

на правах рукописи

ТЭПФЕР Елена Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА ПЫЛЕ-
УГОЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ П-67
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические
системы и агрегаты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2010г.

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» и в научно-производственной фирме ООО «ТОРИНС»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Дектерёв Александр Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Скуратов Александр Петрович

кандидат технических наук, доцент
Федоров Виктор Александрович

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

Защита состоится 28 апреля 2010 года в А 204 на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, ул. Ленина, 70.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета по адресу: 660074, Красноярск, ул. академика Киренского, 26, ауд. Г 274.

Автореферат разослан 24 марта 2010г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Т. М. Чупак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В мировом энергопотреблении на уголь приходится примерно четвертая часть. Большей частью уголь используется для выработки электрической и тепловой энергии при пылевидном сжигании в котлах крупных электростанций. Крупные энергетические предприятия на угле – это основной источник эмиссии оксидов азота в атмосферу. Технология снижения выбросов оксидов азота при сжигании пылевидного угольного топлива можно разделить на две группы: технологии оптимизации процесса сжигания, эффективно ограничивающие образование оксидов азота, и технологии очистки дымового газа от образовавшегося оксида азота. Применение низкоэмиссионных горелок и схем ступенчатого сжигания позволяет при относительно невысоких затратах на реконструкцию топки получать существенное снижение выбросов оксидов азота.

На котлах П-67 Березовской ГРЭС-1, наряду с проблемой выбросов оксидов азота так же остро стоит проблема шлакования поверхностей нагрева топочной камеры, обусловленная использованием березовского бурого угля канско-ачинского месторождения. Интенсивное загрязнение поверхностей нагрева топки приводит к необходимости вынужденных остановок котла и механической чистке топочных экранов, снижая тем самым эффективность их работы. В связи с этим 1991 году котлы были перемаркированы на производительность 750 МВт.

Для решения проблем, возникающих при работе котлов Березовской ГРЭС-1, актуальным стало совершенствование топочного процесса на основе его детального исследования. В последние годы при проектировании, исследовании и наладке котельного оборудования все более широко применяется математическое моделирование, основанное на физических законах, описывающих процессы аэродинамики и теплообмена. Компьютерное моделирование позволяет корректно изучить режимы работы и оптимизировать как вновь проектируемое, так и реконструируемое оборудование. Совместное использование математического моделирования, физического эксперимента и натурных испытаний дает возможность получить наиболее полную и достоверную информацию об объекте исследования. При этом существенно сокращаются затраты на проведение экспериментальных и опытных работ.

Объектом исследования являются топочные камеры пылеугольных котлоагрегатов П-67 Березовской ГРЭС-1.

Предмет исследования – характеристики теплообмена, показатели шлакования поверхностей нагрева топки, недожог топлива и уровень оксидов азота в уходящих газах при различных схемах организации топочного процесса.

Цель работы.

Повышение эффективности технологии сжигания шлакующих бурых углей в мощных котельных агрегатах на основе результатов численного мо-

делирования аэродинамики, теплообмена, горения, образования вредных выбросов и шлакования поверхностей нагрева топочных камер.

Для достижения указанной цели были решены следующие **задачи**:

- выполнить совершенствование моделей топочных процессов на основе компьютерной программы «SigmaFlame» для возможности учета механизмов образования и подавления оксидов азота, анализа тепловой эффективности топки на основе оценки характера шлакования поверхностей нагрева и расчета недожога топлива;
- провести оценку адекватности программы «SigmaFlame» для расчета тангенциальных топочных камер на базе данных гидродинамического лабораторного эксперимента и данных натурных исследований;
- построить математическую модель топочной камеры котла П-67 и выполнить исследование влияния схемы организации топочного процесса (компоновка сопел и горелочных устройств, режимных параметров, условий ввода аэросмеси и воздуха) на аэродинамику и тепловые характеристики топочного устройства;
- на основе анализа результатов расчетных исследований предложить рекомендации по выбору перспективных схем реконструкции топки котла П-67 с целью повышения эффективности сжигания топлива, снижения скорости шлакования, уменьшения концентрации оксидов азота в дымовых газах.

Научная новизна:

1. Предложены и реализованы в виде модулей в программе «SigmaFlame»:
 - модель образования и подавления оксидов азота, позволяющая рассчитывать схемы со ступенчатой организацией сжигания;
 - модель оценки шлакования топочных экранов;
 - блок анализа потерь с химическим и механическим недожогом для топочных камер с твердым шлакоудалением.
2. Впервые построена комплексная математическая модель котла П-67, учитывающая турбулентную пространственную аэродинамику, сложный теплообмен, выгорание пылеугольного топлива, образование оксидов азота, шлакование поверхностей нагрева.
3. Впервые для тангенциальных топочных камер с настенным расположением горелок выявлено, что зоны интенсивного шлакования топочных экранов находятся в области нечетного блока горелок и обусловлены характером аэродинамики газов. Установлено, что в углах топки формируются вторичные вихри, взаимодействие которых с основным вихревым потоком приводит к набросу факела на стенки топки.
4. Для блока 800 МВт получены зависимости параметров теплообмена (температуры поверхностей, в ядре факела и на выходе из топки, тепловые потоки), недожога топлива и концентрации оксида азота от расположения третичных воздушных сопел, угла наклона и поворота горелок, схемы загрузки ярусов и организации нижнего воздушного дутья.

Практическая значимость работы

На основе проведенных расчетных исследований предложены и реализованы технологические решения по модернизации топок котлов П-67 блоков № 1 и № 2, позволившие снизить вероятность шлакования топочных экранов, что обеспечивает возможность котлу нести длительную максимальную нагрузку 800 МВт, сократить количество выбросов оксидов азота до 350 мг/м^3 .

Разработаны предложения по конструкции топочной камеры котла блока № 3, при реализации которых котел будет удовлетворять современным экологическим требованиям для вновь проектируемых агрегатов.

Разработанное специализированное программное обеспечение и рекомендации по конструкции и организации топочного процесса используются в исследовательской деятельности ряда научных организаций (ВТИ, СибВТИ СибЭНТЦ, ООО «ТОРИНС») и для подготовки специалистов в учебном процессе на кафедре теплофизики ИИФиРЭ СФУ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная математическая модель топочной камеры котла П-67 включающая процессы: турбулентную аэродинамику, теплообмен, горение угольной пыли, образование и подавление оксидов азота, шлакования поверхностей нагрева.

2. Зависимости параметров теплообмена, недожога топлива и концентрации оксида азота от расположения третичных воздушных сопел, угла наклона и поворота горелок, схемы загрузки ярусов и организации нижнего воздушного дутья для блока 800 МВт.

3. Технические решения по реконструкции П-67 № 1 и № 2 Березовской ГРЭС-1, направленные на совершенствование топочного процесса, позволившие уменьшить шлакование поверхностей нагрева, увеличить время безостановочной работы котельного агрегата и, снизить выбросы оксидов азота до 350 мг/м^3 .

4. Рекомендации по конструкции и организации топочного процесса проектируемого нового блока № 3 Березовской ГРЭС-1, удовлетворяющего современным экологическим требованиям для вновь проектируемых агрегатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных методов теоретических исследований в области гидродинамики, теплообмена, горения твердого топлива. Результаты математического моделирования, не противоречат основным физическим законам и удовлетворяют результатам, полученным на лабораторных стендовых и промышленных установках. Достоверность математической модели была подтверждена сравнением результатов моделирования котла П-67 с данными натурального эксперимента.

Личный вклад автора заключается в постановке и реализации задач исследования, усовершенствовании специализированной программы «SigmaFlame», разработке основных положений научной новизны и практической значимости, реализации полученных результатов совместно со спе-

циалистами СибВТИ на действующих блоках № 1, 2 и при проектировании блока № 3 котла П-67 Берёзовской ГРЭС-1.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях: Международной конференции “Потоки и структуры в жидкостях”, Санкт-Петербург, 23-26 июня 2003 г.; Семинаре-совещании «Опыт внедрения новой техники и технологий в энергетике», г. Шарыпово, ОАО «Березовская ГРЭС», октябрь 2003 г.; Международной конференции «Угольная теплоэнергетика: «Проблемы реабилитации и развития». Сентябрь 2004- 2006, 2008 г., Алушта, Украина; X Всероссийский научно-практический семинар "Обеспечение безопасности и экономичности энергетического оборудования", 23-26 ноября 2004 г. С-Пб.; Международной конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» г.Алушта, 19-25 сентября 2005,2006,2008 г.; 4st International Conference on Computational Heat and Mass Transfer May 17-20, 2005, Paris-Cachan, FRANCE; 4-й Российской национальной конференция по теплообмену. 23—27 октября 2006 г. Москва; Всероссийской научно – технической конференции «Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий». Улан- Удэ, 24-30 июля 2006 г.; VI Всероссийская конференция «Горение твердого топлива», Россия, Новосибирск, 8-10 ноября, 2006 г.; III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетике», 21-23 ноября 2007 г. Екатеринбург; Конференции «Результаты фундаментальных исследования в области энергетике и их практическое значение», Москва 24 - 26 марта 2008 г. Объединенный Институт Высоких Температур Российской Академии Наук; VI Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике ВСВТЭ-2009. Красноярск, 13-15 мая 2009г. СФУ; VII Всероссийской конференции «Горение твердого топлива», Новосибирск 10-13 ноября 2009 г. Институт Теплофизики СО РАН.

Публикации. Основные результаты исследований по данной теме опубликованы в 19 печатных работах, из которых 1 статья из перечня ВАК.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения и приложения. Основной текст на 124 страницы, 5 таблиц и 48 рисунков. Список литературы из 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели исследований, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, а также приведено краткое содержание работы по главам.

В первом разделе дан обзор проблем, возникающих в топочных камерах при сжигании Канско-Ачинских бурых углей, описаны физико- химические свойства этих углей. Основные трудности сжигания Канско –Ачинских углей в топках энергетических котлов связаны с интенсивным шлакованием радиационных и конвективных поверхностей нагрева. Шлакование снижает интенсивность теплообмена в топке и в конвективных поверхностях нагрева

так, что в ряде случаев ограничивает эксплуатационную паропроизводительность котлов и уменьшает их надежность.

В соответствии с современными требованиями Минэкологии РФ обязательное для всех проектируемых ТЭС экологическое обоснование должно включать в себя сокращение выбросов в атмосферу. Подобная проблема особенно актуальна для Березовской ГРЭС-1 мощностью 800 МВт.

Так же в первой главе представлен обзор работ и проведен анализ существующего состояния в области математического моделирования топочных процессов. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во втором разделе представлена усовершенствованная в рамках программы «SigmaFlame» математическая модель, для численного моделирования процессов в топочной камере пылеугольных котлов, включающая модули: образования и подавления оксидов азота; шлакования экранов топки; потерь с химическим и механическим недожогом.

Для описания турбулентного режима реализуемого в топочных камерах используется система уравнений Рейнольдса. В работе применяется широко распространенная $k - \epsilon$ модель турбулентности. Предполагается, что топочная среда состоит из газов N_2 , O_2 , CO , CO_2 , H_2O , и горючих летучих C_nH_m . Дифференциальные уравнения переноса массы, импульса, энергии, концентраций и турбулентных характеристик можно представить в виде одного уравнения конвективно-диффузионного переноса для обобщенной переменной Φ :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S_\Phi \quad (1)$$

Φ	Γ_Φ	S_Φ
1	0	S_p
U	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho \frac{\partial k}{\partial x} + S_{pi}$
V	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \rho \frac{\partial k}{\partial y} + S_{pj}$
W	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \rho \frac{\partial k}{\partial z} - \rho g + S_{pk}$
h	μ_{eff}/σ_h	S_h
Y_i	μ_{eff}/σ_Y	S_{Yi}
k	μ_{eff}/σ_k	$G - \rho \epsilon$
ϵ	$\mu_{eff}/\sigma_\epsilon$	$C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_3 \frac{G^2}{\rho k}$

$$\Gamma_{\Phi} = \mu_{\text{eff}} / \sigma_{\Phi}; \quad \mu_{\text{eff}} = \mu + C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2)$$

где U, V, W – компоненты скорости газа; ρ, μ – плотность и вязкость газа; h – энтальпия газа; $C_1, C_2, C_3, C_{\mu}, \sigma_i$ – эмпирические константы. Нижний индекс p обозначает принадлежность переменной для частиц.

Задавая надлежащим образом Φ, σ_{Φ} и источник S_{Φ} , получаем любое из дифференциальных уравнений переноса. Запись уравнений в обобщенном виде удобна в том отношении, что какой-либо разработанный метод решения для этого уравнения может быть применен для многих уравнений подобной структуры, но различного физического наполнения.

Для описания движения частиц используется подход Лагранжа с моделью представительных частиц. По этой модели принимается, что математическая частица в процессе движения и выгорания ведет себя как реальная частица. При формировании же членов обмена массой, импульсом и энергией с газовой фазой математическая частица выступает как характерный представитель своего класса и несет информацию о совокупной массе этого класса частиц.

Уравнение движения частицы записывается как:

$$\frac{dU_{ip}}{dt} = C_w A_p \frac{\rho}{2} U_r (U_i - U_{ip}) - \rho g_i, \quad (3)$$

где C_w – коэффициент сопротивления; A_p – площадь сечения частицы.

Для моделирования процессов горения угольной пыли используется модель, предложенная В.И. Бабиным и Ю.Ф. Куваевым, основанная на обобщении экспериментальных данных. Согласно этой модели сначала происходит процесс прогрева частицы в течение времени $\tau_{в.л.}$ (принято, что это время соответствует времени выхода остаточной влаги):

$$\tau_{в.л.} = 5,3 \cdot 10^{14} k_{в.л.} T^{-4} d_p^{0,8} \quad (4)$$

По окончании этого времени начинается выход летучих. Считается, что скорость выхода летучих постоянна. Время выхода летучих равно:

$$\tau_{г.л.} = 0,5 \cdot 10^6 k_{г.л.} d_p^2 \quad (5)$$

На следующем этапе определяется время прогрева коксового остатка до его воспламенения:

$$\tau_{в.к.} = 1,12 \cdot 10^{10} k_{в.к.} \frac{\rho_p d_p^{1,2}}{T^3} \left(\frac{21}{Y_{O_2}} \right)^n \quad (6)$$

где $k_{в.л.}, k_{г.л.}, k_{в.к.}, n$ – эмпирические константы; T – температура газов; ρ_p, d_p – плотность и диаметр частицы, Y_{O_2} – концентрация кислорода.

Последний этап соответствует выгоранию кокса. Обзор работ, показывает, что в топках котельных установок скорости реагирования углерода с СО и с H_2O протекают в десятки раз медленнее, чем с кислородом. Для описания выгорания кокса используется одна гетерогенная реакция кислорода с углеродом.

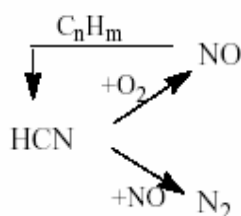
Моделирование образования оксидов азота при сжигании угля описывается тремя механизмами:

-термические оксиды азота образуются в результате реакции атмосферного азота с кислородом при повышенных температурах (свыше 1500°C) и описываются по механизму предложенным Зельдовичем.

-быстрые оксиды азота образуются в присутствии углеводородных радикалов, они преобладают в топливах с высоким значением молекулярного отношения водорода к углероду H/C. Механизм быстрого образования оксидов азота был предложен Фенимором.

-топливные оксиды азота – результат взаимодействия кислорода с азотом топлива. В газовую фазу он выходит в виде группы HCN и преобразуется, в результате комплекса реакций при горении, в NO или N₂.

В работе реализована модифицированная модель de Soete позволяющая рассчитывать схемы со ступенчатым сжиганием:



(7)

Для оценки динамики шлакования поверхностей нагрева использовалась эмпирическая вероятностная модель. Рассматривается движение угольных и золовых частиц в топочной камере и предполагается, что частица, достигшая стенки с заданной вероятностью прилипает на поверхность стенки или отскакивает от нее. Величины вероятности шлакования для разных углей были экспериментально получены в УралВТИ. Для Березовского угля эмпирическая константа вероятности шлакования в зоне интенсивного горения принята равной 0,6. По рассчитанному распределению массы осевших на поверхности стенки частиц строится область вероятного шлакования.

Численная реализация выбранной математической модели аэродинамики, теплообмена и горения аэросмеси в объеме топки осуществлялась с использованием специализированной программы «SigmaFlame», разработанной специалистами кафедры теплофизики СФУ и научно-производственной фирмы ТОРИНС.

В третьем разделе рассмотрены отдельные процессы, протекающие в топочных камерах, на базе которых проведена проверка адекватности усовершенствованной модели для расчета топочных камер, применяемой к основной задаче данной диссертационной работы.

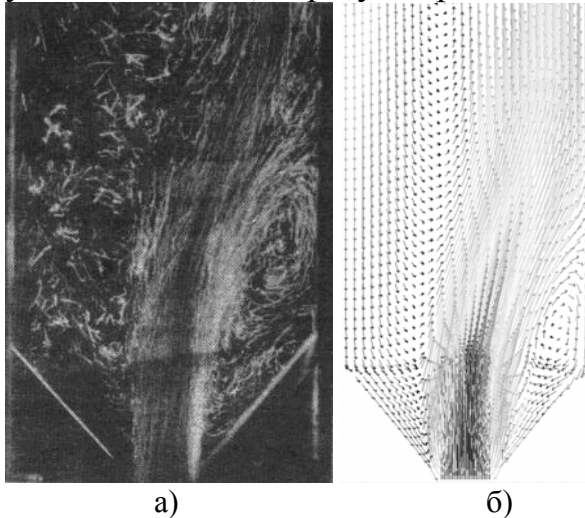
Обоснование выбранной модели аэродинамики было проведено на канонических задачах о циркуляционном движении жидкости в прямоугольной камере и закрученное течение в трубе. Получено хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными.

Для моделирования течений реализующихся в топочных устройствах были выбраны литературные данные по гидродинамическому моделирова-

нию фонтанно - вихревой топки, топки с угловым расположением горелочных устройств (аналог котла Е-500) и тангенциальной топки с настенным расположением горелок (аналог котла П-67), полученные на гидродинамических лабораторных стендах в ИТ СО РАН.

Так как при моделировании реального пылеугольного котла П-67 планировалось исследовать влияние нижнего дутья на топочный процесс, была рассмотрена задача течения в фонтанно-вихревой топке (ФВТ).

ФВТ представляет собой вертикальную призматическую камеру с двухскатной воронкой. Топливная смесь подается через прямоточное прямоугольное сопло, образуя вертикальный фонтанирующий факел.



Экспериментальные исследования в ИТ СО РАН показали, что истекающая из прямоугольного сопла струя устойчиво присоединяется за счет эффекта Коанда к одной из стенок (рис. 1). С использованием параметров экспериментальной установки была построена расчетная модель топки и проведено исследование аэродинамики ФВТ при числе $Re=6,2 \cdot 10^4$.

а) б)
Рисунок 1- Прилипания струи к стенке топки. а) эксперимент, б) расчет

Расчетная картина течения визуально качественно соответствует картине течения в эксперименте (рис. 1). Проведенное сопоставление профилей скорости в разных сечениях по высоте топки полученных экспериментально и расчетным путем (рис. 2) показало хорошее совпадение.

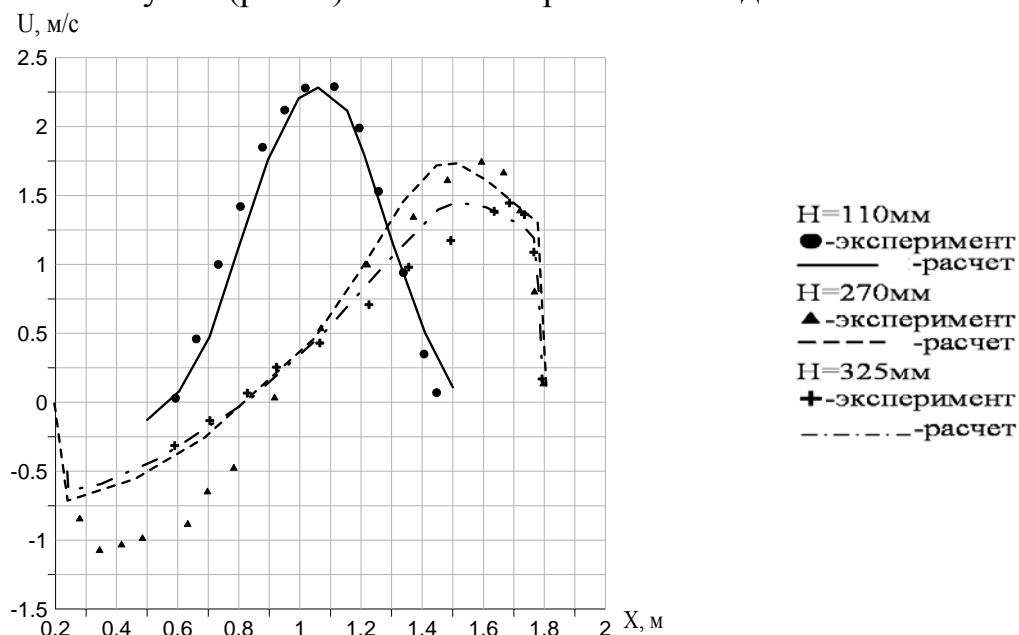


Рисунок 2 - Графики профиля скорости U(м/с) по высоте топочной камеры ФВТ

Экспериментальная гидродинамическая установка топки котла Е-500, выполненная из оргстекла представляет собой канал квадратного сечения размерами $188 \cdot 188 \cdot 700 \text{ мм}^3$ с боковым выходом. Прямоточные прямоугольные сопла расположены в три яруса и объединены в угловые блоки. Закрученное течение организовывалось путем направления осей сопел по касательной к воображаемой окружности с центром на оси канала. В эксперименте рассматривались различные варианты конфигурации топки. Для вариантов с диафрагмой в верхней части топки были выявлены и исследованы стационарные вихревые структуры.

При использовании представленной модели, впервые численно были получены стационарные концентрированные вихревые структуры с правой и левой винтовой симметрией, наблюдаемые в эксперименте (рис.3) и теоретически обоснованные в работе С.В. Алексеенко и др. «Введение в теорию концентрированных вихрей», Новосибирск, 2003.

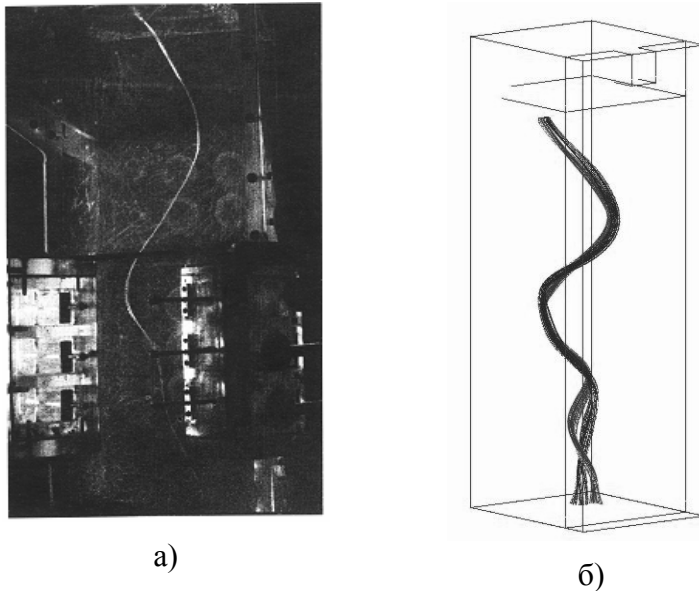


Рисунок 3 – Модель топки котла Е-500. Визуализация стационарного концентрированного вихря. а) экспериментальная установка, б) траектории движения частиц маркеров

В ИТ СО РАН на экспериментальной установке детально исследовалась структура потока в топке котла П-67. Модель топки изготовлена в масштабе 1:122 к натуральному котлу Березовской ГРЭС-1 (рис.4) имеет Т-образную компоновку, 32 прямоточных горелки, расположенных на стенках топочной камеры в 4 яруса.

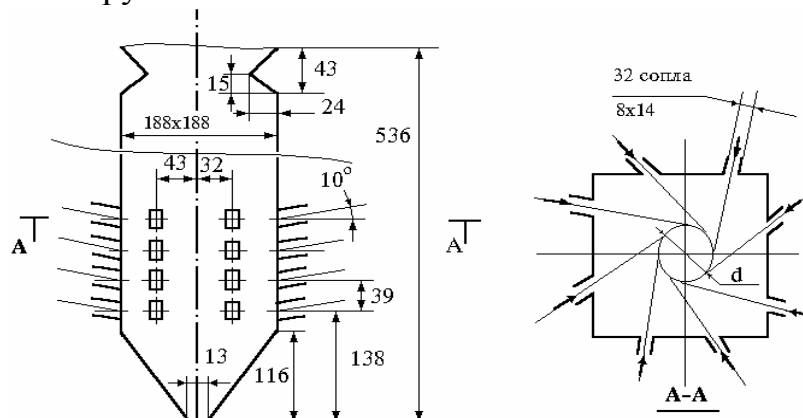


Рисунок 4 - Схематичное изображение экспериментальной установки котла П-67
 Графики сравнения результатов математического моделирования аэродинамики и результатов эксперимента модельной установки ИТ СО РАН представлены на рисунке 5. Как видно, результаты моделирования хорошо описывают структуру потока в экспериментальной топочной камере.

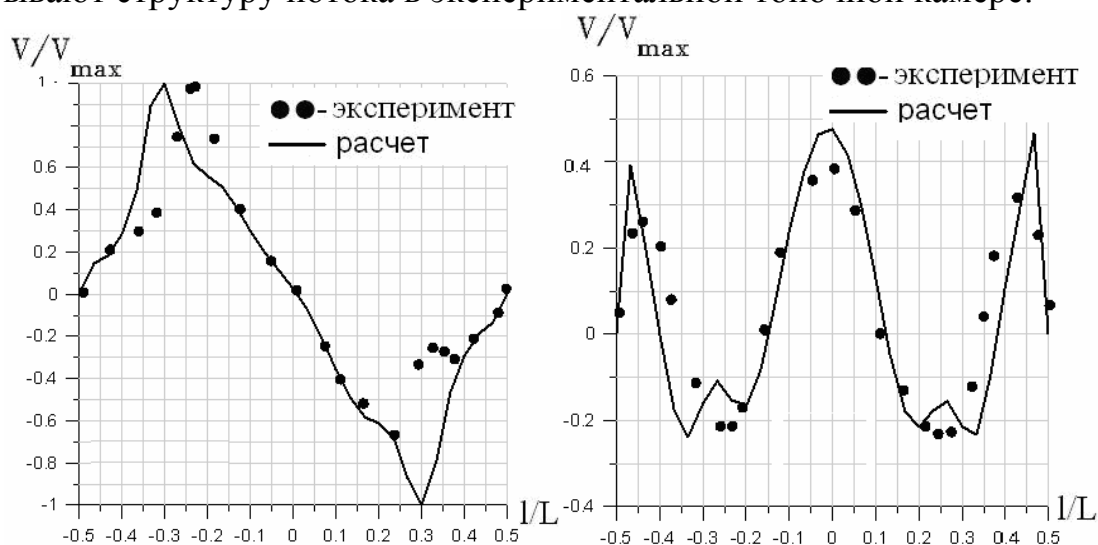


Рисунок 5 - Графики тангенциальной и аксиальной компонент скорости в сечении яруса горелок

При расчете аэродинамики экспериментальной установки - аналога реального котла П-67, впервые было обнаружено, что в нечетном блоке горелок происходит наброс факела на стенки топочной камеры (рис.6). Аэродинамическая структура газовых потоков в топочной камере обладает высокой неравномерностью. Максимальный уровень скорости топочных газов наблюдается в центральной части топки выше зоны активного горения. Крупномасштабный центральный вихрь инициирует вторичные вихри в углах топочной камеры, которые приводят к прямому набросу потока на стенку топки в области нечетного блока горелок. В реальных топках котла П-67 такой эффект наброса факела ведет к шлакованию поверхностей нагрева.

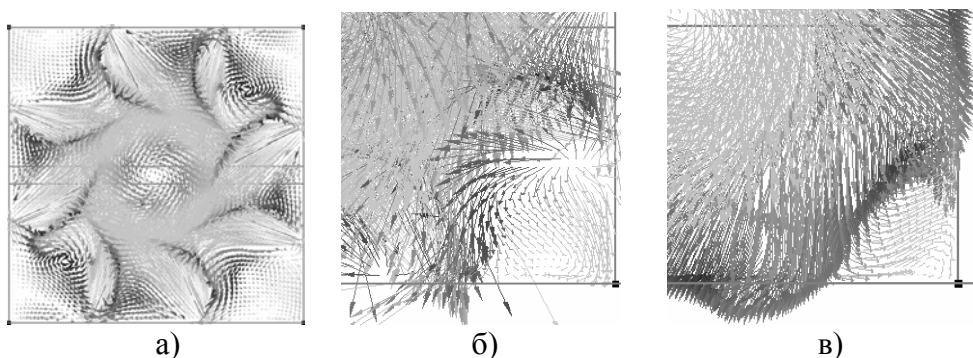


Рисунок 6 - Векторное поле скорости. а) в 1 ярусе горелок, б) увеличенный вид угла топки в 1 ярусе горелок, в) наброс потока на стенку камеры котла между ярусами горелок

В 2004-2007 годах специалистами СибВТИ был выполнен цикл натурных испытаний топочной камеры котла П-67 Березовской ГРЭС-1. Основным видом используемого топлива является бурый уголь Березовского месторож-

дения. В процессе эксплуатации котла, основные проблемы были обусловлены интенсивным шлакованием поверхностей нагрева. Это приводило к снижению эффективности теплообмена, а также к частым вынужденным остановкам котла для очистки поверхностей. На рисунке 7 показана схема топочной камеры и результаты натурных измерений температуры в топке и конвективном газоходе при работе блока на 750 МВт.

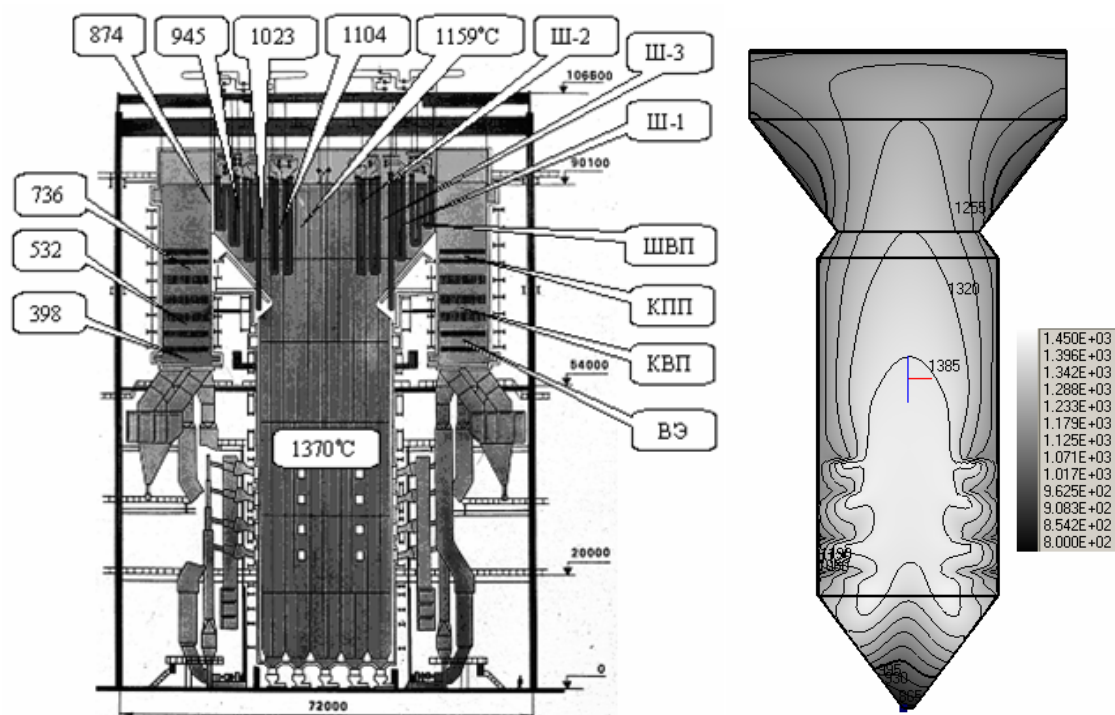


Рисунок 7- Общий вид котла П-67 с данными натурных испытаний и расчетное поле температур в топочной камере

Для исследования процессов в топочной камере котла П-67 с использованием усовершенствованной программы «SigmaFlame» была разработана комплексная математическая модель топки. Геометрически модель включает в себя области топочной камеры и поворотной камеры и содержит 240 000 расчетных узлов. Модель построена таким образом, чтобы можно было учесть подачу воздуха через холодную воронку и через сопла третичного дутья в ярусах горелок и над ними.

На базе эксперимента было проведено сравнение и анализ адекватности математической модели. Расчеты базовой компоновки котла соответствовали параметрам котла работающего в режиме существовавшего до реконструкции 2004 года. Результаты расчета сравнивались с экспериментом по ряду характеристик: температура факела, температура стенок камеры котла, область наброса факела на стенки и расположение зон интенсивного шлакования, температура и NO_x на выходе из топочной камеры.

Для зоны горения характерно, что существует высокотемпературное ядро, которое расположено приблизительно на расстоянии пять метров от поверхностей топочной камеры. Градиент температуры между пристенной зоной и высокотемпературным ядром горения составляет порядка 400 градусов. Максимальная расчетная температура в ядре факела достигала 1400°C ,

средняя расчетная температура на выходе из топки составляла 1116°C (1120°C эксперимент), выбросы NO_x – 460 мг/м³ (450 мг/м³ эксперимент), провал золы в холодную воронку 637 кг/ч (639 кг/ч эксперимент).

На рисунке 8 показаны фотография поверхности топки с отложениями, расчетные температура стенки и область шлакования поверхностей нагрева.

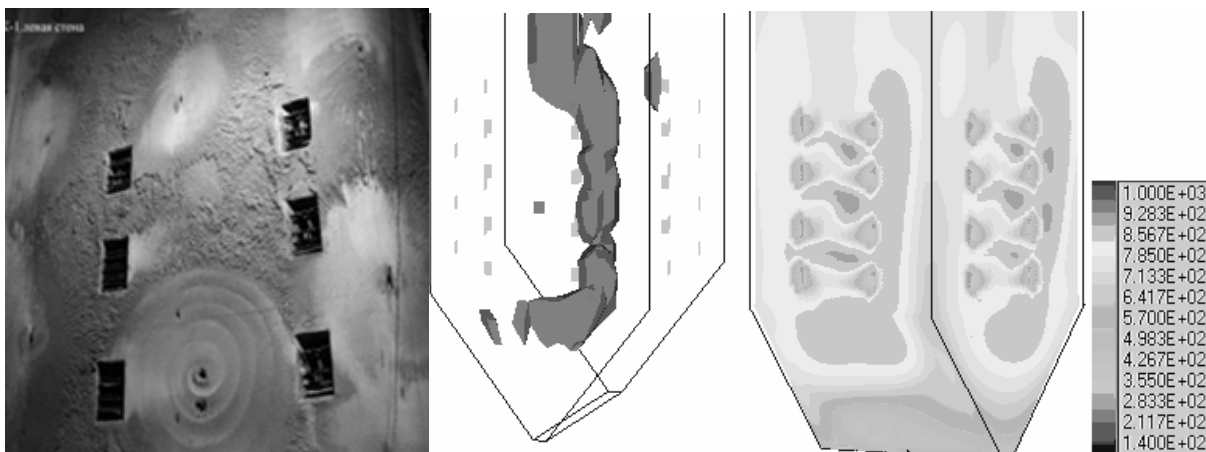


Рисунок 8 – Области интенсивного шлакования поверхностей нагрева топки и температура стенки

График распределения температуры вдоль оси топочной камеры приведен на рисунке 9. Точками обозначен результат эксперимента, линией данные расчета осредненные по высоте топочной камеры. На расчетной кривой хорошо видны провалы температуры на уровне горелочных ярусов.

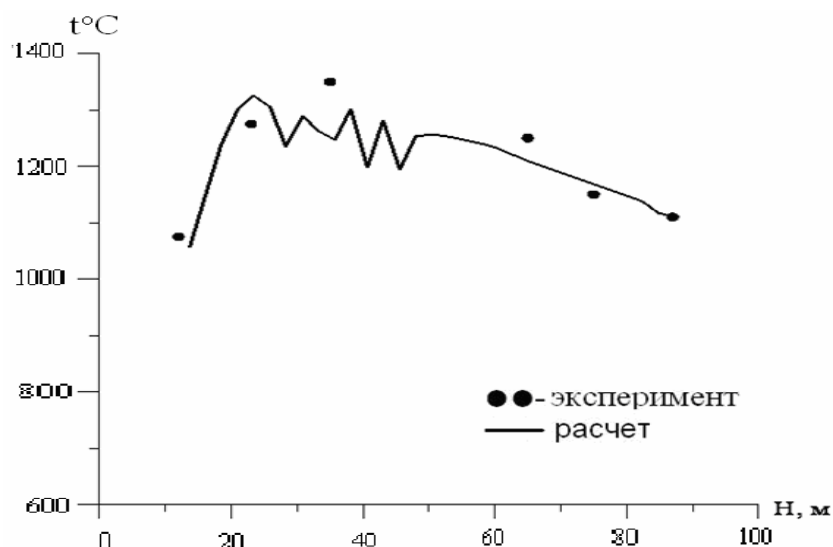


Рисунок 9 - График распределения температуры вдоль оси топочной камеры

Результаты математического моделирования хорошо воспроизводят данные измерений, их разница лежит в области погрешности экспериментальных измерений.

Четвертый раздел.

Для обоснования выбора схемы реконструкции блоков № 1 и 2, выполнено математическое моделирование различных вариантов топки: с органи-

зацией нижнего дутья; концентрическим сжиганием (воздушное дутье в ярусах горелок, 32 сопла); комбинацией нижнего дутья и концентрического сжигания (16 сопел на двух верхних ярусах горелок); организацией воздушного дутья выше зоны активного горения; комбинацией сопел дутья на верхних ярусах горелок и ступенчатого сжигания; организацией двух ярусов воздушных сопел выше зоны активного горения и др.

Полученные результаты расчета сравнивались с результатами эксперимента по нескольким критериям: скорости газов в объеме топки; температуры газов в объеме и на выходе топки, в пристенной области; воспринятые топочными экранами тепловые потоки; содержание кислорода в объеме топки и в пристенной области; выгорание топлива в объеме топки; зоны максимального наброса частиц на топочные экраны; концентрации оксидов азота в объеме топки; масса провала шлака и углерода в холодную воронку. Результаты исследований показали, что максимальный эффект по снижению шлакования поверхностей нагрева относительно "базового" варианта достигается в варианте с блоками воздушных завес и в варианте с нижним дутьем, а максимальный эффект по снижению выбросов NO_x достигается в варианте с двумя ярусами сопел дутья на высотах 45 и 65 м.

Для реконструкции станция остановилась на варианте с организацией нижнего воздушного дутья. Расчетным путем был проведен анализ способов организации подвода воздуха в холодную воронку и предложен оптимальный вариант, способствующий равномерной подаче воздуха в топочную камеру.

Было выполнено исследование влияния нижнего дутья, перераспределения топлива по ярусам горелок и тонины помола угольной пыли на эффективность топочного процесса. На рисунке 10 приведены графические зависимости концентрации NO_x на выходе из топки в зависимости от тонины помола топлива, избытка воздуха в топке и от загрузки по пыли ярусов горелок.

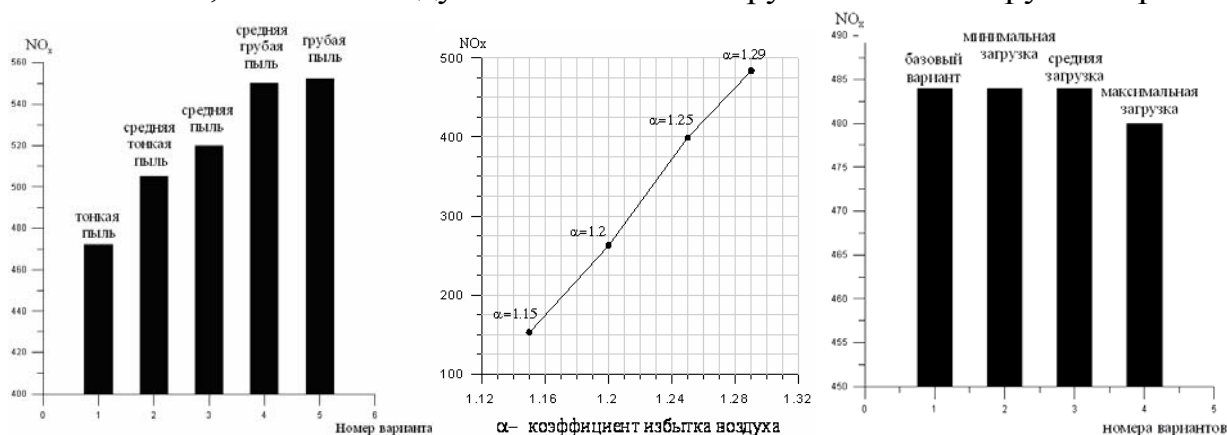


Рисунок 10- Графические зависимости влияния разных режимов работы топочной камеры на количество выбросов NO_x (мг/м³)

На рисунке 11 приведены гистограммы сравнивающие уровень провала золы в холодную воронку предварительно предсказанные расчетом и доказанные экспериментально. Загрузка нижних ярусов горелок при сжигании грубой пыли повышает провал в холодную воронку, но нижнее дутье дало хорошие результаты по снижению провала и содержанию углерода в нем по

отношению к базовому варианту на тонкой пыли, т.е. механический недожог в шлаке при нижнем дутье по расчетам существенно не менялся.

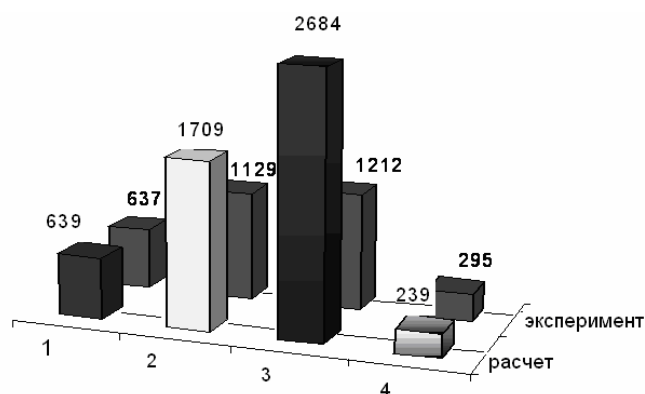


Рисунок 11 - Расход частиц золы в холодную воронку, кг/ч:

- 1- базовый вариант топки
- 2 - с «грубой» пылью
- 3 с «грубой» пылью и загрузкой нижних ярусов горелок
- 4- с «грубой» пылью и нижним дутьем

После проведенных расчетов, был предложен и внедрен вариант с организацией нижнего дутья и работой на топливе «грубого» помола с $R_{1000}=4\%$. Этот вариант характеризуется наименьшим недожогом топлива, увеличением зоны активного горения, вредные выбросы не превышают предельно допустимых норм, снижен уровень шлакования топочных экранов. При этом необходимы минимальные изменения конструкции топочной камеры.

В 2007, 2008 годах после реконструкции блоков № 1 и № 2 сотрудниками СибВТИ был проведен натурный эксперимент. Котел № 2 работал с тремя ярусами горелок (в отглушенный по аэросмеси четвертый ярус подавался воздух), "грубым" помолом, нижним дутьем горячего воздуха (6-7%). Расход воздуха на охлаждение растопочных горелок составлял 4-5%. Результаты эксплуатации реконструированных блоков № 1 и № 2 показали, что они могут длительно нести максимальную нагрузку 800 МВт.

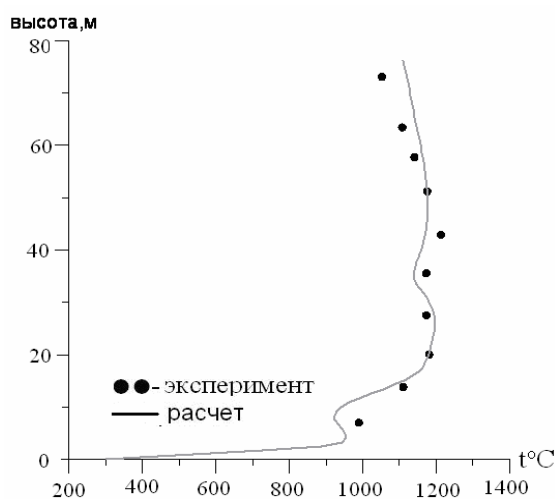


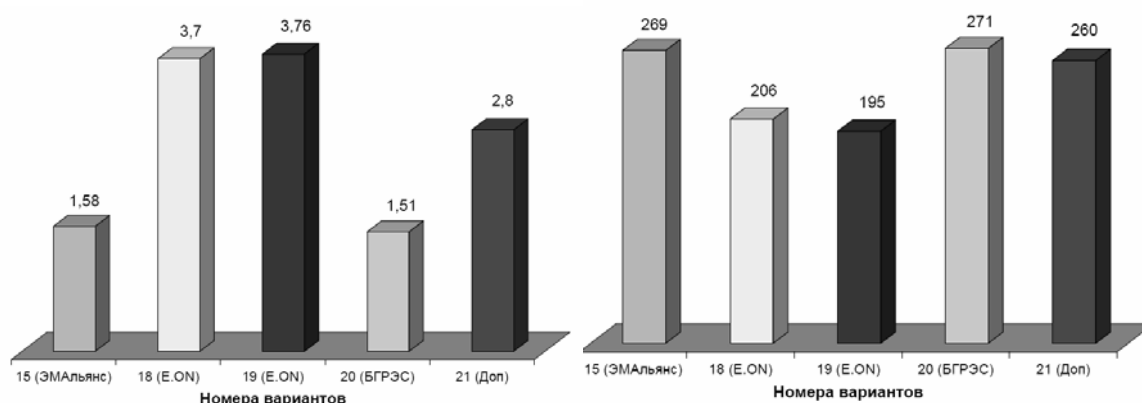
Рисунок 12 - График распределения температуры вдоль оси топочной камеры

Температуры газов в зоне активного горения (рис. 12) не превышают температуры 1250°C . Выбросы оксидов азота составили по результатам измерений СибВТИ - 409 мг/нм^3 ($\alpha=1,4$), а по данным экологической службы БГРЭС – 357 мг/нм^3 . КПД котла составил $91,3\%$. Оксиды азота на выходе из топочной камеры в результате расчета получились порядка 350 мг/м^3 .

Для вновь проектируемого котла блока № 3 Березовской ГРЭС-1 был выполнен новый цикл расчетных исследований для топки. Базируясь на

предложениях специалистов подольского филиала ОАО «Эмальянс», фирмы E.ON и сотрудников СибВТИ проведено математическое моделирование вариантов возможных проектных решений для топочной камеры этого котла. Исследовано более 20 различных вариантов конструкции топки: с восстановительной ступенью, с тангенциальным и встречным способом ввода третичного воздуха на разных отметках по высоте топки, с разными диаметрами крутки факела, с нижним воздушным дутьем и избытком воздуха на выходе из топки в диапазоне 1.17-1.20.

Варианты с установкой сопел OFA по предложениям фирмы E.ON дают наименьшие выбросы оксидов азота при минимальных значениях температуры газов на выходе из топки, однако химический и механический недожоги для этих вариантов недопустимо высоки. Кроме того, выше максимальная температура факела.



Механический недожог в сечении на отметке 73 м, %

Средняя расчетная концентрация NO_x в сечении на отметке 73 м, мг/м³

Рисунок 13 - Сравнение вариантов расчета по мех.недожогу и концентрации NO_x на выходе из топочной камеры

По результатам моделирования (рис.13) были сделаны оценки и даны рекомендации по конструированию нового блока котла.

Вариант с восстановительной ступенью, тангенциальным вводом третичного воздуха на отметках 44,4 и 46,4 м – выбран фирмой генеральным проектировщиком ПФ ОАО «ЭМАльянс» как приоритетный, конструктивно – компоновочно реализуемый в существующей компоновке котла.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. В рамках существующей программы «SigmaFlame», усовершенствована математическая модель процессов в топочных камерах в части расчета зоны шлаковая поверхностей нагрева, образования оксидов азота и уровня недожога топлива, позволяющая исследовать топочные камеры со ступенчатой схемой организации сжигания пылеугольного топлива.

2. На основе имеющихся данных лабораторных гидродинамических и натурных экспериментальных исследований обоснована адекватность моделей реализованных в программе «SigmaFlame», для расчета процессов в топоч-

ных камерах мощных котельных агрегатов, сжигающих пылеугольное топливо.

3. Впервые на основе программы «SigmaFlame» построена математическая модель и проведено расчетное исследование процессов в топочной камере энергетического котла П-67 учитывающая турбулентную пространственную аэродинамику, сложный теплообмен, выгорание пылеугольного топлива, образование оксидов азота, шлакование поверхностей нагрева.

4. Впервые для тангенциальных топочных камер с настенным расположением горелок выявлено, что зоны интенсивного шлакования топочных экранов находятся в области нечетного блока горелок и обусловлены характером аэродинамики газов. Установлено, что в углах топки формируются вторичные вихри, взаимодействие которых с основным вихревым потоком приводит к набросу факела на стенки топки.

5. На основе проведенных расчетных исследований предложены технологические решения, реализация которых позволила на котлах П-67 блоков № 1 и № 2 Березовской ГРЭС-1 снизить вероятность шлакования топочных экранов, обеспечить длительную максимальную нагрузку до 800 МВт, сократить количество выбросов NO_x до 350 мг/м^3 .

6. Разработаны предложения по рациональной схеме и режимам работы сопел третичного дутья проектируемой топочной камеры котла П-67 блока № 3 Березовской ГРЭС-1, позволяющие снизить содержание оксидов азота на выходе из топки до 300 мг/м^3 , что удовлетворяет современным экологическим требованиям для вновь проектируемых агрегатов.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Белый, В. В. Исследование теплообмена и модернизация топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт газа/ В. В. Белый, С. В. Порозов, В. В. Васильев, А. А. Дектерев, **Е. С. Тэпфер** // Теплофизика и аэромеханика. – 2007. – Т. 14, № 2. С. 299 – 312.
2. Гаврилов, А. А. Расчетное исследование теплообмена в пылеугольном энергоблоке мощностью 800 МВт/ А. А. Гаврилов, **Е. С. Тэпфер**, А. А., Дектерев, Е. Б. Харламов// Вычислительные технологии т. 9, часть II. Совместный выпуск с Вестником КАЗНУ им. Аль-Фараби. – 2004. – Серия математика, механика информатика № 3 (42), С. 64 – 74.
3. Гаврилов, А. А. Разработка, тестирование и использование программы для моделирования пространственных течений/ А. А. Гаврилов, **Е. С. Тэпфер**, Е. Б. Харламов, А. А. Дектерев// Сборник трудов международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях» Санкт-Петербург 2003г. ИПМ РАН, Москва. 2004. – С. 212 – 216.
4. Гаврилов, А. А. Моделирование процессов аэродинамики, теплообмена и горения в технологических устройствах/ А. А. Гаврилов, К. Ю. Литвинцев, **Е. С. Тэпфер**, А. А. Дектерев, Е. Б. Харламов, П. А. Необъявляющий// Сборник трудов конференции «Проблемы информатизации региона ПИР-2003». Красноярск. 2003.– С. 87– 91.

5. Белый, В. В. Исследование теплообмена в топке котла П-67/ В. В. Белый, **Е. С. Тэпфер**, А. А. Гаврилов, А. А. Дектерёв, Е. Б. Харламов, В. В. Васильев// Тезисы докладов и сообщений, V Минский международный форум по тепло- и массообмену. Москва. 2004.– С. 265–267.
6. **Тэпфер, Е. С.** Расчетное исследование вариантов реконструкции энергетического котла П-67 с целью снижения образования экологически опасных выбросов/ Е. С. Тэпфер, А. А. Гаврилов, А. А. Дектерёв, В. В. Васильев// Материалы Международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии». Томск. 2004. – С. 50–51.
7. Гаврилов, А. А. Математическое моделирование процессов в тангенциальной топочной камере энергетического котла/ А. А. Гаврилов, Е. Б. Харламов, **Е. С. Тэпфер**, В. В. Белый, В. В. Васильев// Тезисы докладов XXVII Сибирского теплофизического семинара. Москва-Новосибирск. 2004. – С. 107–108. Сборник трудов.
8. Dekterev, A. A. Numerical modeling of heat transfer processes in the furnace of 800 MW block coal-dust boiler/ А. А. Dekterev, А. А. Gavrilov, **E. S. Tepfer**, V. V. Vasilyev// Сборник трудов 4st International Conference on Computational Heat and Mass Transfer. Paris, FRANCE. –2005.– Vol. 1.- P. 610-613.
9. Гаврилов, А. А. Комплексное моделирование вариантов реконструкции топочной камеры блока 800 МВт/ А. А. Гаврилов, А. А. Дектерев, **Е. С. Тэпфер**, В. В. Белый, В. В. Васильев// Тезисы докладов 1-ой научно-практической конференции Угольная теплоэнергетика: Проблемы реабилитации и развития. Алушта. 2004. – С. 25 – 27.
10. Гаврилов, А. А. Комплексное математическое моделирование вариантов реконструкции пылеугольного котла блока 800 МВт/ А. А. Гаврилов, Е. Б. Харламов, **Е. С. Тэпфер**, В. В. Белый, В. В. Васильев// Сборник докладов IV Международной научно-технической конференции “Достижения и перспективы развития энергетики Сибири”. Красноярск. 2005. – С. 394–404.
11. **Тэпфер, Е. С.** Исследование нижнего дутья в топке котла П-67 на основе математического моделирования/ Е. С. Тэпфер// Сборник тезисов докладов 4 всероссийской школы – конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». Новосибирск. 2006. – С. 123–124.
12. **Тэпфер, Е. С.** Расчетное исследование теплообмена и образования окислов азота в пылеугольной топке/ А. А. Гаврилов, А. А. Дектерев, Е. С. Тэпфер// Материалы 7 Всероссийской научно – технической конференции «Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий». Улан-Удэ. 2006.– Ч.–1.– С. 50–53.
13. **Тэпфер, Е. С.** Расчетное исследование влияния тонины помола угольной пыли на работу топки котла П-67 Березовской ГРЭС/ Е. С. Тэпфер, А. А. Гаврилов, В. В. Васильев, А. А. Дектерев// Сборник докладов VI Всероссийской конференции «Горение твердого топлива». Новосибирск. 2006.– Ч.–2.– С.254–264.
14. Чернецкий, М. Ю. Математическое моделирование процессов тепломассообмена и выгорания в топочной камере котла на суперкритические пара-

метры пара/ М. Ю. Чернецкий, А. А. Гаврилов, А. А. Дектерев, **Е. С. Тэпфер**// Материалы докладов VI школы-семинара молодых ученых и специалистов академии РАН В.Е. Алемасова. «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». Казань. 2008.– С. 256–259.

15. Гаврилов, А. А. Расчетные исследования вариантов реконструкции тангенциальной топочной камеры/ А. А. Гаврилов, А. А. Дектерев, М. Ю. Чернецкий, **Е. С. Тэпфер**// Сборник тезисов докладов 6-ой Международной школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики». Алушта. 2008.– С. 140–141.

16. **Тэпфер, Е. С.** Моделирование процессов в тангенциальной топочной камере при сжигании бурых углей/ Е. С. Тэпфер, А. А. Дектерев, А. А. Гаврилов, М. Ю. Чернецкий// Материалы региональной научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий». Издательство Томск. 2009.– С. 139–146.

17. Васильев, В. В. Результаты численного моделирования модернизируемой топочной камеры котла П-67 ст. № 3/ В. В. Васильев, П. Ю. Гребеньков, А. А. Дектерев, **Е. С. Тэпфер**, Е. М. Жадовец// Сборник докладов международной научно-технической конференции «Технологии эффективного и экологически чистого использования угля». Москва. 2009.– ВТИ.– С. 96–101.

18. Дектерев, А. А. SigmaFlame-специализированная программа для моделирования топочных камер/ А. А. Дектерев, А. А. Гаврилов, Е. Б. Харламов, М. Ю. Чернецкий, **Е. С. Тэпфер**// Сборник тезисов VI Всероссийского семинара по теплофизике и теплоэнергетике. Красноярск. 2009. С.–25.

19. **Тэпфер, Е. С.** Расчетное исследование вариантов организации процессов сжигания угля в котлах Березовской ГРЭС-1/ Е. С. Тэпфер, А. А. Дектерев, А. А. Гаврилов, В. В. Васильев// Сборник докладов VII Всероссийской конференции «Горение твердого топлива». Новосибирск. 2009 – Ч.–1.– С. 215–220.

Подписано в печать 22.03.2010.
Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 1,1.
Тираж 100 экз. Заказ № 1459

Отпечатано в типографии ИПК СФУ
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а