

На правах рукописи



РЫЖИЙ ИВАН АЛЕКСЕЕВИЧ

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

Специальность: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы
(технические науки)

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Москва, 2026

Работа выполнена в Акционерном обществе «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт».

**Научный
руководитель:**

Тугов Андрей Николаевич
доктор технических наук,
заведующий отделением парогенераторов и
топочных устройств, Акционерное общество
«Всероссийский дважды ордена Трудового
Красного Знамени Теплотехнический научно-
исследовательский институт», г. Москва

**Официальные
оппоненты:**

Стрижак Павел Александрович
доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН,
заведующий лабораторией тепломассопереноса
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
г. Томск

Хохлов Дмитрий Александрович
кандидат технических наук, доцент,
ведущий инженер-конструктор
Акционерного общества
«Подольский машиностроительный завод»,
г. Подольск Московской области

Ведущая организация:

**Открытое акционерное общество
«Научно-производственное объединение
по исследованию и проектированию
энергетического оборудования
им. И.И. Ползунова», г. Санкт-Петербург**

Защита диссертации состоится 24 июня 2026 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 75.1.001.01 по адресу: 115280, г. Москва, ул. Ленинская Слобода, д. 23, стр. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на официальном сайте АО «ВТИ» по адресу: <https://vti.ru>

Автореферат разослан 20 марта 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук



Тарадай Д. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время уголь по-прежнему играет важнейшую роль в энергетике РФ. Твёрдое топливо сжигается в энергетических котлах ТЭС во многих регионах, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке. Существенного снижения 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. Таким образом, ближайшей задачей энергетики РФ является техническое перевооружение ТЭС с внедрением на них новых технологий, обеспечивающих современные технико-экономические и экологические показатели оборудования.

В настоящее время многие актуальные проблемы угольных ТЭС связаны с непостоянством характеристик поставляемых углей. К таким проблемам относятся:

- сильные колебания температур газов на выходе из топки;
- интенсивное шлакование поверхностей нагрева;
- снижение ресурса металла труб пароперегревателей при работе в условиях повышенных температур;
- трудности с поддержанием номинальных значений температуры перегретого пара;
- неоптимальная настройка топочного режима котла, рост потерь с недожогом, снижение КПД и др.

Масштабная реконструкция котла с изменением конфигурации поверхностей нагрева, схемы регулирования температуры перегретого пара, 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.

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. Богомоллов, А. Д. Горбаненко, А. В. Штегман, К. А. Плешанов, В. А. Верещетин и других. Однако в полной мере

закономерности регулирования положения факела по высоте с использованием поворотных вихревых горелок остаются неизученными.

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 степенью теоретической проработки вопроса влияния положения факела на показатели работы котла.

При разработке системы сжигания с регулированием положения факела по высоте топки необходимо проведение специальных расчётных исследований по оценке влияния изменения положения факела на значение температуры газов на выходе из топки. Однако существующие методики расчёта температуры газов основаны на ограниченном количестве эмпирических данных.

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.

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

Задачи 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.

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.

Научные 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.

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.

Достоверность научных положений.

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

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 164 страницы печатного текста, 17 таблиц, 86 рисунков. Список литературы содержит 136 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы исследования, обоснована научная новизна, практическая и теоретическая значимость исследования, приведены положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, представлена информация об апробации результатов работы, о личном вкладе автора, описана структура и объём работы.

В первой главе выполнен литературный обзор, включающий оценку текущего состояния угольной отрасли в России и в мире, существующего положения и перспектив угольной энергетики РФ, а также исследование разработанных в разное время конструкций поворотных горелок и современных требований к горелочному устройству промышленного котла.

Сделан вывод о том, что существенного снижения угольной генерации в энергетике РФ в ближайшие десятилетия не ожидается. Однако технико-экономические и экологические показатели большинства угольных ТЭС РФ не отвечают современному уровню развития науки и техники. Ввиду этого актуальной

задачей отечественной угольной энергетики является техническое перевооружение существующего оборудования.

Приводится описание систем сжигания с возможностью регулирования положения факела по высоте топки в зависимости от режимных показателей работы котла. Сделан вывод, что наиболее эффективно такое регулирование осуществляется с помощью поворотных горелок.

Отмечается, что все примеры реализации поворотных горелок относятся к прямоточным горелкам. Примеры внедрения (и даже теоретической проработки) вихревых поворотных горелок отсутствуют. Между тем, вихревые горелки более перспективны с точки зрения регулируемости топочного режима, снижения потерь с недожогом и выбросов NO_x .

На основании имеющегося опыта использования поворотных горелок, особенно на угольных котлах, отмечается приоритетность надёжности работы поворотного механизма, эффективности уплотнений узлов горелки, а также внедрения мероприятий по подавлению выбросов оксидов азота NO_x . Кроме того, важным аспектом современной системы сжигания является её максимальная автоматизация, поэтому отмечена целесообразность проработки принципов и алгоритма управления топочным режимом с использованием поворотных горелок.

Разработка системы сжигания с поворотными горелками требует проведения многовариантных расчётных исследований, включающих не только традиционный расчёт топки по НТР, но и выполнение численного моделирования топочного процесса.

По результатам выполненного литературного обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведены результаты расчётных исследований, показывающие, как влияет изменение положения факела по высоте топки на температуру газов на выходе из топочной камеры. На основании анализа результатов расчётов определён диапазон возможного регулирования температуры газов при повороте горелок и уточнена методика расчёта параметра M .

Одной из главных причин колебания температуры газов являются нестабильные характеристики углей, поставляемых на ТЭС. Были смоделированы условия колебания свойств топлива и рассчитаны варианты работы котла на трёх разных видах углей.

Обоснован выбор расчётных программ для проведения исследований. Для расчётов по НТР используется программа BoilerDesigner, показавшая высокую точность расчёта котлов и широко применяемая котельными заводами РФ.

Объектом исследования является котёл БКЗ-210-140 (Е-210-13,8КТ) Томской ГРЭС-2 – однобарабанный, вертикально-водотрубный с естественной циркуляцией, с твёрдым шлакоудалением. В качестве основного топлива на котле используется

Кузнецкий уголь марки Д, в качестве резервного – природный газ и мазут. 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.

Была проведена верификация расчётной модели котла в BoilerDesigner с опытными данными. Для этого на первом этапе работы были выполнены экспресс-испытания котла на 100% нагрузке при сжигании базового угля. Сопоставление показателей работы котла, зафиксированных в ходе испытаний, с параметрами, полученными по результатам расчёта, приведено в табл. 1.

Таблица 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. 1 показывает высокую сходимость расчётных и опытных показателей, что подтверждает достоверность результатов расчёта и возможность применения программы BoilerDesigner для дальнейших исследований.

Основные свойства трёх исследуемых углей меняются в следующих диапазонах: $W^r=10-25\%$, $A^r=5-20\%$, $Q_{r_i}=3703-5889$ ккал/кг. Характеристики базового угля определены лабораторным анализом. Свойства «улучшенного» и «ухудшенного» углей приняты в результате анализа статистики максимальных колебаний характеристик топлива.

Результаты расчётов в BoilerDesigner 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 (1103°C для ухудшенного угля, 1150°C для базового, 1207°C для улучшенного) и на 81°C при 50%-ной нагрузке котла (910°C для ухудшенного угля, 948°C для базового, 991°C для улучшенного).

Были определены значения температуры газов на выходе из топки при разных углах поворота горелки для трёх исследуемых углей: базового ($W^r=18,71\%$,

$A^r=10,99\%$, $Q_i^r=4810$ ккал/кг), улучшенного ($W^r=10,0\%$, $A^r=5,0\%$, $Q_i^r=5889$ ккал/кг) и ухудшенного ($W^r=25,0\%$, $A^r=20,0\%$, $Q_i^r=3703$ ккал/кг). Результаты расчётов сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Изменение температуры газов на выходе из топки при повороте горелок

Угол поворота горелок, °	Параметр М	Температура газов на выходе из топки, °С (расчёт в BoilerDesigner)		
		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 $\pm 10^\circ$ 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 топки, в среднем диапазоне $\sim 90^\circ\text{C}$, а поворот на $\pm 20^\circ$ даёт регулирование в среднем диапазоне $\sim 120^\circ\text{C}$.

Несмотря на то, что поворот на $\pm 20^\circ$ обеспечивает больший диапазон регулирования температуры, с точки зрения достижения поставленной задачи поворот на $\pm 15^\circ$ почти полностью компенсирует эффект колебания характеристик угля. При определении оптимального значения диапазона угла поворота следует принимать во внимание влияние дополнительных факторов. Во-первых, это усложнение конструкции горелки при увеличении угла поворота. 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. 3, чем больше угол поворота горелок, тем выше температура уходящих газов (при повороте вверх), что приводит к снижению КПД котла.

Таблица 3 – Изменение режимных показателей работы котла при различных диапазонах угла поворота горелок

Угол поворота горелок	Параметр	Диапазон изменения показателя (расчёт в BoilerDesigner)		
		Базовый уголь	Улучшенный уголь	Ухудшенный уголь
-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, °C	159,9 – 164,2	156,9 – 161,4	163,0 – 167,2
	Диапазон изменения температуры уходящих газов, °C	4,3	4,5	4,2
-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, °C	159,4 – 165,2	156,5 – 162,4	162,5 – 168,3
	Диапазон изменения температуры уходящих газов, °C	5,8	5,9	5,8

С учётом перечисленных факторов можно сделать вывод о том, что диапазон угла поворота горелок $\pm 15^\circ$ является оптимальным.

Для численного моделирования топочного процесса применяется программный комплекс ANSYS Fluent, который оптимально подходит для расчётов пылеугольного котла. Приводится описание математических моделей для моделирования сжигания угольной пыли с использованием вихревых горелок.

В ANSYSFluent было выполнено моделирование топочного процесса как для базового варианта работы котла (угол положения горелок 0°), так и для их положений относительно горизонтальной оси $+15$ и -15° . На рис. 1 показаны поля температур в топке при сравнении горизонтального положения горелки и поворота на $+15^\circ$.

В табл. 4 приведены сравнительные результаты расчёта температуры газов на выходе из топки по НТР и по ANSYSFluent.

Моделирование топочного процесса 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, что заметно больше диапазона, полученного при расчёте в BoilerDesigner (~90°).

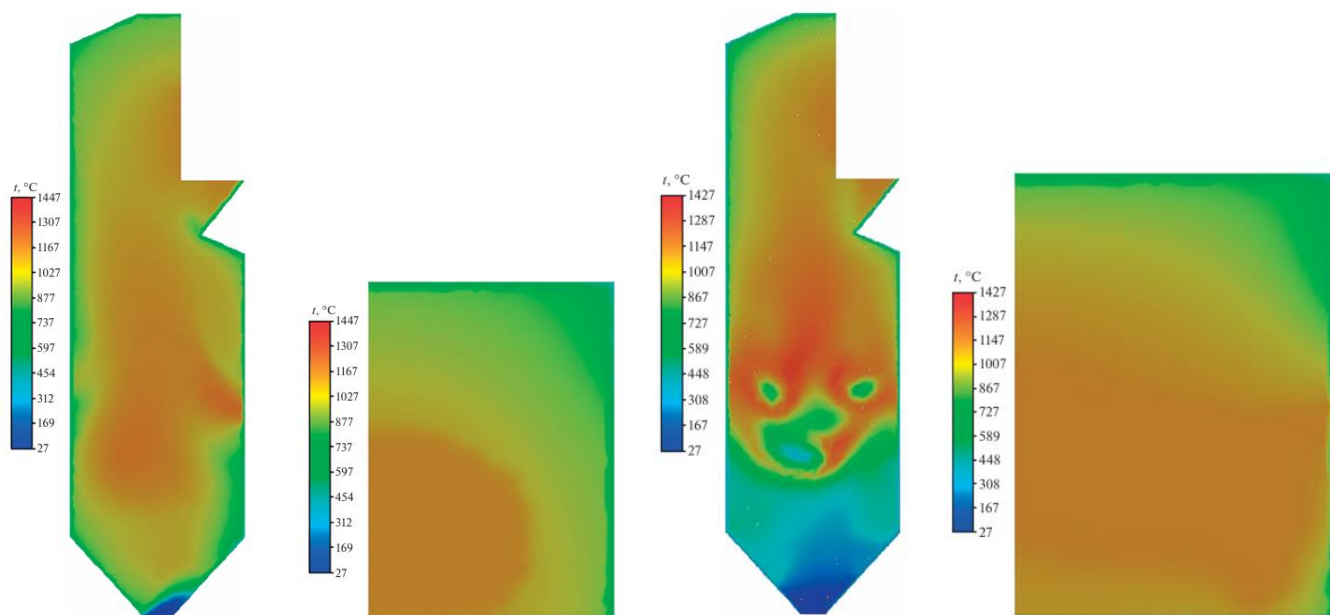


Рисунок 1 – Поле температур в поперечном сечении топки и в выходном окне топки: слева при угле поворота горелки 0°, справа при угле поворота +15°

Таблица 4 – Сравнение результатов расчёта по НТП и в ANSYSFluent

№	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 BoilerDesigner, 50°C в ANSYS Fluent. А вот изменения от средней величины при повороте вниз значительно отличаются: 41°C в BoilerDesigner, 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 ANSYSFluent для базового угля наблюдается обратная картина.

Таким образом поправка, вводимая для параметра М при повороте горелок вниз, должна быть больше, чем поправка при повороте вверх. При повороте вверх действует поправка к величине относительного уровня расположения горелок +0,1 на +20° поворота, а при повороте вниз – поправка –0,15 на –20° поворота. При меньших углах поворота величины поправок соответственно интерполируются.

В третьей главе описаны разработанные основные технические решения по конструкции вихревой поворотной горелки и их экспериментальное обоснование на спроектированной и изготовленной горелке для котла БКЗ-210-140.

Горелка (рис. 2-3) предусматривает возможность сжигания как угольной пыли, так и природного газ и мазута, имеет один канал аэросмеси и один канал вторичного воздуха. В обоих каналах установлены аксиальные закручивающие аппараты. В канале аэросмеси горелки равномерно по окружности принято решение установить делители потока, каждый из которых имеет остроконечный рассекатель. В результате поток аэросмеси закручивается по направлению к расположенным рассекателям и распределяется на отдельные струи ассиметричной формы (рис. 4). 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.

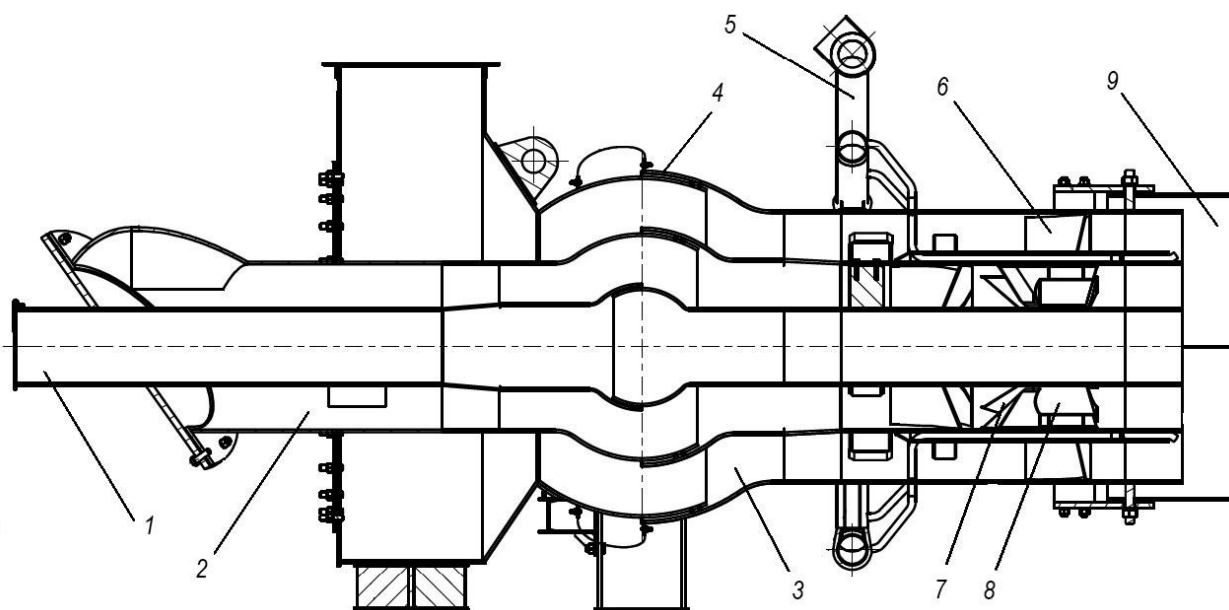


Рисунок 2 – Вид горелки сбоку в разрезе (1 – центральный канал (место размещения запального устройства и мазутной форсунки); 2, 3 – каналы подачи аэросмеси и вторичного воздуха; 4 – узел сопряжения статичной и поворотной частей горелки; 5 – газовый коллектор; 6, 7 – аксиальный лопаточный аппарат каналов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

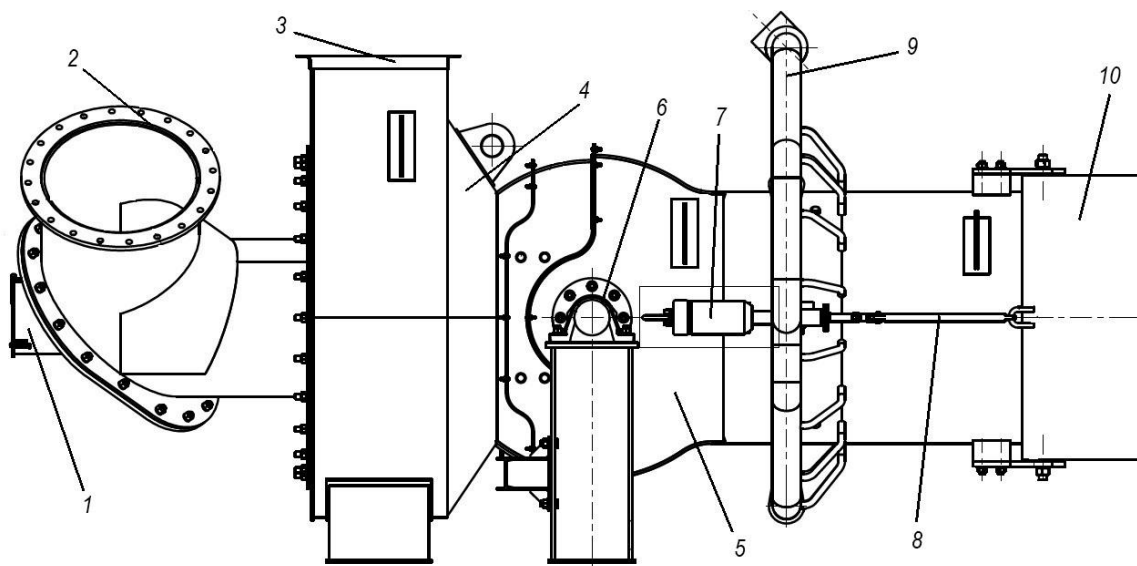


Рисунок 3 – Вид горелки сбоку (1, 2 – входные патрубки центрального канала и аэросмеси; 3 – входной короб вторичного воздуха; 4, 5 – статичная и поворотная части горелки; 6 – подшипник поворотного вала горелки; 7 – механизм электрический прямоходный (МЭП); 8 – тяга от МЭП к поворотной насадке; 9 – газовый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

Малоэмиссионные вихревые горелки с рассекателями потока пыли апробированы на Троицкой ГРЭС и Омской ТЭЦ-5. По результатам моделирования и опытным данным, полученным при использовании горелок с делителями потока, снижение выбросов NO_x составляет в среднем 35% от исходного уровня.

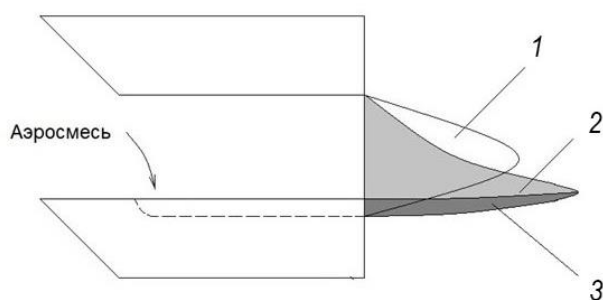


Рисунок 4 – Формирование зоны повышенной концентрации частиц твёрдого топлива (1 – первичный воздух; 2 – частицы твердого топлива; 3 – зона повышенной концентрации частиц твёрдого топлива)

Помимо вертикального поворота на $\pm 15^\circ$, для дополнительной возможности регулирования топочного режима предложено реализовать горизонтальный поворот на $\pm 5^\circ$ с использованием поворотной насадки. Горизонтальный поворот горелки

осуществляется с помощью механизма электрического прямоходного (МЭП), управляющего поворотной насадкой посредством тяги.

Вертикальный поворот вихревой горелки решено осуществлять с помощью гидроцилиндров, расположенных по боковым сторонам устройства. Гидроцилиндры фиксируются задним креплением на элемент металлоконструкций, передним креплением – на опорный вал, приваренный под поворотной частью горелки (рис. 5).

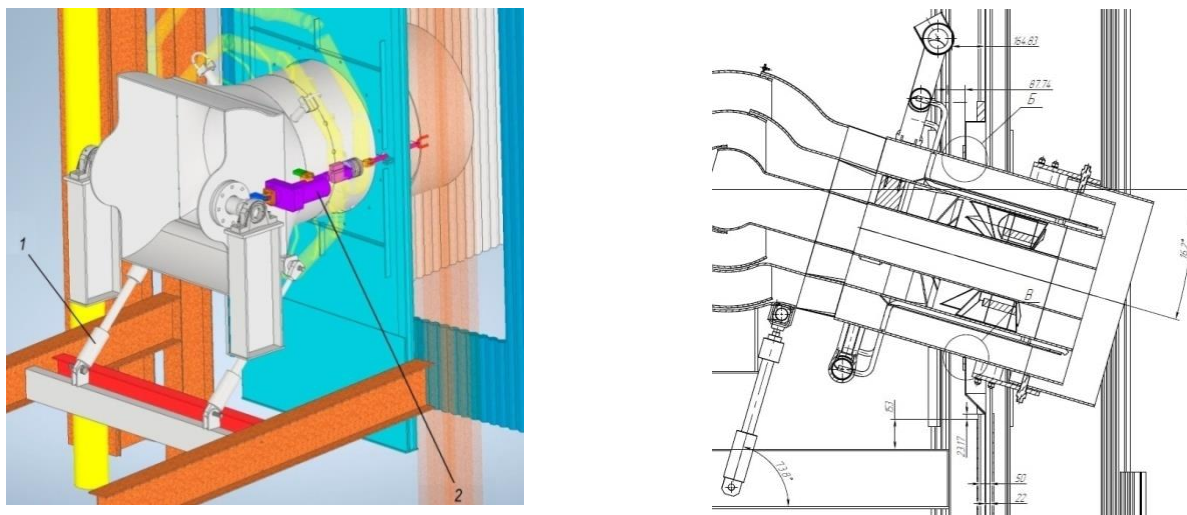


Рисунок 5 – Схема установки гидроцилиндров для реализации вертикального поворота: а) исходная конструкция; б) усовершенствованный вариант после первичного опробования (1 – гидроцилиндр; 2 – МЭП)

Оригинальным решением в конструкции горелки является соединение подвижной части устройства с топкой через уплотнительный короб и подвижный щит, состоящий из двух полущитов (рис. 6). Щит расположен в пазах, позволяющих ему перемещаться вверх и вниз в требуемом диапазоне. Для увеличения плавности хода щита при повороте горелки щит устанавливается на котле вместе с системой противовеса. Конструкция щита предусматривает компенсацию тепловых расширений по горизонтали и вертикали, приварку полозьев для снижения коэффициента трения при повороте и уплотнение места стыка горелки и щита с использованием высокотемпературного материала.

Для обеспечения плотности между каналами горелочного устройства на стыках статической и поворотной частей предложено кольцевое уплотнение (рис. 7). Для этого в канале методом наплавки делается паз, в который с помощью высокотемпературного клея-герметика способом конопачения крепится огнеупорный уплотнительный шнур из кремнеземной нити. 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, ширина которого выбирается с учётом запаса по натягиванию при вертикальном повороте.

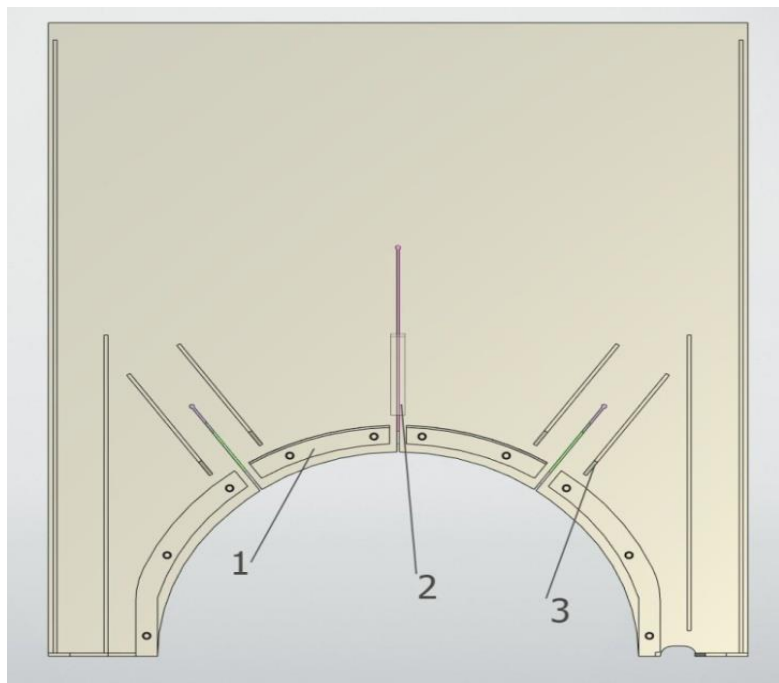


Рисунок 6 – Подвижный щит горелки (1 – сегмент прижимной пластины уплотнения; 2 – накладная пластина над прорезью; 3 – прорези для компенсации тепловых расширений)

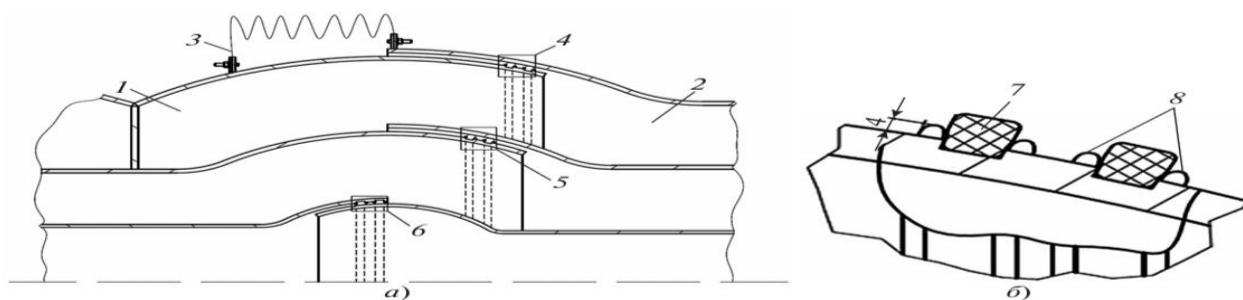


Рисунок 7 – Общий вид уплотнения каналов горелки (а) и устройство кольцевого уплотнения (б) (1, 2 – статичная и поворотная части горелки; 3 – тканевое уплотнение наружного канала; 4, 5, 6 – уплотнение сопряжения каналов вторичного воздуха, аэросмеси и центрального; 7 – уплотнительный кремнеземный шнур;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

Экспериментальное обоснование разработанных технических решений было выполнено на котле БКЗ-210-140. В период первичного опробования горелки было испытано две конструкции рассекателей (рис. 8).



Рисунок 8 – Разное исполнение рассекателей на пилотном образце поворотной горелки (слева – исходный вариант с объёмными рассекателями, справа – новый вариант с рассекателями из половины трубы)

Установлено, что 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 с точки зрения простоты изготовления и ремонтпригодности была признана конструкция рассекателей, выполняемых из типовой жаропрочной трубы.

По результатам испытаний и моделирования нескольких вариантов установки гидроцилиндров, включая вариант под углом 90° , выявлено, что оптимальным решением является их установка под углом 74° (рис. 5б). При меньших углах усилие используется нерационально, при больших – возникает неоптимальный вектор воздействия на гидроцилиндры, сопряжённый с риском повреждения оборудования.

В процессе эксплуатации горелки установлено, что при работе котла на высоких нагрузках (особенно при сжигании угля) температура металла подвижного щита в области над горелкой при отсутствии дополнительной защиты может достигать $500-600^\circ\text{C}$. Для защиты металла щита от излучения из топkipеред ним был установлен защитный экран. Для каждого полушита экран формируется из пяти секций, вырезанных из листа стали 20Х23Н18 толщиной 2 мм.

В четвёртой главе приведено описание экспериментальных исследований и результатов опытов по оценке влияния угла поворота горелки на работу котла.

По результатам испытаний установлено, что горелка обеспечивает стабильное сжигание как природного газа, так и угольной пыли во всём диапазоне её проектной тепловой нагрузки.

Основная серия опытов была направлена на оценку влияния угла поворота горелки на топочный режим (температуру дымовых газов на выходе из топки), которое определяли по изменению температуры перегретого пара (рис. 9).

В ходе опытов ввиду переменного графика нагрузки котла не было возможности отключить автоматическое регулирование расхода конденсата на впрыск. По факту происходило как изменение расхода впрыска 1, так и изменение температуры перегретого пара.

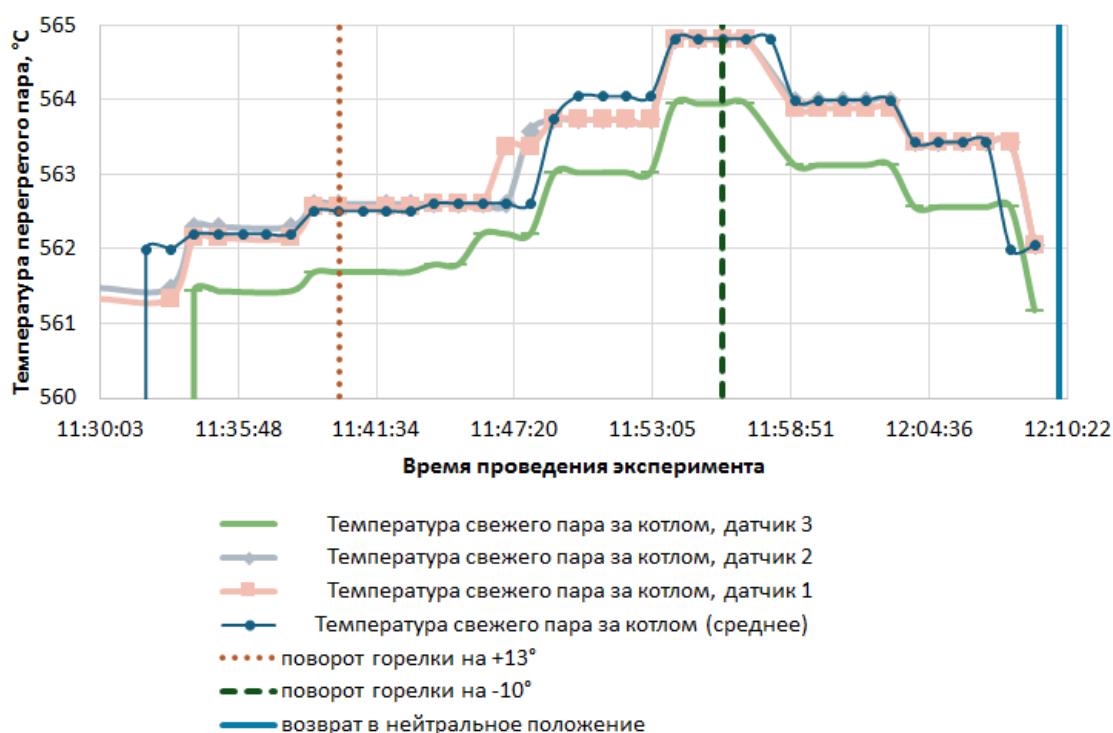


Рисунок 9 – Изменение температуры перегретого пара при повороте горелки

Расход впрыска 2 составлял существенно меньшую величину (1,55 т/ч и 0,5 т/ч по сторонам), эти значения почти не менялись в ходе опыта. В целом расход впрыска 1 во время опыта вырос на 2% от своей первоначальной величины. Но даже в этих условиях наблюдалась устойчивая зависимость температуры перегретого пара от угла поворота горелки (табл. 5). Поворот горелок влияет не только на температуру перегретого пара ($t_{пе}$), но и на паропроизводительность котла ($D_{пе}$). Поворот вниз приводит к росту тепловосприятости экранов топки, снижению температуры газов на выходе из топки и увеличению $D_{пе}$. При повороте вверх, соответственно, тепловосприятость экранов снижается, температура газов на выходе из топки возрастает, $D_{пе}$ падает.

Таблица 5 – Зависимость $t_{пе}$ от угла поворота одной горелки

Угол поворота горелки, °	Изменение $t_{пе}$, °C
+15	+3
+5	+1
+1	+0,2
-1	-0,2
-5	-1
-15	-3

На рис. 10 показано изменение $D_{пе}$ котла в опыте с поворотом горелки.

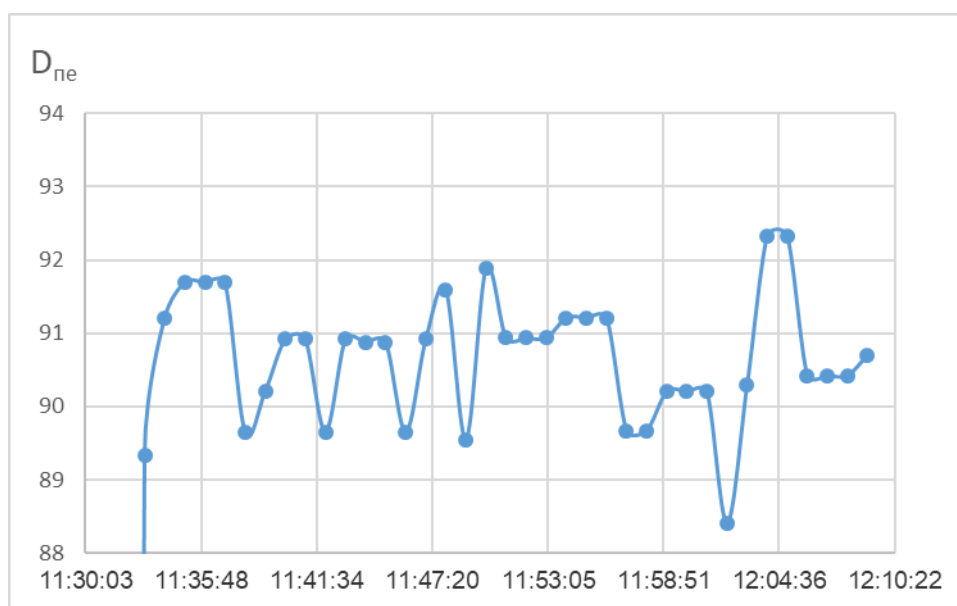


Рисунок 10 – Изменение расхода пара за котлом в опыте с поворотом горелки
(в 11-39 завершён поворот вверх, в 11-56 завершён поворот вниз)

Видно, что после поворота горелки вверх постоянно возникает тенденция снижения $D_{пе}$, однако система регулирования реагирует и нивелирует данный эффект, меняя расход топлива. Эффект изменения расхода топлива при повороте горелок подтверждается и расчётными исследованиями (см. табл.3). В целом, в опыте диапазон колебаний $D_{пе}$ невелик вследствие малого влияния одной горелки из 6-ти. После поворота вниз наблюдается довольно заметный скачок $D_{пе}$ 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 $D_{пе}$.

параметров I категории; если же они находятся в допустимых диапазонах, система реагирует на изменение параметров II категории. К параметрам I категории важности относятся температуры металла горелок и пылепроводов. К параметрам II категории важности относятся температура на выходе из топки и температура перегретого пара.

Автоматическая корректировка режима горения при изменении тех или иных входных параметров осуществляется в соответствии с математической моделью на основе полиномов. Эти полиномы получаются экспериментальным путём по результатам испытаний котла при разных режимах работы.

После шага контроля температур металла горелок и пылепроводов система проверяет, происходит ли изменение температуры газов на выходе из топки или наблюдается ли превышение допустимых установок температуры перегретого пара. 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.

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.).

Система сжигания с поворотными горелками (рис. 11) позволяет осуществлять дополнительную корректировку топочного режима при существенном (2–4-я степени) отклонении температуры перегретого пара от номинального значения.

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 $x^{\circ}\text{C}$, 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° .

В нынешнем виде система регулирования положения факела на котле БКЗ-210-140 работает в соответствии с полученными опытными данными зависимости

температуры перегретого пара от величины угла поворота горелки. Если $t_{пе}$ меняется в пределах 1 градуса (в любую сторону), система не даёт никаких рекомендаций. Если $t_{пе}$ меняется на ≥ 1 градус, система выдаёт надпись на мониторе около горелки: «Высокое (низкое) значение $t_{пе}$, рекомендуется повернуть горелку вниз (вверх) на X° ». Где X определяется согласно данным табл. 5. Если $t_{пе}$ изменилась больше, чем на 3 градуса, около горелки горит рекомендация максимального поворота в соответствующую сторону.

Дальнейшее развитие представленного алгоритма управления топочным режимом будет определяться результатами исследования дополнительных аспектов влияния регулирования положения факела на особенности работы котла. К таким исследованиям относится оценка возможности повышения эффективности работы установки в переходных режимах (при переходе с угля на газ и наоборот), возможность снижения минимально-допустимой нагрузки пылегазового котла и др.

ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ

1. Проведены углублённые исследования влияния регулирования положения факела по высоте на топочный режим пылеугольного котла. Расчётные исследования в программе BoilerDesigner 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 ANSYSFluent 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 M).

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, $\pm 3^\circ\text{C}$. После

замены всех шести штатных горелок на поворотные диапазон регулирования $t_{\text{пе}}$ может расширяться до $\pm 20^{\circ}\text{C}$.

4. 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. 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из «Белого списка» научных изданий и Перечня ВАК РФ

1. Рыжий, И. А. Опыт применения малоэмиссионных горелок для снижения вредных выбросов оксидов азота на энергетическом котле угольной ТЭЦ / И.А. Рыжий, А.В. Штегман, Д.В. Сосин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2025. – № 6. – С. 92-104 («Белый список», ВАК РФ);

2. Рыжий, И. А. Описание конструкции и моделирование работы вихревой поворотной горелки при сжигании угля и природного газа / И.А. Рыжий, А.В. Штегман, Д.В. Сосин [и др.] // Теплоэнергетика. – № 8. – 2024. – С. 82-94 («Белый список», ВАК РФ);

3. Рыжий, И. А. Исследование влияния положения факела в топке на режим работы пылеугольного котла / И.А. Рыжий, А.В. Штегман, Д.В. Сосин [и др.] // Теплоэнергетика. – № 4. – 2024. – С. 52-61 («Белый список», ВАК РФ);

4. Рыжий, И. А. Опыт ВТИ по использованию в энергетике проблемных топлив / И.А. Рыжий, А.Н. Тугов, Г.А. Рябов [и др.] // Теплоэнергетика. – № 7. – 2016. – С. 3-11 (ВАК РФ);

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

6. Рыжий, И. А. Успешная реконструкция котла П-57 блока 500 МВт Троицкой ГРЭС / И.А. Рыжий, Д.В. Сосин, А.В. Штегман [и др.] // Энергетик. – 2014. – № 4. – С. 34-38 (ВАК РФ);

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

8. 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 (ВАК РФ).

Публикации в других изданиях

9. Experience Gained from Applying Low Emission Burners in a Coal Fired CHPP Power Generating Boiler for Reducing Nitrogen Oxide Emissions. A. V. Shtegman, I. A. Ryzhii, D. V. Sosin, A. V. Sokolova, I. I. Trushkov. Thermal Engineering. June 2025. Vol. 72, pp. 514-525 (Web of Science, Scopus);

10. Description of the Tilttable Vortex Burner Design and Modeling Its Operation during Coal and Natural Gas Combustion. I. A. Ryzhii, A. V. Shtegman, D. V. Sosin, A. S. Natal'in. Thermal Engineering. August 2024. Vol. 71, pp. 700-711 (Web of Science, Scopus);

11. Studying the Effect of Fireball Position in the Furnace on the Coal Fired Boiler's Operation Mode. . A. Ryzhii, A. V. Shtegman, D. V. Sosin, A. S. Natal'in. Thermal Engineering. May 2024. Vol. 71, pp. 330-339 (Web of Science, Scopus);

12. All-Russia Thermal Engineering Institute experience in using difficult to burn fuels in the power industry. A. N. Tugov, G. A. Ryabov, A. V. Shtegman, I. A. Ryzhii, D. S. Litun. Thermal Engineering. June 2016. Vol. 63, pp. 455-462 (Web of Science, Scopus);

13. Advanced furnace system for coal-fired boilers in Siberia and the maritime region. I. A. Ryzhii, V. R. Kotler. Power Technology and Engineering. August 2012. Vol. 46, pp. 235-238.

14. Рыжий, И. А. Экспериментальные исследования работы вихревой поворотной горелки на котле БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2. Рыжий И. А. // В сб. докл. IVсеросс. научно-техн. конф. «Актуальные вопросы эксплуатации котлов ТЭС: проблемы и пути их решения», 15 мая 2025 г. – М.: ОАО «ВТИ», 2025. – С. 125-134;

15. Рыжий, И. А. Моделирование топочного процесса котла БКЗ-210-140 при сжигании угля с использованием поворотных вихревых горелок. Рыжий И. А. // В тезисах докл. Всеросс. форуме «Енисейская ТеплоФизика», Красноярск, 14-18 апреля 2025 г. – Изд-во СФУ, 2025. – С. 311-312;

16. Рыжий И. А. Техперевооружение котлов угольных ТЭС: использование вихревых поворотных горелок для повышения их технико-экономических и экологических показателей. Рыжий И. А.// В сб. докл. Междун. научно-техн. конф. «Техническое перевооружение ТЭС – масштабы и приоритеты. Совершенствование основного и вспомогательного оборудования, технологических схем и систем», 29 октября 2024 г. –М.: АО «ВТИ», 2024. – С. 77-85;

17. Рыжий, И. А. Разработка конструкции и моделирование работы вихревой поворотной горелки для котла БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2. Рыжий И. А., Штегман А. В., Сосин Д. В., Натальин А. С.// Материалы IV Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики». Издательство МЭИ, 2024. – С. 412-413;

18. Рыжий, И. А. Система сжигания угля с использованием поворотных горелок. Рыжий И. А., Штегман А. В., Сосин Д. В.// Тезисы докладов XII Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». Институт Теплофизики СО РАН, 2024. – С. 88.

Патенты на полезную модель

19. Рыжий, И. А. Патент РФ на полезную модель RU 207 337 U1. Малотоксичная вихревая пылеугольная горелка с остроконечными рассекателями и завихрителем потока аэросмеси / А. В. Штегман, И. А. Рыжий, Е. А. Фоменко, Д. В. Сосин. Опубл. 25.10.2021;

20. Рыжий, И. А. Патент РФ на полезную модель RU 207 329 U1. Пылеугольная горелка с поворотной выходной частью /А. В. Штегман, И. А. Рыжий, Е. А. Фоменко, Д. В. Сосин. Опубл. 25.10.2021;

21. Рыжий, И. А. Патент РФ на полезную модель RU 219 202 U1. Пылеугольная горелка с поворотной выходной частью и огнеупорным уплотнением трубопроводов // А. В. Штегман, И. А. Рыжий, Д. В. Сосин, А. В. Базулина, А. С. Натальин. Опубл. 04.07.2023.

Подписано в печать 12.03.2026. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ 23
Акционерное общество
«Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени
Теплотехнический научно-исследовательский институт»
Российская Федерация, 115280, г. Москва, ул. Ленинская Слобода, д. 23, стр. 4