

На правах рукописи

КОЗЛОВ
Сергей Георгиевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ
КАНСКО-АЧИНСКОГО БАСЕЙНА В ТОПКАХ С ТВЕРДЫМ
ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ**

05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2009

Работа выполнена в Политехническом институте
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
и в Сибирском теплотехническом научно-исследовательском институте
ВТИ Красноярского филиала ОАО «Сибирский ЭНТЦ»

Научный руководитель: доктор технических наук
Скуратов Александр Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Заворин Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор
Прошкин Александр Владимирович

Ведущая организация: Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН
(г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится «17» июня, 2009 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. акад. Киренского, 26, ауд. Ж-115.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Автореферат кандидатской диссертацией размещен на официальном сайте ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (<http://www.sfu-kras.ru>).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направить по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ПИ СФУ, Ученому секретарю диссертационного совета ДМ 212.099.07.

Факс (391) 243-06-92 (для кафедры ТЭС)
e-mail: boiko@krgtu.ru

Автореферат разослан «___» мая 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Е.А. Бойко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Особое место в энергетике Сибири и России в целом занимают угли Канско-Ачинского бассейна (КАБ). Одним из наиболее крупных месторождений КАБ является Березовское (20 млрд. т), на базе которого сооружается Березовская ГРЭС-1 мощностью 6,4 млн. кВт. Два энергоблока мощностью по 800 МВт каждый введены в эксплуатацию.

Энергетическая стратегия России на период до 2020 года отводит Канско-Ачинскому бассейну статус федерального значения в обеспечении энергетической безопасности и социально-экономического развития страны и ее регионов. Роль КАБ определяется огромными запасами, удобным географическим расположением, благоприятным горно-геологическими условиями залегания и строения угольных пластов, кондиционными свойствами угля, высокими экологическими показателями, относительно низкой стоимостью.

Сжигание канско-ачинских углей (КАУ) в топках котельных агрегатов сопровождается интенсивным шлакованием и загрязнением поверхностей нагрева, что обусловлено особенностями его минеральной части. В результате снижается паропроизводительность, длительность непрерывной кампании, надежность и экономичность котельных агрегатов.

Необходимость обеспечения надежной работы топочных экранов по условиям шлакования потребовало создания более совершенных топочных устройств. В связи с этим особую актуальность приобрели вопросы влияния организации топочного процесса и конструктивных особенностей топочно-горелочных устройств на шлакование экранов топок.

Актуальность темы диссертационной работы подтверждается тем, что основные ее результаты получены при проведении исследований в соответствии с координационным планом программы ГКНТ СССР по проблеме "Исследование и освоение сжигания КАУ на электростанциях КАТЭЖа", государственной научно-технической программой «Экологически чистая энергетика» по основному направлению «Экологически чистая тепловая электростанция».

Объектом исследования являются топочные камеры с твердым шлакоудалением (ТШУ) пылеугольных котлов.

Предмет исследования – процесс шлакования топочных экранов при сжигании КАУ.

Цель работы – повышение бесшлаковочной мощности и длительности непрерывной кампании котельных агрегатов с твердым шлакоудалением, сжигающих КАУ, на основе результатов экспериментального и расчетного исследования топочных процессов.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

1. Разработать методику экспериментального исследования топочных процессов в пристенной области экранов топки.

2. Выполнить промышленные исследования влияния режимных и конструктивных параметров топочного устройства на характеристики пристенного газового слоя у топочных экранов (температурные, скоростные и концентрационные поля) и их шлакование.

3. Провести анализ влияния характеристик пристенного газового слоя на характер и интенсивность образования золошлаковых отложений на экранных трубах.

4. Разработать методику расчета процессов тепло- и массообмена в пристенном слое топочных экранов.

5. На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований разработать рекомендации и технические решения по рациональным режимам работы и конструкциям топочно-горелочных устройств котлов с твердым шлакоудалением для сжигания шлакующих КАУ.

Методы исследования. В работе применялись экспериментальные методы исследования топочного процесса на действующих котельных агрегатах. Расчетные исследования теплообмена в топках проводились с использованием зонального метода на трехмерных математических моделях.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием в опытах современных поверенных приборов. Исследования элементного состава углей, а также химический и минералогический анализы состава их минеральной части, проб летучей золы и отложений с поверхностей нагрева выполнялись лабораторией СибВТИ, аттестованной Госстандартом. Промышленные исследования проводились с учетом требований к теплотехническим испытаниям котельных установок с применением современных методов сбора и обработки информации. Соответствие разработанной зональной математической модели теплообмена в пристенном слое подтверждается удовлетворительным совпадением расчетного распределения температур у топочных экранов с результатами экспериментальных исследований.

Научная новизна

1. Предложена методика экспериментального исследования влияния параметров пристенного слоя на характер и интенсивность образования золошлаковых отложений на топочных экранах с учетом зависимости этих параметров от режимных и конструктивных характеристик топок котлоагрегатов.

2. Определена зависимость структуры пристенного газового слоя у топочных экранов от конструктивных и режимных параметров топок котлов с ТШУ, позволяющая оценить характер первичных отложений и интенсивность их образования при сжигании КАУ.

3. Впервые установлено предельное значение температуры газов в пристенном слое у топочных экранов при сжигании березовского угля в топках с ТШУ, выше которого образуются прочные железистые отложения.

4. Предложена методика и разработана зональная математическая модель расчета теплообмена в пристенном слое топочных экранов.

Практическая значимость и использование результатов работы

1. Разработана конструкция пылеотборного зонда с выносной водоподающей трубой, которая рекомендуется при исследованиях пристенных зон топочных камер.

2. Разработана номограмма настройки бесшлаковочного режима работы тангенциальной топки с ТШУ.

3. Предложены технические решения по организации топочного процесса при сжигании шлакующих бурых углей: топочное устройство с четырехвихревой аэродинамической схемой (патент 2032853), фонтанно-вихревая топка (А.С. 827887), система сопел воздушного дутья (А.С. 1562595), система защиты от шлакования двухсветных экранов (А.С. 1580113), способ автоматического регулирования температурного уровня в топке путем изменения расхода газов рециркуляции и воздуха (А.С. 1180647 и 1179031), способ регулирования соотношения топливо-воздух в горелках (А.С. 1483184).

4. Разработанные технические решения и рекомендации по организации топочного процесса котлов, позволяющие снизить интенсивность шлакования топки при сжигании КАУ, использованы на Красноярской ТЭЦ-1, Красноярской ТЭЦ-2, Минусинской ТЭЦ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований влияния конструкции и режимных параметров работы топочного устройства на структуру пристенного газового слоя.
2. Результаты экспериментальных исследований влияния характеристик пристенного газового слоя у топочных экранов на характер и интенсивность образования золошлаковых отложений на экранных трубах.
3. Зональная математическая модель и результаты расчетов теплообмена и сепарации твердой фазы в пристенном слое газов у топочных экранов.
4. Рекомендации по рациональным режимам работы и конструкциям топочно-горелочных устройств котлов с твердым шлакоудалением при сжигании КАУ.

Личный вклад автора состоит в разработке методики проведения экспериментальных исследований пристенного слоя; непосредственном выполнении экспериментальных исследований структуры пристенного слоя на действующих котлоагрегатах; обработке и анализе полученных результатов; в обосновании и формулировании основных положений и выводов, определяющих научную новизну и практическую значимость.

Разработка рекомендаций, технических решений по конструкциям и режимам работы топочных устройств, проведение режимно-наладочных испытаний котлоагрегатов, обработка и анализ результатов испытаний выполнялись при участии сотрудников СибВТИ. Вклад диссертанта в основные результаты по теме диссертации является определяющим.

Апробация работы

Основные результаты исследований и положения, включенные в диссертационную работу, докладывались на III и IV Всесоюзных научно-технических конференциях "Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов" (Таллин, 1980, 1986 г.г.); научно-практической конференции "Оборудование ГРЭС и передача электроэнергии КАТЭКа" (Красноярск, 1983 г.); V Всесоюзной конференции "Горение органического топлива" (Новосибирск, 1985 г.); IV краевом совещании "Проблемы сжигания канско-ачинских углей в котлах мощных энергоблоков" (Красноярск, 1985 г.); Всероссийской научно-технической конференции "Повышение эффективности и экологической безопасности сжигания углей на электростанциях Сибири" (Крас-

ноябрьск, 1995 г.); Всероссийской научно-практической конференции "Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях" (Красноярск, 2000 г.); IV Международной научно-технической конференции "Достижения и перспективы развития энергетики Сибири" (Красноярск, 2005 г.); I, IV научно-практических конференциях "Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов" (Челябинск, 1992, 2007 г.г.); Всероссийском семинаре кафедр ВУЗов по теплофизике и теплоэнергетике (Красноярск, 2009 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 34 печатные работы, из них 6 по списку ВАК, 8 изобретений.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов с выводами, заключения, списка использованных источников из 137 наименований и содержит 142 страницы, включая 36 рисунков и 37 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, определены научная новизна и практическая значимость работы.

В первом разделе представлен анализ современного состояния проблемы, изученности основных свойств минеральной части КАУ, влияния их на теплофизические процессы при сжигании в топках котлоагрегатов. Значительный вклад в развитие этого научного направления внесли представители отечественных школ: А.Н. Алехнович, С.Ю. Белов, В.В. Богомоллов, М.И. Вдовенко, И.С. Деринг, Э.П. Дик, В.А. Дубровский, А.С. Заворин, И.Я. Залкинд, В.Ю. Захаров, И.К. Лебедев, Ю.Л. Маршак, С.А. Михайленко, А.А. Отс, А.В. Померанцев, Ю.А. Рундыгин, Ф.А. Серант, М.С. Шарловская и др. Выполненные исследования выявили закономерности поведения минеральной части КАУ при сжигании в пылеугольных топках котлов, что позволило разработать перспективные технологии сжигания шлакующих углей.

Исследования характеристик КАУ, поведения их минеральной части при сжигании, а также опыт эксплуатации котлов показали высокую шлакующую способность канско-ачинских углей. Особенно этим отличается березовский уголь. Даже соблюдение требований по проектированию топочных устройств зачастую не обеспечивает надежную по условиям шлакования работу топочных экранов.

Результаты обзора имеющихся литературных источников показали на необходимость более детальных исследований топочного процесса при сжигании березовского угля. При этом анализ современных экспериментальных и расчетных методов исследования топочных процессов позволил обосновать выбор наиболее рационального подхода, связанного с изучением на действующих котлоагрегатах и их математических моделях структуры пристенного газового слоя у топочных экранов с учетом влияния конструктивных и режимных параметров топки, а также оценки влияния характеристик пристенного слоя на шлакование экранных труб.

В заключение раздела сформулированы основные задачи исследований, проводимых в диссертационной работе.

Во втором разделе приводятся методика и результаты экспериментального изучения структуры пристенного слоя газов у топочных экранов, шлакования топочных экранов котлов с ТШУ при сжигании КАУ.

Для проведения экспериментальных исследований предложена методика, заключающаяся в изучении влияния параметров пристенного слоя на характер и интенсивность образования золошлаковых отложений на топочных экранах с учетом зависимости этих параметров от режимных и конструктивных характеристик топок котлоагрегатов.

Учитывая особенности котлов с твердым шлакоудалением, сжигающих канско-ачинские угли, было предложено провести опыты на двух группах котлов, отличающихся, в основном, системами пылеприготовления и компоновкой горелочных устройств. Первая группа – котлы БКЗ-210-140Ф, БКЗ-500-140-1 и П-67, оборудованные пылесистемами прямого вдувания, с газовой сушкой топлива и размолем его в мельницах-вентиляторах. Горелки – прямоточные, скомпонованные по тангенциальной схеме в один, три и четыре яруса, соответственно. Котел БКЗ-210-140Ф оборудован горелками с чередующимися соплами аэросмеси и вторичного воздуха, а котлы БКЗ-500-140-1 и П-67 с периферийным и рассредоточенным вводом аэросмеси. Вторая группа – котлы ПК-10Ш и Б-50-14-250, оборудованные пылесистемами прямого вдувания с молотковыми мельницами, гравитационными сепараторами и воздушной сушкой топлива. Горелки расположены с фронта в один ярус. Горелки котла ПК-10Ш с горизонтальными рассекателями, котла Б-50-14-250 – эжекционные.

Березовский уголь при проведении опытов характеризовался следующими показателями: $W^r = 30,0 - 37,8 \%$, $A^d = 5,1 - 11,3 \%$, $Q_i^r = 13,82 - 16,36$ МДж/кг.

Внутритопочные исследования структуры пристенного слоя включали измерения температуры, скорости и состава газов, падающего лучистого потока, концентрации частиц, определение содержания в них горючих, скорости роста отложений на охлаждаемых зондах. Выполнялись химический и минералогический анализы проб золошлаковых отложений и летучей золы. Схемы топочных камер и расположение лючков, через которые проводились измерения, представлены на рис. 1. Для отсоса летучей золы из пристенной области был разработан зонд (рис. 2), отличающийся от известных конструкций наличием выносной водоподающей петли для поддержания температурного режима его работы.

Проведенные измерения показали наличие неизотермического газового слоя вблизи топочных экранов. При удалении от экрана температура газов возрастала на $50 - 150$ °С, стабилизируясь на расстоянии $0,3 - 0,5$ м от экрана. По мере приближения к экрану наблюдалось повышение концентрации летучей золы и содержания в ней горючих. Установлена существенная зависимость полей температуры (ϑ), падающих лучистых потоков ($q_{\text{л}}$) и газового состава от режимных параметров котлов.

Исследования котла ПК-10Ш показали, что при нагрузках свыше 75 % от номинальной более безопасным по условиям шлакования является режим, когда в работе находятся не две, а три мельницы (горелки). При включении третьей горелки уменьшаются расход и скорость первичного воздуха, утоняется пыль, что ведет к снижению дальности горелочных струй, улучшению воспламенения и выгорания топлива на начальном участке. Поэтому у боковых экранов возрастает температура газов и падающий лучистый поток, у тыльного экрана наблюдается обратная картина (рис. 3).

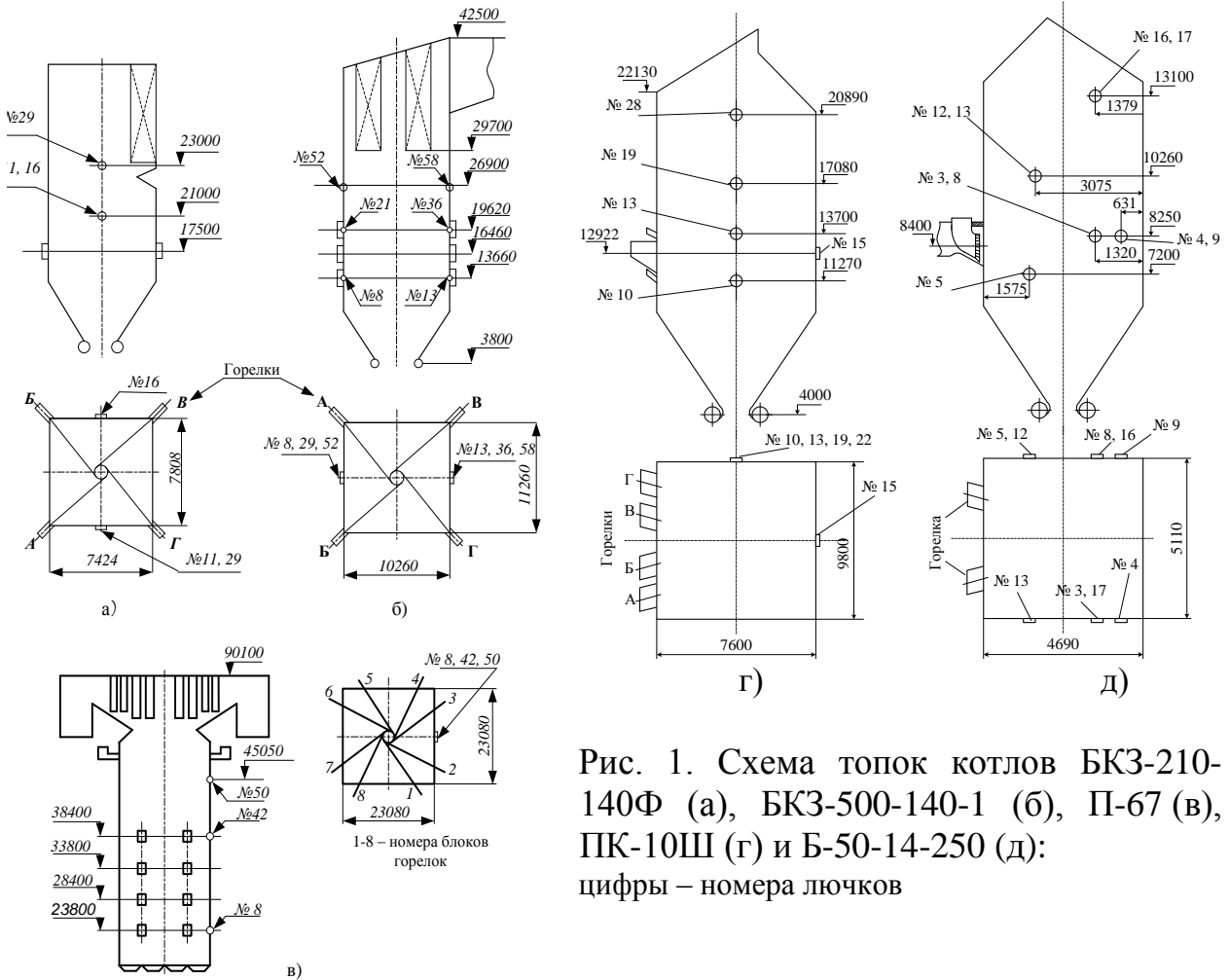


Рис. 1. Схема топков котлов БКЗ-210-140Ф (а), БКЗ-500-140-1 (б), П-67 (в), ПК-10Ш (г) и Б-50-14-250 (д): цифры – номера лючков

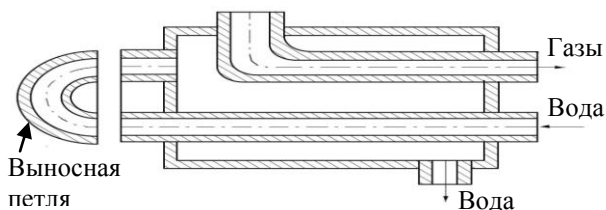


Рис. 2. Зонд водоохлаждаемый пылеотборный

Вблизи экранов наблюдалось угрубление летучей золы. На расстоянии 0,05 м от экрана $R_{50} = 33-50\%$, на расстоянии 0,75 м от экрана $R_{50} = 26-36\%$.

Опытным путем установлено, что прочные обогащенные железом отложения ($Fe_2O_3 = 50-63\%$), образуются на охлаждаемых зондах (тепломерах), имитирующих экраны топки, при температуре газов в пристенном слое $\vartheta'_{пс} >$

1100 °С. Здесь $\vartheta'_{\text{гс}}$ – температура газов на расстоянии 0,05 м от экранных труб. Наибольшей опасности шлакования подвержен тыльный топочный экран.

Теплонапряжение сечения топки в опытах составило 1,86 МВт/м², температура в ядре горения – 1250–1300 °С. Эти значения были близки рекомендуемым. Контроль за режимом работы горелок позволил практически исключить наброс факела на топочные экраны, обеспечить $\vartheta'_{\text{гс}} < 1100$ °С у экранных труб, что при регулярной водяной обдувке предопределило надежную работу топки котла ПК-10Ш по условиям шлакования при сжигании березовского угля.

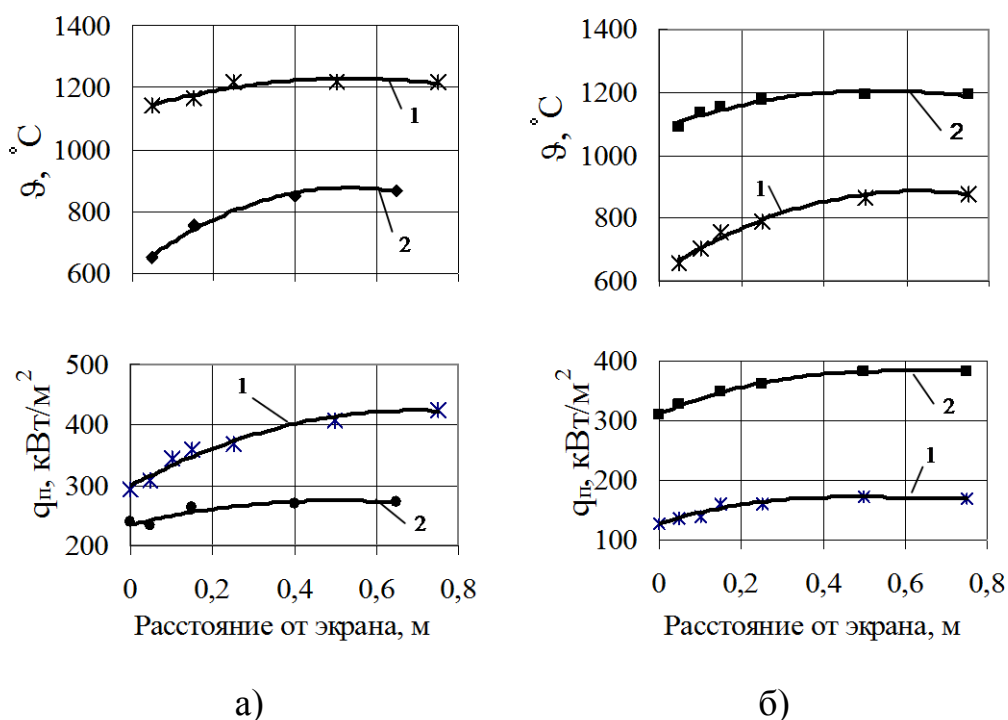


Рис. 3. Температура газов ($\vartheta'_{\text{гс}}$), плотность падающего теплового потока ($q_{\text{г}}$) в зоне лючков № 15 (а) и № 19 (б) топки котла ПК-10Ш: 1 – в работе мельницы А и Г; 2 – в работе мельницы А, В, Г

В опытах на котле Б-50-14-250 угольная пыль после гравитационных сепараторов пылесистем отличалась повышенной тонкостью ($R_{200} = 0,9\text{--}3,3$ %, $R_{90} = 9,2\text{--}28,1$ %). Это обеспечивало высокую степень выгорания топлива (90 %) уже на расстоянии двух калибров от горелки (2,2 м). В пристенной области топочных экранов содержание горючих в летучей золе во фракциях > 50 мкм не превышало 6 %, а во фракциях < 50 мкм – не более 2,4 %. В условиях отсутствия обдувки топочных экранов на них образовывались уплотненные пористые отложения (прочность на сжатие не выше $(10\text{--}20) \cdot 10^5$ Н/м²), на которых располагались рыхлые сыпучие самопроизвольно обрушивающиеся отложения. Характер полей температуры и концентрации кислорода приведены на рис. 4. При температуре в пристенном газовом слое $\vartheta'_{\text{гс}} = 1190\text{--}1217$ °С со стороны набегающего газового потока на тепломерах со скоростью роста 25–35 г/(м²·ч) образовывались темные уплотненные пористые отложения с повышенным содержанием оксидов железа ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 38,0\text{--}7,9$ %). Со стороны аэродинамической тени, а также в зонах с температурой $\vartheta'_{\text{гс}} < 1080$ °С со скоростью 2–11 г/(м²·ч) образо-

вывалились рыхлые, тонкодисперсные отложения светло-коричневого цвета с содержанием оксидов железа не более 20 %. Прочные плотные отложения на топочных экранах отсутствовали.

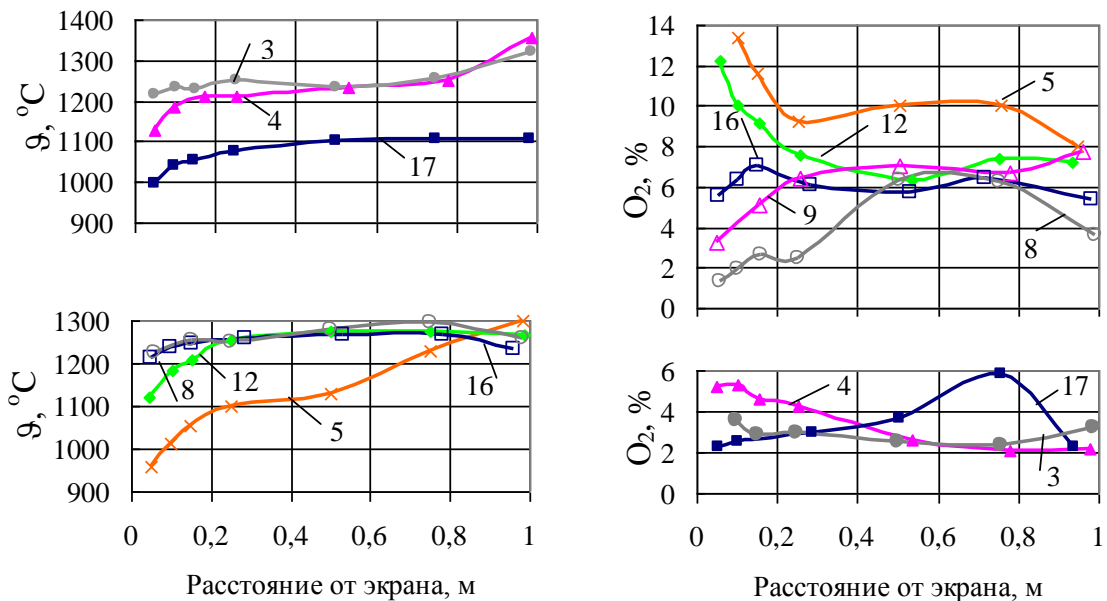


Рис. 4. Температура газов (θ) и содержание кислорода (O_2) в пристенной области топки котла Б-50-14-250:

3, 4, 17 – номера лючков правого экрана; 5, 8, 9, 12, 16 – номера лючков левого экрана

Особенностью тангенциальных топок котлов БКЗ-210-140Ф и БКЗ-500-140-1 является несимметричное заполнение факелом топочного пространства при работе трех горелочных блоков из четырех. Факел смещается в сторону отключенного по топливу горелочного блока, несмотря на подачу в него полного расхода вторичного воздуха, формируя пристенный газовый слой с разными характеристиками у каждой стены. Опытным путем установлено, что максимальная разница температуры газов у двух противоположных боковых стен топки котла БКЗ-210-140Ф из-за смещения факела достигала 150°C , у фронтальной и тыльной стен топки котла БКЗ-500-140-1 – 300°C . Установлено, что в зонах смещения факела наблюдается повышение уровня тангенциальной и снижение аксиальной скорости газов (рис. 5).

Для котла П-67 при отключении одного горелочного блока из восьми эта разница оказалась существенно ниже – 50°C , что свидетельствует о более устойчивой аэродинамике топки (рис. 6).

Химический анализ золы уноса и летучей золы из пристенной области котлов БКЗ-210-140Ф, БКЗ-500-140-1 и П-67 показал невысокое содержание в них оксидов железа (6,9–9,0 %). На тепломерах образовывались как прочные первичные отложения с высоким содержанием оксидов железа (до 80 %), так и сыпучие рыхлые, близкие по составу к летучей золе. Прочные отложения формировались со стороны набегания газового потока при температуре газов на расстоянии 0,05 м от экрана $\theta'_{\text{пс}} > 1050^\circ\text{C}$. Скорость роста таких отложений в опытах на котлах БКЗ-210-140Ф и БКЗ-500-140-1 составила 25...33 г/(м²·ч), на кот-

ле П-67 существенно ниже – 1,5–7,4 г/(м²·ч). При этом, по сравнению с котлами БКЗ-210-140Ф и БКЗ-500-140-1, концентрация летучей золы вблизи экранов и плотность сепарации на них частиц для котла П-67 оказались значительно ниже (в два и пять раз, соответственно).

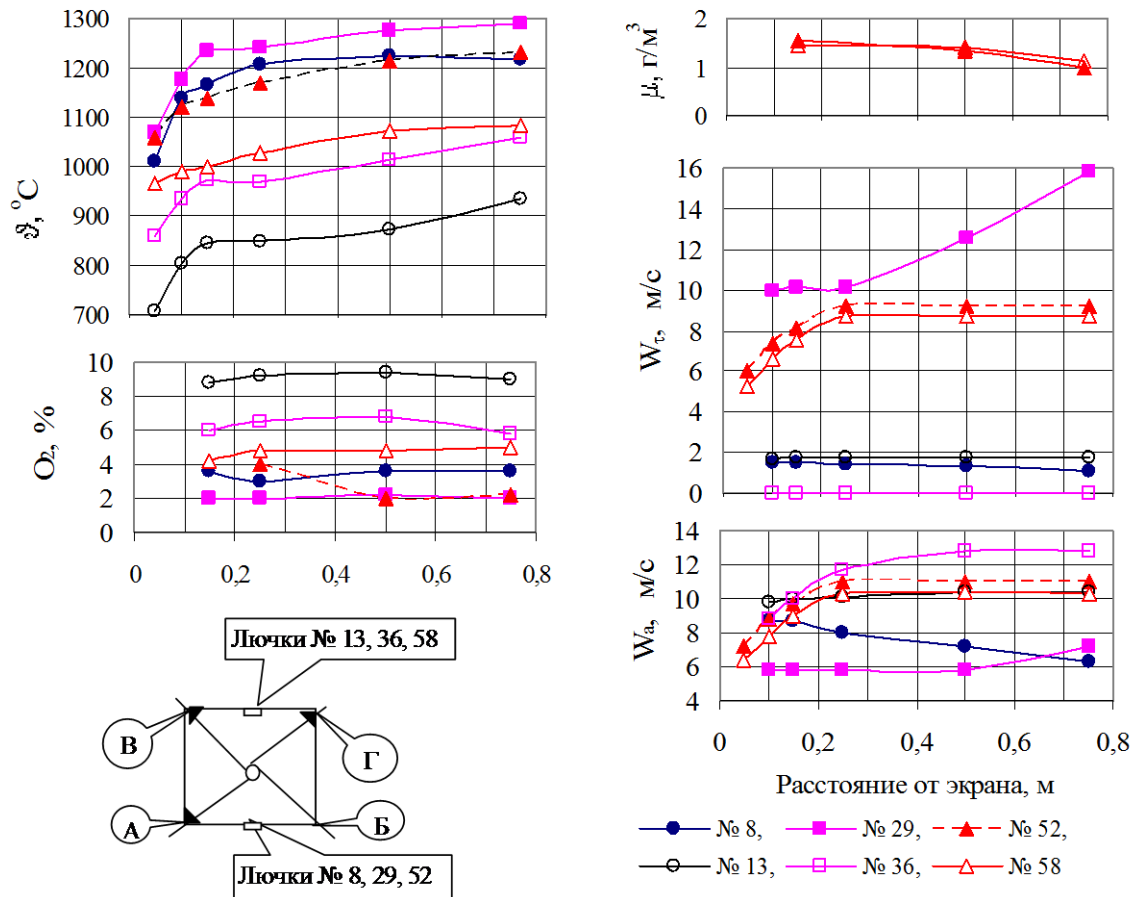
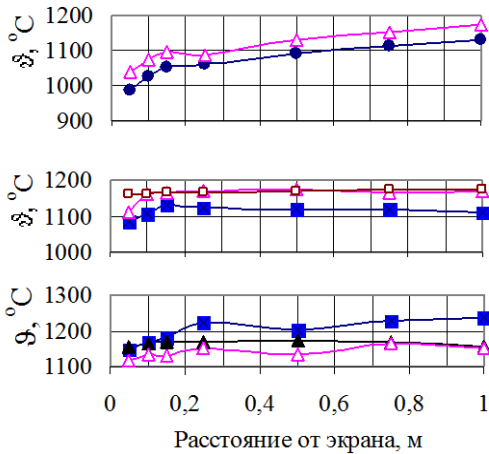


Рис. 5. Температура газов (ϑ), содержание кислорода (O_2), концентрация частиц (μ), тангенциальная и аксиальная составляющие скорости газов (W_t , W_a), в пристенной области топки котла БКЗ-500-140-1 при работающих горелках А, В, Г

В аэродинамической тени тепломеров, а также при $\vartheta'_{\text{пс}} < 1050$ °С образовывались мелкодисперсные сыпучие отложения.

Минералогический состав прочных отложений существенно отличался от состава летучей золы. В стеклофазе преобладали образования темного цвета с сильными магнитными свойствами. Характерным являлось повышенное содержание в отложениях ангидрита CaSO_4 и высокая степень сульфатизации (36–75 % – котел БКЗ-210-140Ф, 16–30 % – котлы БКЗ-500-140-1 и П-67), по сравнению с летучей золой (5–12 %). Ангидрит содержался не только в виде оболочек вокруг шариков стеклофазы, как в пробах летучей золы, но и в виде цементирующей массы. Установлено, что в упрочнении притрубного слоя отложений толщиной около 2 мм активную роль играет магнетит и гематит. По мере удаления от поверхности трубы цементирующая роль оксидов железа падает, определяющим становится ангидрит.



Обозначение	■	△	▲	●	□
Мощность, МВт	660	675	700	702	730
Работающие горелки					

Рис. 6. Температура газов (t_g) в пристенной области топки котла П-67 при разном сочетании работающих горелок

Степень сульфатизации отложений с топочных экранов выше, чем на тепломерах, и достигала 60–80 %. Учитывая короткий срок формирования отложений на тепломерах (0,5...20 часов) по сравнению с топочными экранами, можно утверждать, что значительная масса серы попадает на топочные экраны с частицами летучей золы, а не только из газовой фазы. Это служит подтверждением роли пирита в образовании прочных высокожелезистых отложений при сжигании березовского угля.

Результаты опытов выявили общие закономерности в условиях образования золошлаковых отложений на экранах топочных устройств различного конструктивного исполнения. Вид первичных отложений и скорость их образования зависят от параметров пристенного газового слоя у экранов, причем доминирующее влияние оказывает температура газов вблизи экранов. Установлено существование предельной температуры газов $t'_{гс}$ (на расстоянии около 50 мм от экрана), выше которой образуются прочные высокожелезистые отложения, а при более низкой – сыпучие, слабосвязанные с поверхностью экранных труб. Для березовского угля уровень этой температуры, по нашим оценкам, близок к 1050 °С. При этом определяющую роль в образовании железистых отложений при сжигании березовского угля играет пиритное железо.

Определена зависимость величины температуры газов в пристенном слое от аэродинамики топки. Смещение факела к одной из стен приводит к повышению у ее поверхности температуры газов и соответствующей интенсификации процесса шлакования.

В третьем разделе рассмотрены вопросы расчета теплообмена в топочных устройствах.

Применительно к тангенциальным топкам разработана трехмерная зональная модель теплообмена, позволяющая определить поля температуры газов и поверхности топочных экранов, падающих и результирующих лучистых потоков. Подтверждена адекватность модели опытными данными, полученным при испытании топки котлоагрегата БКЗ-210-140Ф – различие расчетных и опытных значений тепловосприятия топки не превысило 4 %, падающих лучистых потоков – 13 %.

Расчетами подтверждено, что эффективным средством снижения температуры газов в топке и, следовательно, уменьшения интенсивности шлакования является подача в ядро горения низкотемпературных газов рециркуляции ($r_{нг}$). Увеличение на 10 % $r_{нг}$ приводит к снижению величины падающего лучистого потока на 12-14 %, температур: газов в зоне активного горения на 45 °С, газов на выходе из топки на 30 °С, поверхности загрязнений экранов на 55 °С (рис. 7).

Разработана и апробирована двухэтапная методика расчета теплообмена в пристенном газовом слое топочных камер, позволяющая получить детальное распределение температуры и тепловых потоков в газовых слоях у поверхности экранов, а также влияние на указанные характеристики режимных и конструктивных параметров топочного устройства.

На первом этапе разрабатывается трехмерная многозональная модель топки. По высоте топочная камера разбивается на несколько расчетных ярусов, каждый из которых разбивается на ряд объемных и поверхностных макрозон. Найденные в результате расчета среднезональные температуры газа и лучистые тепловые потоки между зонами используются на втором этапе, где более подробно исследуется теплообмен в конкретном расчетном ярусе модели топки.

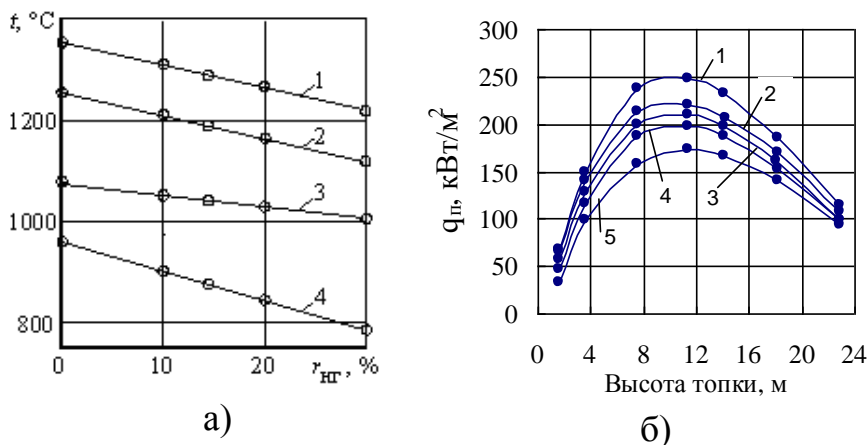


Рис. 7. Влияние доли низкотемпературных газов рециркуляции на температуры в топке и падающий лучистый поток:

а): 1, 2, 4 – максимальная температура центральной, периферийной и поверхностной зон; 3 – температура газов на выходе из

топки; б) 1 – $r_{нг} = 0$; 2 – $r_{нг} = 0,1$; 3 – $r_{нг} = 0,14$; 4 – $r_{нг} = 0,2$; 5 – $r_{нг} = 0,3$

Разработана трёхмерная зональная модель пристенной области яруса топки котла БКЗ-210-140Ф, ограниченного двумя горизонтальными сечениями. В результате расчетов получено детальное распределение температуры в непосредственной близости от топочных экранов. Расхождение между расчетными и опытными значениями температуры газов не превысило 5 % (рис.8).

Для расчетной оценки сепарации частиц, обусловленной криволинейностью газового потока в тангенциальной топке, использовалась модель инерционного движения частиц в трехмерном пространстве. Из сил, действующих на частицу, учитывались только две – аэродинамического сопротивления и тяжести. Расчетами показано, что инерционной сепарации подвержены относительно крупные частицы, диаметр которых для котлов БКЗ-210-140Ф, БКЗ-500-140-1 и П-67 не менее 320, 350 и 420 мкм, соответственно. Установлено, что минимальное число Стокса, при котором наблюдается сепарация частиц на топочные экраны, равно 0,2.

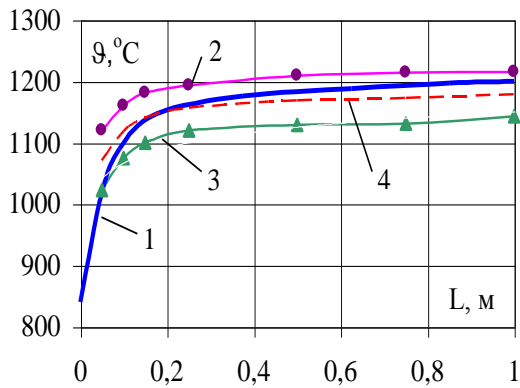


Рис.8. Температура газов по глубине V яруса топки котла БКЗ-210-140Ф: 1 – расчетные значения ($q_v = q_v^H$, $\alpha_T = 1,2$, доля отбора топочных газов $r_{гг} = 18$ %, степень рециркуляции низкотемпературных газов $r_{гг} = 14$ %); 2, 3 – по экспериментальным данным ($q_v = 0,91-0,96q_v^H$, $\alpha_T = 1,17-1,21$, $r_{гг} = 16$ %, $r_{гг} = 13-14$ %); 4 – усредненные значения экспериментальных данных (по кривым 2 и 3)

Расчеты показали, что по условиям сепарации частиц на топочные экраны, а значит и по условиям шлакования топки, котел П-67 обладает преимуществом по сравнению с котлами БКЗ-210-140Ф и БКЗ-500-140-1, что подтверждено опытными данными.

В четвертом разделе на основе проведенных экспериментальных и расчетных исследований предложены следующие рекомендации по организации топочного процесса, направленные на уменьшение интенсивности шлакования радиационных поверхностей нагрева котлоагрегатов при сжигании березовского и других шлакующих углей:

1. Обеспечение нормативных значений теплонапряжения и температуры в зоне активного горения, теплонапряжения сечения топки и на ярус горелок.
2. Обеспечение температуры газов ($\theta'_{гг}$) в пристенном слое топочных экранов не выше 1050 °С. $\theta'_{гг}$
3. Топки с тангенциальной компоновкой четырех горелочных блоков при нагрузках котла, близких к номинальной, должны эксплуатироваться при включении всех горелочных блоков во избежание смещения факела к одной из стен топки.
4. При фронтальной компоновке горелок должен исключаться наброс факела на тыльный экран за счет обеспечения их оптимальной дальнобойности.
5. Оснащение системой водяной очистки всей площади топочных экранов.
6. Оснащение топочных экранов системой диагностики шлакования, позволяющей по мере необходимости производить выборочное включение аппаратов водяной очистки.

По результатам расчетных исследований теплообмена в топке котла БКЗ-210-140Ф с использованием ее зональной модели и модели пристенного слоя предложена номограмма, позволяющая определить необходимую долю низкотемпературных газов рециркуляции, которые следует подавать в зону активного горения для обеспечения температуры газов в пристенном слое не более 1050 °С (рис. 9).

Для топок прямоугольного горизонтального сечения разработана четырехвихревая схема сжигания, на которую был получен патент. Отличительная особенность четырехвихревой топки – диагональное расположение прямооточных горелок на коротких (боковых) стенах топки в сочетании с соплами третичного дутья на фронтальной и задней стенах, что исключает непосредственное омывание топочных экранов высокотемпературными горелочными струями и тем са-

мым снижает интенсивность шлакования (рис. 10). Четырехвихревая топка внедрена на котле БКЗ-320 ст. № 18 Красноярской ТЭЦ-1.

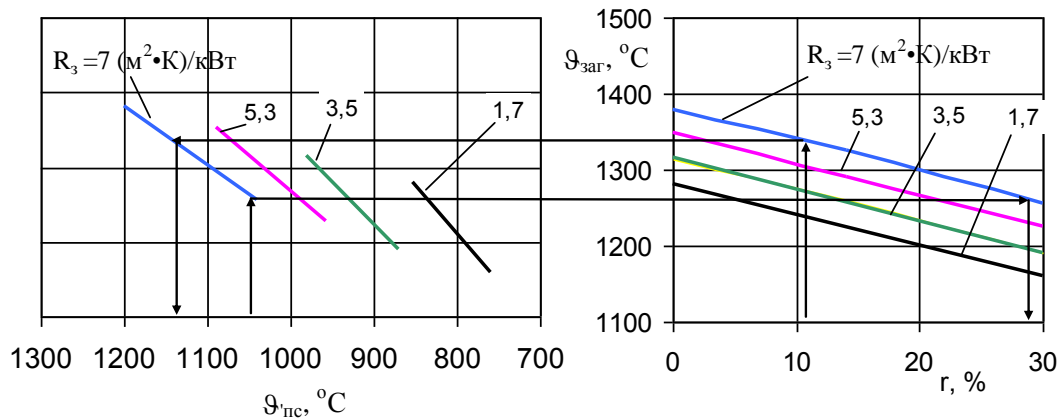


Рис. 9. Номограмма для определения бесшлаковочного режима работы топки котла БКЗ-210-140Ф:

$\theta_{\text{заг}}$ – температура газов в зоне активного горения; $\theta'_{\text{пс}}$ – температура газов в пристенном слое; R_3 – среднее тепловое сопротивление загрязнений экранов.

Для снижения температуры в пристенном слое наиболее проблемных зон тыльного и боковых экранов котлов с фронтальным расположением прямооточных горелок на уровне изобретения разработана система сопел тыльного воздушного дутья, выполненная в виде завес, которая внедрена на котлах ПК-10Ш Красноярской ТЭЦ-1 и на котле БКЗ-75 Минусинской ТЭЦ (рис. 11).

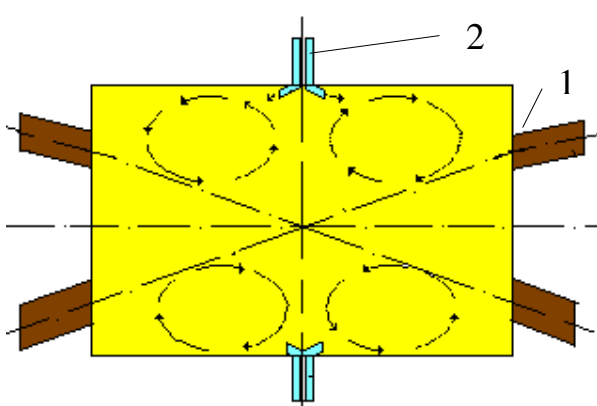


Рис. 10. Схема четырехвихревой топки:

1 – горелка; 2 – сопло третичного дутья

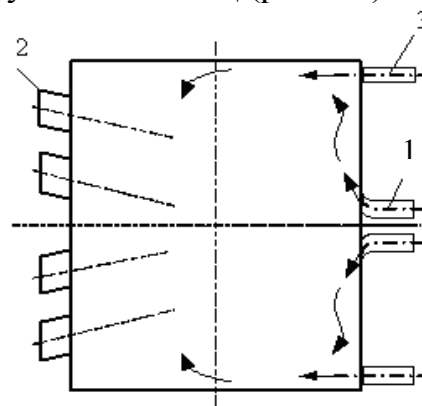


Рис. 11. Топка с системой сопел тыльного воздушного дутья: 1 – сопло тыльное центральное; 2 – горелка; 3 – сопло тыльное боковое

За счет внедрения режимных и конструктивных мероприятий, направленных на снижение температуры газов в пристенном слое тыльного экрана, удалось снизить темп его шлакования и тем самым обеспечить номинальную паропроизводительность котла БКЗ-420-140-7 Абаканской ТЭЦ.

С целью повышения качества сжигания, снижения шлакования экранов топки и выбросов оксидов азота предложены и защищены авторскими свидетельствами: топочное устройство со смещенной компоновкой горелок и сопел третичного дутья, способ предотвращения шлакования двухсветных экранов за

счет обдува их нижней части низкотемпературными газами рециркуляции через U-образные сопла, способы регулирования соотношения топливо-воздух в горелках и регулирования температурного уровня в топке путем изменения расхода газов рециркуляции и воздуха.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика экспериментального исследования влияния параметров пристенного газового слоя на характер и интенсивность образования золошлаковых отложений на топочных экранах с учетом зависимости этих параметров от режимных и конструктивных характеристик топок котлоагрегатов.

2. Установлено влияние конструктивных и режимных параметров топок с ТШУ на характеристики пристенного газового слоя у топочных экранов: плотность падающего лучистого потока, температуру и вектор скорости газов, содержание кислорода, концентрацию золоугольных частиц и содержание в них горючих, плотность сепарации частиц на экраны.

3. Экспериментальные исследования топок с твердым шлакоудалением с тангенциальной и фронтальной компоновкой прямооточных горелок выявили наличие существенной неизотермичности пристенного газового слоя у экранов: при удалении от экранов температура газов возрастает на 50–100 °С, стабилизируясь на расстоянии 0,3–0,5 м от экрана.

4. Установлены общие закономерности условий образования золошлаковых отложений на топочных экранах. Показано, что вид первичных отложений и скорость их образования зависят от параметров пристенного газового слоя у экранов. При этом доминирующее влияние оказывает температура газов вблизи экранов.

5. Выявлено существование предельной температуры газов $\vartheta'_{\text{пс}}$ (принята на расстоянии 50 мм от экрана), выше которой образуются прочные высокожелезистые отложения с содержанием $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 40\text{--}80\%$, а при более низкой – сыпучие, слабосвязанные с поверхностью экранных труб. Химический состав последних близок к составу летучей золы. Уровень этой температуры составляет 1050 °С.

6. Разработана методика зонального расчета и трехмерная математическая модель теплообмена в пристенном газовом слое топочных камер, позволяющая получить детальное распределение температуры и тепловых потоков в газовых слоях у поверхности экранов, а также влияние на указанные характеристики режимных и конструктивных параметров топочного устройства.

7. Предложена методика расчета движения твердой фазы для тангенциальных топок, позволяющая оценить влияние конструктивных и режимных параметров топки на инерционную сепарацию золоугольных частиц на топочные экраны. Установлено, что для тангенциальных топок котлов минимальное число Стокса, при котором может наблюдаться сепарация частиц на топочные экраны, равно 0,2.

8. Разработаны и получили практическую реализацию рекомендации, технические решения и изобретения по организации топочного процесса, направ-

ленные на уменьшение интенсивности шлакования и обеспечение длительной работоспособности радиационных поверхностей нагрева действующих и проектируемых котлоагрегатов при сжигании КАУ.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Маршак, Ю.Л. Шлакование топочной камеры при сжигании березовского угля / Ю.Л. Маршак, **С.Г. Козлов**, Э.П. Дик, С.И. Сучков, В.А. Слепухова // Теплоэнергетика. 1980. № 1. С. 16–22.

2. Маршак, Ю.Л. Исследование сжигания малозольного березовского угля в низкотемпературной тангенциальной топочной камере / Ю.Л. Маршак Ю.Л., С.И. Сучков, **С.Г. Козлов** и др. // Теплоэнергетика. 1981. № 7. С. 9–14.

3. Процайло, М.Я. О выборе способа сушки топлива при сжигании канско-ачинских бурых углей / М.Я. Процайло, Ю.А. Журавлев, **С.Г. Козлов**// Теплоэнергетика. 1982. № 11. С. 15–17.

4. Скуратов, А.П. Расчетное исследование теплообмена в тангенциальной топочной камере с твердым шлакоудалением при сжигании березовского угля / А.П. Скуратов, **С.Г. Козлов**, М.Я. Процайло //– Сб. трудов: «Методы сжигания канско-ачинского бурого угля в крупных энергетических установках». Красноярск: КГУ. 1983. С. 15–21.

5. Дик, Э.П. Шлакующие свойства березовского угля при сжигании его в топках с твердым и жидким шлакоудалением / Э.П. Дик, Б.В. Цедров, **С.Г. Козлов** и др. // Материалы научно-практической конференции «Оборудование ГРЭС и передача электроэнергии КАТЭКа». Красноярск. 1983. С. 123–126.

6. Скуратов, А.П. Методика расчета теплообмена в пристенном слое топочных камер / А.П. Скуратов, **С.Г. Козлов**, Ю.Л. Маршак// Сб. научных трудов «Теплообмен и гидродинамика». Красноярск: КПИ.1984. С.83–93.

7. Маршак, Ю.Л. Исследование структуры пристенного слоя в топках котлов и влияние ее на шлакование экранов при сжигании березовского угля / Ю.Л. Маршак, **С.Г. Козлов**, А.П. Скуратов // Материалы V Всесоюзной конференции «Горение твердого топлива» Новосибирск. 1985 ч. II. С.122–126.

8. Маршак, Ю.Л. Исследование горения березовского угля и загрязнения экранов в топке котла с воздушной сушкой топлива / Ю.Л. Маршак, В.Н. Верзаков, **С.Г. Козлов** // Материалы V Всесоюзной конференции «Горение твердого топлива». Новосибирск. 1985 ч. II. С.122–126.

9. Процайло М.Я. Первые результаты освоения котла Е-500 на Красноярской ТЭЦ-2 / М.Я. Процайло, **С.Г. Козлов**, Г.В. Лобов // Тезисы докладов IV краевого совещания «Проблемы сжигания канско-ачинских углей в котлах мощных энергоблоков». Красноярск. 1985. С. 100–101.

10. **Козлов, С.Г.** О загрязнении поверхностей нагрева котла Е-500 Красноярской ТЭЦ-2 / **С.Г. Козлов**, М.Я. Процайло, О.Н.Едемский // Проблемы сжигания канско-ачинских углей в котлах мощных энергоблоков: Тезисы докладов IV краевого совещания. Красноярск. 1985. С.98–100.

11. Верзаков, В.Н. Исследование топки котла БКЗ-500-140-1 / В.Н. Верзаков, Ю.Л. Маршак, **С.Г. Козлов**, В.Г. Мещеряков // Тезисы докладов IV крае-

вого совещания «Проблемы сжигания канско-ачинских углей в котлах мощных энергоблоков». Красноярск. 1985. С. 48–49.

12. Маршак, Ю.Л. Организация горения в топках с тангенциальным расположением горелок при сжигании бурых углей / Ю.Л. Маршак, М.Я. Процайло, **С.Г. Козлов** // Теплоэнергетика. 1986. № 5. С. 7–10.

13. Верзаков, В.Н. Исследование выгорания канско-ачинских углей в топочной камере котла БКЗ-500-140-1 / В.Н. Верзаков, Ю.Л. Маршак, **С.Г. Козлов**, В.Г. Мещеряков // Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции 1986 "Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов": Таллин, 1986, Т.1, с.66–69.

14. **Козлов С.Г.** Сепарация частиц на экраны тангенциальной топки / **С.Г. Козлов**, С.Ю. Белов, Ю.Л. Маршак // Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции «Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов». Таллин. 1986. Т.1 С.61–65.

15. Процайло, М.Я. Освоение и исследование опытно-промышленного котла БКЗ-500-140-1 с тангенциальной топкой для низкотемпературного сжигания канско-ачинских углей / Процайло, М.Я., Маршак Ю.Л., **Козлов С.Г** и др. // Теплоэнергетика. 1988. № 1. С. 5–12.

16. Едемский, О.Н. Загрязнение поверхностей нагрева котла БКЗ-500-140-1 при сжигании березовского угля / О.Н. Едемский, **С.Г. Козлов**, Ю.Л. Маршак, В.Н. Верзаков // Сб. научных трудов «Загрязнение и износ котельного оборудования». Алма-Ата. 1989. С. 15–18.

17. Срывков, С.В., Снижение оксидов азота и шлакование при низкотемпературном многоступенчатом сжигании канско-ачинских углей / С.В. Срывков **С.Г. Козлов**, Е.Г. Алфимов и др. // Сб. докладов научно-технической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов». Челябинск. 1992. С. 83–90.

18. **Козлов, С.Г.** Шлакование топки котла П-67 Березовской ГРЭС-1 / **С.Г. Козлов**// Электрические станции. № 11. 1992. С. 31–33.

19. Пронин, М.С., Особенности сжигания канско-ачинских углей в пылеугольных топках М.С. Пронин, Мещеряков В.Г., **С.Г. Козлов** и др. // Сб. научных трудов «Повышение эффективности и экологической безопасности сжигания углей на электростанциях Сибири». Красноярск. 1995. С. 13–35.

20. Пронин, М.С. Освоение технологии сжигания канско-ачинских углей в камерных топках и перспективы ее дальнейшего применения / М.С. Пронин, В.Г. Мещеряков, **С.Г. Козлов** и др. // Теплоэнергетика. 1996. № 9. С. 7–12.

21. Пронин, М.С. Результаты освоения реконструированного на твердый шлак котла БКЗ-320-140 ПТ-2 Красноярской ТЭЦ-1 / М.С. Пронин, А.И. Новиков, **С.Г. Козлов** и др. // Сб. докладов Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях». Красноярск. 2000. С. 181–183.

22. Пронин, М.С. Организация топочного процесса при реконструкции котлов паропроизводительностью 160,210,320,640 т/ч, сжигающих бурые угли / М.С. Пронин, **С.Г. Козлов**, Мещеряков В.Г. // Сб. докладов Всероссийской

научно-практической конференции «Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях». Красноярск. 2000. С. 229–232.

23. Пронин, М.С. Результаты освоения реконструированного на твердый шлак котла БКЗ-320-140 ПТ-2 Красноярской ТЭЦ-1 / М.С. Пронин, А.И. Новиков, **С.Г. Козлов**, и др. // Сб. докладов Всероссийской науч.-прак. конф. «Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях». Красноярск. 2000. С.181–183.

24. Рубцов, А.А. Результаты освоения на Абаканской ТЭЦ котла БКЗ-420 с твердым шлакоудалением и двухвихревой схемой сжигания / А.А. Рубцов, Пронин М.С., **С.Г. Козлов** и др. // Материалы IV международной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития энергетики Сибири». Красноярск. 2005. С. 107–114.

25. **Козлов С.Г.** Влияние характеристик пристенного газового потока на шлакование топочных экранов / **С.Г. Козлов**, Скуратов А.П. // Сб.: IV научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов». Челябинск. Т.1. 2007. С. 87–98.

26. **Козлов С.Г.** Исследование шлакования экранов топок с твердым шлакоудалением при сжигании березовского угля канско-ачинского бассейна / **С.Г. Козлов**, Скуратов А.П. // Тезисы докладов: «Всероссийский семинар кафедр ВУЗов по теплофизике и теплоэнергетике». Красноярск. 2009. С. 48.

27. Авторское свидетельство СССР 827887. Вертикальная прямоугольная топка / Ю.Л. Маршак, Ю.А. Харкин, **С.Г. Козлов** и др. // Бюл. № 17. опубл. 07.05.1981.

28. Авторское свидетельство СССР 1180647. Способ регулирования процессом сжигания шлакующих углей. / В.А. Шорохов, А.Н. Ефименко, **С.Г. Козлов**, А.П. Скуратов и др. // Бюл. № 35. опубл. 23.09.1985.

29. Авторское свидетельство СССР 1179031. Способ автоматического регулирования процесса горения. / В.А. Шорохов, П.В. Миненков П.В., **С.Г. Козлов**, А.П. Скуратов и др. // Бюл. № 34. опубл. 15.09.1985.

30. Авторское свидетельство СССР 1483184. Способ регулирования процесса горения в топке пылеугольного котла. / М.С. Пронин, М.Я. Процайло, **С.Г. Козлов** и др. // Бюл. № 20. опубл. 30.05.89.

31. Авторское свидетельство СССР 1562595. Вертикальная призматическая пылеугольная топка / С.В. Срывков, **С.Г. Козлов**, В.М. Журавлев, Г.М. Пузанова // Бюлл. № 17. опубл. 07.05.1990.

32. Авторское свидетельство СССР 1580113. Фонтанно-вихревая топка / С.В. Срывков, М.Я. Процайло, **С.Г. Козлов** и др. // Бюл. № 27. Опубл. 23.07.90.

33. Авторское свидетельство СССР 1710938. Топка. / С.В. Срывков, Ю.Л. Маршак, О.Г. Шишканов, **С.Г. Козлов** и др. // Бюл. № 5. опубл. 07.02.1992.

34. Патент РФ 2032853. Призматическая экранированная топка. / С.В. Срывков, М.Я. Процайло, **С.Г. Козлов** и др. // Бюлл. № 10. опубл. 10.04.1995.

Козлов Сергей Георгиевич
Повышение эффективности сжигания углей
Канско-Ачинского бассейна в топках с твердым
шлакоудалением

Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 14.05.2009 г. Заказ № 2/376

Формат 60 x 90/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Типография Политехнического института
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»