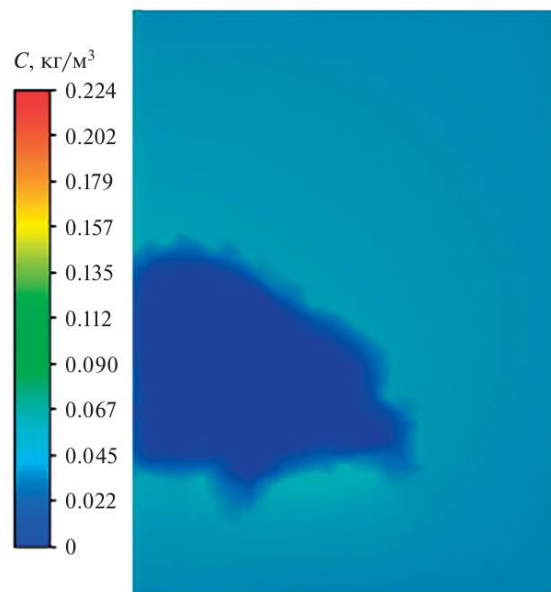


Рисунок ПЗ.3 – Поле концентрации CO перед ширмовым пароперегревателем

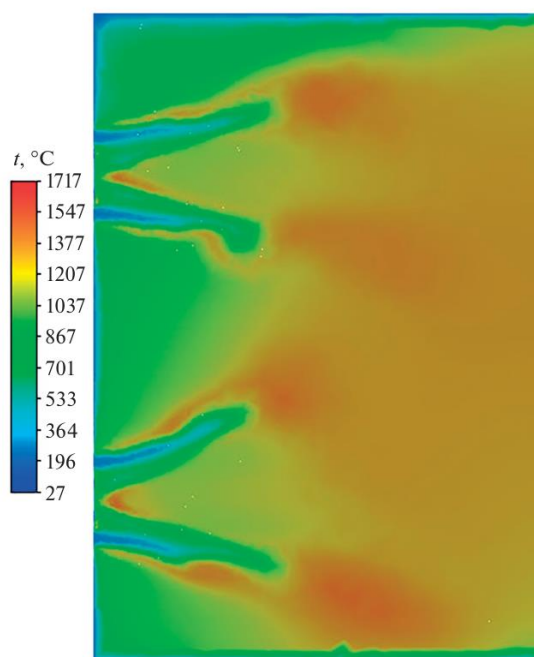


Рисунок ПЗ.4 – Поле температур на уровне верхнего яруса горелок

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА МАСЛОСТАНЦИИ И ГИДРОЦИЛИНДРОВ

Для поворота горелки в вертикальной плоскости используется станция гидравлическая SH.E.160-2-15.H.X.380.1,5.0.0, оснащённая двумя гидравлическими цилиндрами HC.V.10.050x035x0400.4.2.0DM.0T.0HZ.

Гидравлическая станция (рис. П4.1) предназначена для подачи рабочей жидкости (масла) под давлением через систему каналов от насосной установки в гидросистему исполнительного механизма – гидроцилиндра (рис. П4.2).

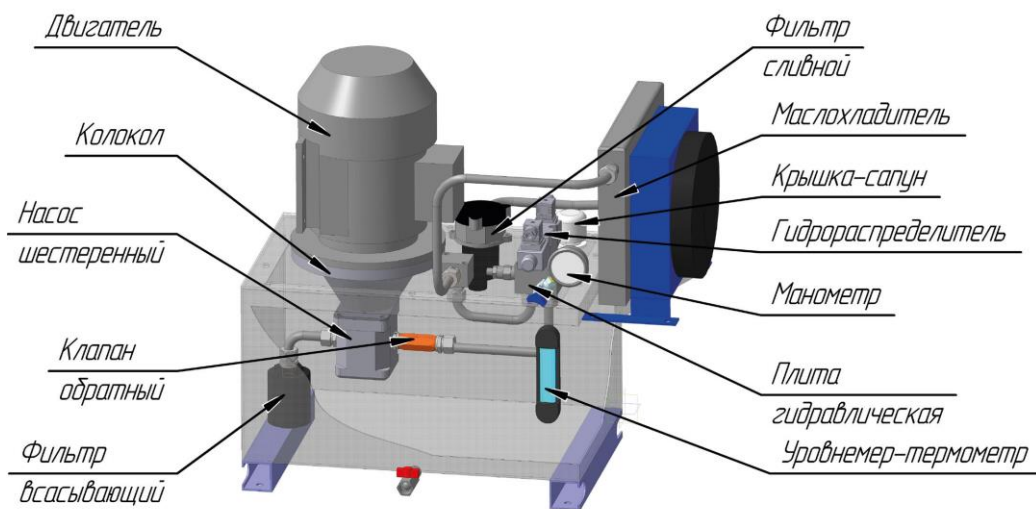


Рисунок П4.1 – Гидравлическая станция с обозначением её основных элементов

Основные параметры ГС: рабочее давление 160 бар, объём бака 15 л, напряжение питания 380 В, суммарная потребляемая мощность 1,5кВт. Основные параметры ГЦ: максимальное рабочее давление 100 бар, диаметр поршня 50 мм, диаметр штока 35 мм, ход штока 400 мм. Для надёжной фиксации гидроцилиндров в требуемом положении при повороте горелки в системе устанавливается гидрозамок.

Бак гидростанции служит резервуаром для рабочей жидкости, на крышке бака размещаются рабочие органы и арматура. Контроль уровня рабочей жидкости осуществляется при помощи указателя уровня на боковой стене бака. Управление потоком масла в гидросистеме осуществляется ручным гидрораспределителем (после опытной эксплуатации системы и её

автоматизации планируется реализовать управление ГС со щита). Регулировка давления в системе осуществляется предохранительным клапаном гидрораспределителя. Визуальный контроль давления осуществляется при помощи манометра.

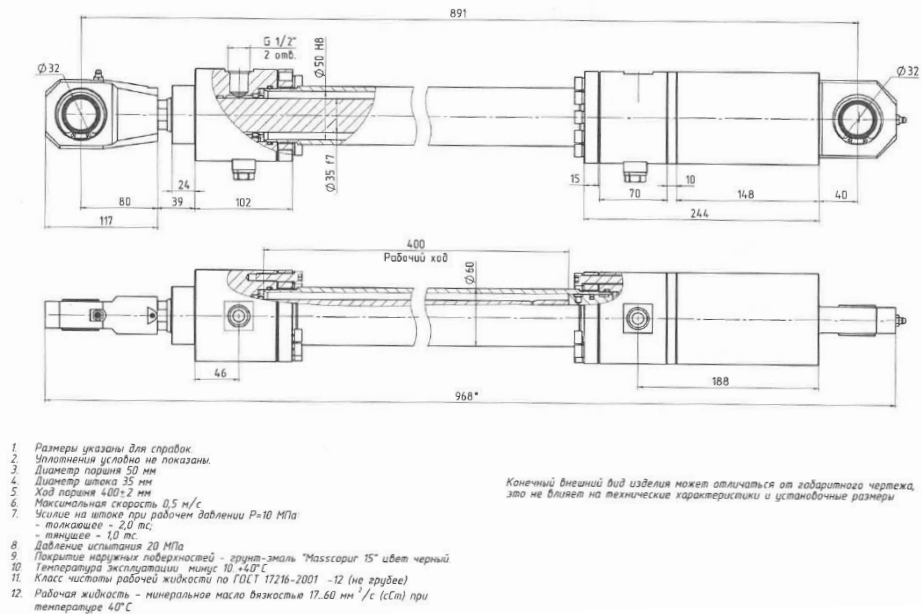
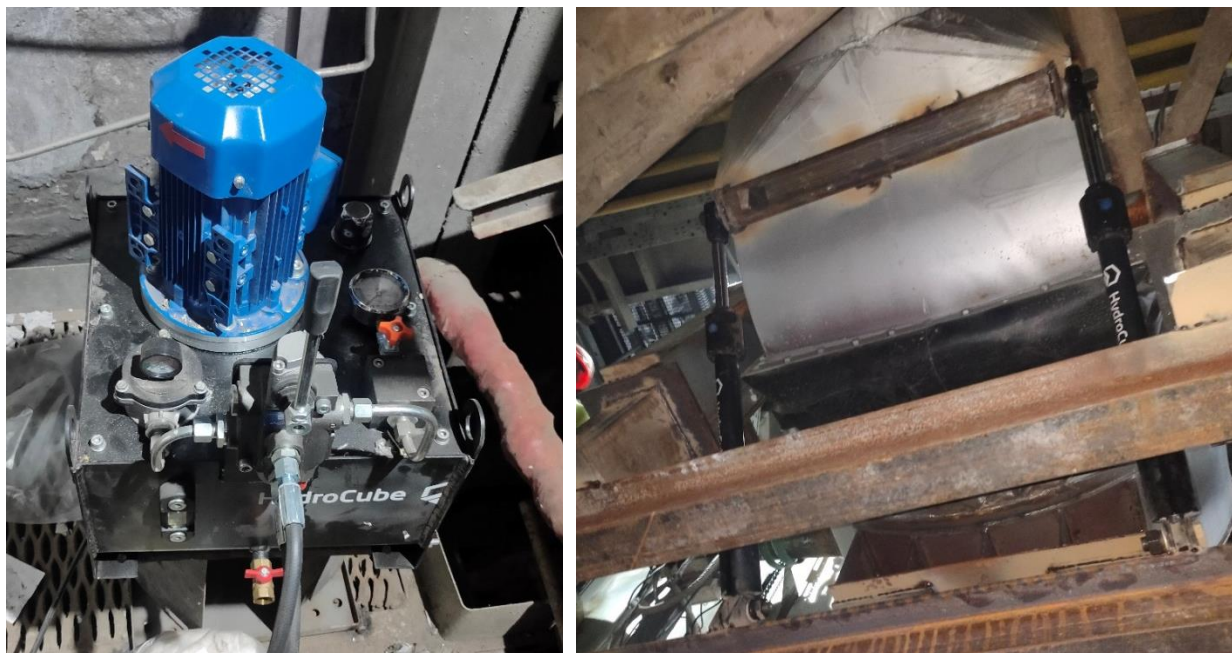


Рисунок П4.2 – Чертёж гидроцилиндра

Первичное выдвигание штока ГЦ в нейтральное состояние производится вручную. Нейтральное состояние штока соответствует увеличению его длины на 180 ± 10 мм (данное расстояние выдвижения штока должно соответствовать горизонтальному положению горелки).

Перед началом эксплуатации настраивается рабочее давление в гидросистеме (не более 100 бар). Давление настраивается при нейтральном положении ручки гидрораспределителя с помощью регулирующей гайки. Двигатель ГС при этом находится в работе.

Маслостанция размещается на площадке обслуживания котла и соединяется с гидроцилиндрами (рис. П4.3) системой труб, по которым масло подаётся на напор (движение горелки вверх) и слив (движение горелки вниз).



*Рисунок П4.3 – Элементы гидросистемы после монтажа
(слева – маслостанция; справа – гидроцилиндры, установленные по исходной схеме)*

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ И МОНТАЖУ ВИХРЕВОЙ ПОВОРОТНОЙ ГОРЕЛКИ

В 2023-2024 гг. пилотный промышленный образец горелки был изготовлен в ВТИ, а затем поставлен на Томскую ГРЭС и смонтирован на котле БКЗ-210-140 ст. № 10 (рис. П5.1-П5.2).



Рисунок П5.1 – Поставка пилотного образца поворотной горелки на Томскую ГРЭС-2



Рисунок П5.2 – Поворотная горелка, установленная на котле БКЗ-210-140

На использование горелки были получены необходимые разрешительные документы: декларация о соответствии требованиям ТР ТС 010/2011 О безопасности машин и оборудования. ЕАЭС № RUД-RU.PA03.B.25965/23 от 18.04.2023г.

Целесообразно обратить внимание на ряд факторов, которые обязательно должны учитываться в процессе проектирования, изготовления и монтажа поворотных горелок:

При изготовлении горелок нужно уделить особое внимание ориентации лопаток аксиальных завихрителей в каналах вторичного воздуха и аэросмеси, а также ориентации рассекателей потока пыли. В зависимости от компоновки горелок направление крутки горелочных устройств будет отличаться. Для котла БКЗ-210-140 четыре горелки характеризуются правой круткой, две – левой круткой.

При замене горелок всегда следует стремиться размещать новые горелки в старых амбразурах. Однако при замене обычных горелок поворотными это не всегда возможно. На котле БКЗ-210-140 пришлось менять старую амбразуру на новую, большего размера. Также возникла необходимость изменения трассировки водоопускной трубы циркуляционного контура котла. Перед реализацией данных мероприятий были выполнены дополнительные расчёты надёжности циркуляции в условиях использования новой амбразуры и нового участка опускной трубы.

При внедрении поворотных горелок особенно важно правильно учитывать перемещение котла при тепловом расширении. Котёл БКЗ-210-140 в процессе разогрева расширяется вниз на 85 мм. Старые горелки при расширении двигаются вместе с котлом, новая поворотная горелка при этом не меняет своего положения. Этот нюанс необходимо учитывать при монтаже: горелка должна быть установлена таким образом, чтобы после перемещения котла ось горелки максимально соответствовала центру амбразуры (рис. П5.3).

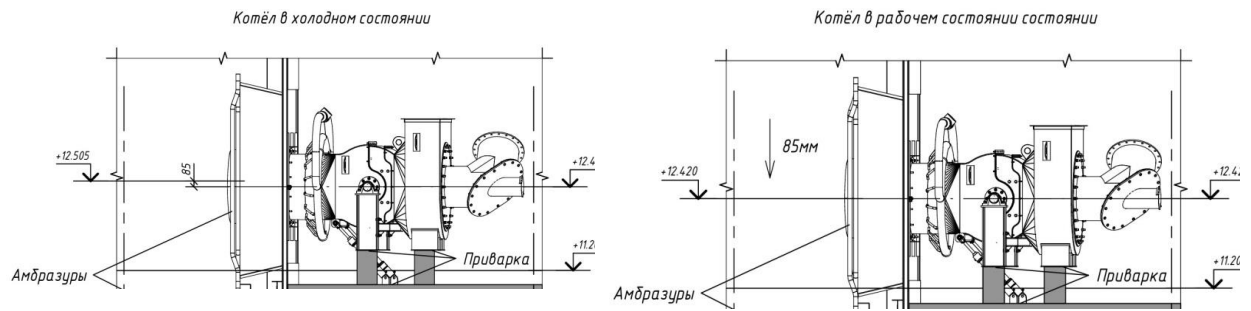


Рисунок П5.3 – Перемещение котла при тепловом расширении

Ввиду сложности конструкции и наличия дополнительных элементов габариты и масса поворотной горелки будут большими, чем у обычной горелки такой же мощности. В связи с этим необходимо планировать усиление металлоконструкций горелки, а также некоторое расширение существующей площадки обслуживания.

В процессе проработки конструкции не принято окончательного решения по оптимальному варианту тепловой изоляции подвижного щита горелки. Традиционные громоздкие уплотнения (маты, цемент и пр.) не годятся в условиях поворота. Были опробованы такие варианты, как использование высокотемпературной асботкани и установка перед щитом теплоизоляционной рамы из огнеупорного материала. Оба варианта не обеспечивают 100%-ную изоляцию щита. Насколько вообще целесообразна такая теплоизоляция – отдельный вопрос: поскольку щит работает в условиях высоких температур, было бы полезно его охлаждение со стороны цеха, а ТИ этому препятствует. Представляется, что лучше всего применять для ТИ щита лёгкую асботкань, параллельно изолировав трубопроводы около щита огнеупорным полотном МТПКВ Blanket.

Проведение ремонта поворотного горелочного устройства предполагает его полную разборку и извлечение подвижной части горелки из топки котла. Разборка должна производиться после останова котла с расхолаживанием. Перед началом работ подвижная часть горелки должна быть выведена в нулевое (горизонтальное) положение и установлена на опоры и конструкции,

обеспечивающие её устойчивость. Предварительно следует произвести отсоединение тканевого уплотнения между статичной и подвижной частью.

Для замены кольцевых уплотнений необходимо обеспечить доступ к проточкам, расположенным на коллекторах статичной части горелки в зоне сочленения их с подвижной частью. Общий порядок замены включает в себя следующие основные шаги:

Отключить и вытащить запальник и паромазутную форсунку и другие устройства из растопочного коллектора, отсоединить и демонтировать ремонтную проставку на пылепроводе.

Разобрать и последовательно извлечь из коллектора вторичного воздуха: сперва растопочный коллектор, затем коллектор аэросмеси.

Получив доступ к проточкам кольцевых уплотнений, убрать остатки старого огнеупорного шнура и высокотемпературного клея-герметика, обезжирить.

Произвести конопачение нового огнеупорного шнура в проточку на клей-герметик в соответствии с требованиями конструкторской документации и инструкцией изготовителя герметика, обработать видимую сторону шнура медно-графитовой смазкой.

Произвести сборку и подключение горелочного устройства в обратном порядке.

Для замены жаропрочных концевых насадок горелки необходимо обеспечить доступ к концам коллекторов подвижной части, расположенных в топке. Производить замену жаропрочных частей коллекторов можно одновременно с выполнением работ по замене кольцевых уплотнений. Общий порядок замены включает в себя следующие основные шаги:

Рассоединить друг от друга половины подвижного щита, через который горелочное устройство проходит в топку и передвинуть верхнюю половину в крайнее положение с помощью строповочного устройства, закрепить.

Произвести разборку статичной части горелки или удаление статичной части горелки в сборе, с помощью строповочных устройств.

Отсоединить газовый коллектор от гибкой сильфонной подводки, и при необходимости, вытащить, с помощью строповочных устройств, в сборе подвижную часть горелки.

Последовательно отсоединить и извлечь растопочный коллектор, коллектор аэросмеси. При необходимости замены жаропрочной части на кожухе или газораздающих трубках демонтировать их путём резки.

Срезать подлежащие замене жаропрочные части коллекторов по сварным швам и подготовить поверхности с разделыванием кромок под сварку.

Произвести приварку новых жаропрочных частей к коллекторам в соответствии с требованиями конструкторской документации.

Осуществить сборку и подключение горелочного устройства в обратном порядке.

Соединить подвижный щит с его герметизацией зазоров в соответствии с требованиями рабочей документации.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. ОЦЕНКА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ШЛАКОВАНИЯ НАСАДКИ ГОРЕЛКИ В ХОДЕ ИСПЫТАНИЙ

При сжигании угольной пыли на нагрузках, близких к номинальной, имело место шлакование поворотной насадки горелки № 3 и амбразур соседних горелок. При переходных режимах периодически возникают условия для саморасшлаковки. При работе на номинальной нагрузке при сжигании пыли отмечено, что после нароста определённого слоя отложений дальнейшего его увеличения не происходит. Однако закономерности процесса шлакования зависят от многих факторов и могут меняться в различных условиях.

Нужно подчеркнуть, что шлакование всегда являлось одной из главных проблем котла № 10. В условиях, когда заменена только одна горелка, а 5 остальных горелок остались старыми, данная проблема может усугубиться. Полноценная отладка безшлаковочного режима в условиях одной новой горелки крайне затруднительна. Тем не менее, необходимо принять все возможные меры для снижения интенсивности шлакования горелки и области около неё.

В ходе испытаний первые признаки шлакования наблюдались при работе котла на угле с подсветкой газом на нагрузке 190 т/ч. При нагрузке 210 т/ч (с подсветкой) интенсивность шлакования резко увеличилась (рис. П7.1).

На текущей стадии работы в качестве меры по борьбе с шлакованием следует рассмотреть реализацию пристенного дутья. Подача воздуха в зону, подверженную риску шлакования, может в значительной степени решить проблему. Однако организовать полноценное пристенное дутьё в текущих условиях затруднительно. Из упрощённых вариантов подвода воздуха под горелку (зона интенсивного шлакования) возможны следующие:

сделать несколько круглых отверстий в нижней части канала вторичного воздуха такими образом, чтобы часть воздуха поступала в область под горелкой. При реализации данного решения необходимо исключить риск

существенного снижения скорости вторичного воздуха вследствие перетекания части воздуха из горелки;

сделать ряд отверстий в нижней части щита. Таким образом, некоторое количество воздуха будет подсасываться в топку из цеха. Данное решение проще первого, но и менее эффективно: скорее всего, присос будет недостаточен для борьбы с отложениями шлака. Кроме того, сам по себе присос снижает КПД котла.

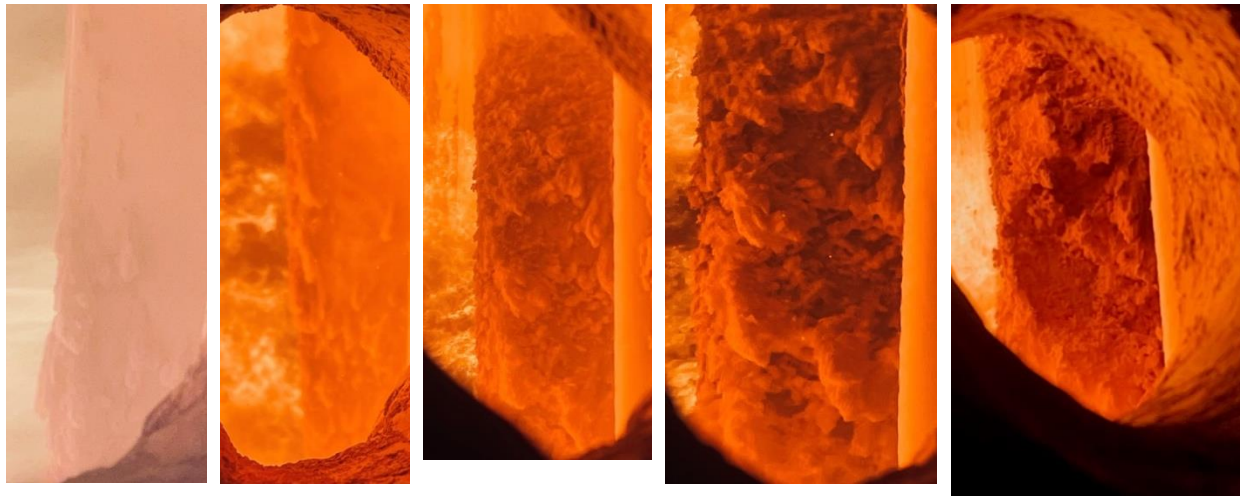


Рисунок П7.1 - Развитие шлакования в ходе опытов (фото из лючка сбоку от горелки).

Слева направо: 1 – нагрузка 190 т/ч, первые признаки;

2-4 – нагрузка 210 т/ч, опыты с разницей в несколько часов, быстрое нарастание;

*5 – фото после ночи работы котла на газе, виден эффект расшлаковки,
но полностью отложения не сходят*