

На правах рукописи

Гиль Андрей Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЧНОЙ СРЕДЫ
ПРИ ПЕРЕВОДЕ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ С ТВЕРДЫМ
ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ НА НЕПРОЕКТНОЕ ТОПЛИВО**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Томский политехнический университет”

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Старченко А.В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Пузырев Е.М.

доктор технических наук, профессор Лебедев В.М.

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится «23» декабря 2008 года в 14:30 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 в Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2, корпус 10, ауд. 228.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической Библиотеке ГОУ ВПО “Томский политехнический университет”

Автореферат разослан « 21 » ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.



Долматов О.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В условиях резкого изменения ценовой политики продаж нефти и природного газа в развитых странах интерес к использованию твердого топлива как к основному мировому энергоносителю продолжает неуклонно повышаться. В России с окончанием «газовой паузы» и наметившимися тенденциями перехода к более глубокой переработке нефти увеличивается доля потребления угля в теплоэнергетике. Поэтому вопрос о развитии новых энергоэффективных технологий сжигания углей в «большой» и «малой» энергетике является актуальным.

Однако повышение спроса на твердое топливо сопровождается необходимостью решения задачи об использовании на ТЭС непроектных марок углей. Это связано с тем, что по действующим нормам проектирования и строительства ТЭС располагаются вблизи угольных месторождений и рассчитываются на использование определенных углей (обычно одной марки) с учетом их запасов и теплотехнических свойств. Эксплуатационный срок службы энергетического оборудования составляет около 100000 ч, то есть приблизительно 12 лет, однако на практике при действующей системе капитальных ремонтов большинство электростанций России работает более 30 лет. Иногда в течение этого срока происходит исчерпание запасов проектного угля или изменение его теплотехнических характеристик.

В качестве примера можно указать проблему перевода Омских ТЭЦ-4 и 5 на сжигание непроектных топлив, поскольку зольность базового экибастузского угля, поступающего на ТЭС России, в последние годы достигает 50 %, что приводит к превышению ПДВ и ПДК твердых частиц в окружающей среде. При этом на Омской ТЭЦ-4 золоотвал переполнен, а на Омской ТЭЦ-5 требуются огромные инвестиции для поддержания его в работоспособном состоянии.

Современный уровень развития математического моделирования физических процессов и специального программного обеспечения позволяет решать задачи теплоэнергетики менее затратным путем численного исследования, преимущества которого наиболее очевидны при необходимости отбора технических решений при конструкторской проработке нескольких вариантов.

Актуальность темы диссертации определяется ее соответствием современным тенденциям в развитии топливно-энергетического комплекса России, а именно внедрением новых технологий, связанных с использованием на ТЭС непроектных марок углей, для увеличения доли угольного топлива при выработке электрической и тепловой энергии.

Работа выполнялась в соответствии с основными направлениями научной деятельности Томского политехнического университета

(«Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов», «Развитие теоретических основ и разработка технологий производства энергии и энергоресурсосбережения в различных отраслях»). Также исследования выполнялись при поддержке федеральной целевой программы № 360303601 «Разработка методов расчета динамики, горения и теплообмена в полидисперсных гетерогенных потоках».

Целью диссертационного исследования является разработка и апробация технологии проведения предпроектного анализа конструкторских решений по модернизации пылеугольных топочных камер котельных агрегатов БКЗ-420-140 при замещении базового топлива непроектным с использованием численного моделирования на основе пакета прикладных программ FIRE 3D.

Основные задачи исследования:

- усовершенствование пакета прикладных программ FIRE 3D для учета выхода влаги из угольных частиц с целью обеспечения более качественного анализа протекания сложных аэротермохимических процессов в топочном объеме;
- проведение тестирования пакета FIRE 3D по известным экспериментальным данным для пылеугольных топок котлов, сжигающих близкие по составу и теплофизическим свойствам угли;
- разработка различных схем организации факельного сжигания замещающих углей в топке котла БКЗ-420-140;
- проведение вычислительного эксперимента, позволяющего оценить влияние конструкции исследуемой топки, типа и компоновки горелочных устройств, режимных параметров, условий ввода аэросмеси и воздуха на аэродинамические и тепловые характеристики топочного устройства;
- выявление наиболее перспективных конструкторских решений при различных схемах факельного сжигания непроектных топлив в топке котла БКЗ-420-140.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые для топки с твердым шлакоудалением выполнены полномасштабные исследования процессов аэродинамики, теплообмена и горения при замещении базового топлива непроектными углями;
- выполнена модернизация пакета прикладных программ FIRE 3D, связанная с учетом выхода влаги из пылеугольного топлива в процессе его сжигания;
- разработана технология применения методов математического моделирования и специализированных вычислительных пакетов для

предпроектной проработки конструктивных изменений топок котлов, переводимых на непроектное топливо.

Практическая значимость работы:

- полученные результаты исследования и модернизированная методика численного анализа могут применяться при проектировании и реконструкции котельных агрегатов на различных видах твердого топлива;
- результаты исследования топочных процессов в топке котла БКЗ-420-140 используются на Омской ТЭЦ-4 для достижения оптимальных условий теплообмена и горения в топке, а так же при анализе эффективности сжигания непроектных топлив;
- методика исследования используется в учебном процессе по специальности 140502 «котло- и реакторостроение» в Томском политехническом университете (включена в лекционный курс и лабораторный практикум по дисциплине «Методы защиты окружающей среды», в тематику выпускных квалификационных работ и учебно-исследовательской работы студентов).

Достоверность результатов обеспечивается применением апробированных математических моделей и надежных методов вычислений, согласованием расчетов с экспериментальными данными других авторов, а также с результатами, полученными по нормативному методу теплового расчета.

На защиту выносятся:

- постановка задачи численного моделирования аэродинамики, теплообмена и горения при сжигании углей в пылеугольной топке котла БКЗ-420-140 с использованием специального прикладного пакета FIRE 3D;
- результаты тестирования усовершенствованного пакета FIRE 3D на экспериментальных данных сжигания пылеугольного топлива;
- предложенные схемы организации сжигания замещающих проектное топливо углей в топке котлоагрегата БКЗ-420-140;
- результаты математического моделирования сложных физических процессов во всем объеме топочной камеры котла БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-4 при использовании непроектного топлива и изменения схемы и условий выгорания топливно-воздушной смеси.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на VI Всероссийском совещании «Энергоэффективность, энергосбережение и энергетическая безопасность регионов России» (г. Томск, 2005 г.), 3-й Всероссийской конференции молодых ученых «Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии» (г. Томск, 2006 г.), XII Всероссийской научно-технической конференции

«Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, 2006 г.), VI Всероссийской конференции «Горение твердого топлива» (г. Новосибирск, 2006 г.), IV научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов» (г. Челябинск, 2007 г.), VIII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Новосибирск, 2007 г.), XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2008 г.).

Публикации. По теме диссертационного исследования автором опубликовано 11 работ, в том числе 1 статья в рецензируемом издании из списка ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения и списка литературы (106 наименований). Работа содержит 171 страницу, 9 таблиц и 48 рисунков.

Личное участие автора. Автор непосредственно участвовал в постановке задач, усовершенствовании пакета прикладных программ FIRE 3D, в разработке схем и условий сжигания замещающих углей в топке котла БКЗ-420-140, анализе и обобщении результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается анализ современного состояния российской энергетики в аспекте темы диссертационной работы и подчеркивается актуальность проблемы замещения проектных топлив на ТЭС страны, и, в частности, на Омской ТЭЦ-4. Обосновывается выбранная методика проведения исследований.

В первой главе представлены основные тенденции, связанные с замещением проектных топлив. Это и высокие цены на нефтепродукты, повышение цен на природный газ и в перспективе сокращение объемов его добычи, что приведет к завышению цен на газ и снижению поставок на внутреннем рынке, поскольку необходимо выполнять экспортные поставки газа. Кроме того, монополизация рынка угля и ухудшение качества отгружаемой с разрезов продукции заставляют руководство ТЭС искать другое угольное топливо в замен проектного.

Подробно рассмотрено состояние угольной промышленности, поскольку в перспективе развитие топливно-энергетического комплекса России связывают с повышением потребления угля. На основе компонентного состава и теплофизических свойств, а также по оценке запасов отечественных углей в качестве замещающих экибастузский уголь на Омской ТЭЦ-4 предложены каменный кузнецкий уголь марки Д и бурый ирша-бородинский марки 2Б.

Представлен обзор проведенных исследований, связанных с проблемой перехода на непроектное топливо, как на основе экспериментального подхода, так и на основе применения пакетов прикладных программ. Из обзора следует, что зачастую при замещении базового топлива кроме топлива изменяется конструкция топки котла и условия эксплуатации оборудования, при этом крупномасштабные изменения в конструкции требуют значительного количества материальных затрат, привлечения большого числа специалистов, вывода котельных агрегатов из работы на длительные сроки, и при всем при этом гарантировать надежную и эффективную работу котла после реконструкции невозможно. Проведение вычислительных экспериментов с использованием специализированных пакетов для предпроектной проработки реконструкции котельного агрегата при замещении топлив и решении других проблем позволяет уже на ранней стадии отказаться от вариантов, не соответствующих требованиям надежной, эффективной и экологически чистой работы котла. При этом затраты на проведение численного исследования гораздо меньше, сроки проведения исследований минимальны по отношению к экспериментальным и теоретическим методам.

Во второй главе описывается физико-математическая постановка задачи, в которой рассматривается объект исследования - котельный агрегат БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-4 и теплофизические свойства проектного и замещающих углей (таблица 1).

Таблица 1 - Основные характеристики проектного и замещающих углей

Параметры углей	Экибастузский ИСС	Кузнецкий Д	Ирша-Бородинский 2Б
Влажность W_t^r , %	6,5	11,5	33
Зольность A^r , %	36,9	15,9	7,4
Содержание серы $S_p^r + S_o^r$, %	0,7	0,4	0,2
Содержание углерода C^r , %	44,8	56,4	42,6
Содержание водорода H^r , %	3	4	3
Содержание азота N^r , %	0,8	1,9	0,6
Содержание кислорода O^r , %	7,3	9,9	13,2
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	17,38	21,9	15,28
Выход летучих V^{daf} , %	25	40,5	47

Для построения адекватной математической модели аэродинамики, горения и теплообмена в топках, сжигающих пылеугольное топливо, в данной работе используется метод, совмещающий Эйлера и Лагранжевы подходы для описания движения газа и взвешенных частиц. Согласно этому методу движение, теплообмен и горение в газовой фазе представляются на основе Эйлера способа описания, т.е. используются стационарные пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергии для газовой смеси. Лагранжев подход применяется для описания движения и тепломассообмена одиночных частиц топлива и золы вдоль их траекторий с учетом обратного влияния дисперсной фазы на несущую среду. Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической «*k-ε*» модели турбулентности, также учитывающей влияние движущихся частиц. Радиационный теплообмен в двухфазном потоке представляется в рамках P1 приближения метода сферических гармоник, который показывает хорошие результаты применения к пылеугольным топкам.

Считается, что подача топливовоздушной смеси и воздуха не зависит от времени и осуществляется равномерно по сечениям амбразуры горелок. Поступающие в топку полидисперсные частицы угольного топлива, содержат влагу после пылесистемы $W^{nl} \leq W^{zu}$. Перемещаясь по топочному объему, частицы топлива продолжают нагреваться за счет радиационно-конвективного теплообмена и их сушка продолжается в топке. При дальнейшем нагреве (выше 600 К) начинается выход летучих компонентов, их воспламенение, горение и догорание коксового остатка. Предполагается, что газовая среда в топке состоит из химически инертных молекулярного азота N_2 , двуокиси углерода CO_2 , паров воды H_2O , а также реагирующих O_2 , CO и летучих.

Математическая модель включает:

1) Уравнение изменения массы газовой смеси за счет выхода влаги, летучих и горения коксового остатка,

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = J_{evap} + J_{vap} + J_{char}, \quad (1)$$

где ρ – плотность газовой смеси; U_i ($i = 1, 2, 3$) – компоненты скорости газа; x_i ($i = 1, 2, 3$) – декартовы координаты; J_{evap} , J_{vap} , J_{char} – массовые скорости испарения влаги, выхода летучих и догорания коксового остатка.

2) Уравнения изменения массы газовых компонентов,

$$\frac{\partial \rho C_{N_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{N_2}}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho C_{O_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x_i} \right) - \beta_{vol} J_{vol} - \beta_{CO} J_{CO} - J_{char}^{O_2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho C_{vol} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{vol}}{\partial x_i} \right) + \alpha_{vap} J_{vap} - J_{vol}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho C_{CO} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{CO}}{\partial x_i} \right) + J_{char}^{CO} - J_{CO}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho C_{H_2O} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial x_i} \right) + J_{evap} + \gamma(1 + \beta_{vol}) J_{vol}, \quad (6)$$

$$\sum_{j=N_2, O_2, vol, CO, CO_2, H_2O} C_j = 1, \quad (C_{N_2} + C_{O_2} + C_{vol} + C_{CO} + C_{CO_2} + C_{H_2O} = 1). \quad (7)$$

Здесь C_j – концентрации газовых компонентов; μ_t , Sc_t – турбулентная вязкость газа и турбулентное число Шмидта ($Sc_t = 0,9$); J_{vol} – массовая скорость горения летучих, зависящая от скорости химической реакции горения углеводородов $C_m H_n$, β_{vol} – количество O_2 , необходимое для сгорания 1 кг летучих, α_{vap} – массовая доля летучих.

3) Уравнения количества движения для газовой фазы

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g_j + F_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[\rho k + (\mu + \mu_T) \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] \right]; j = 1, 2, 3, \quad (8)$$

где p – давление; μ_T – турбулентная вязкость; μ – молекулярная вязкость; k – энергия турбулентности; δ_{ij} – символы Кронеккера ($\delta_{ii} = 1$; $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$); g_j – проекции ускорения свободного падения на декартовы оси; F_j – компоненты силы межфазного взаимодействия между частицами и несущей средой.

4) Уравнение энергии для газа

$$\frac{\partial \rho U_i c T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left[\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right] c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_{vol} J_{vol} + Q_{CO} J_{CO} - \frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i} + \Theta, \quad (9)$$

где c – теплоемкость смеси газов, Pr , Pr_t – молекулярное и турбулентное ($Pr_t = 0,9$) числа Прандтля; T – температура газа; Q_{vol} , Q_{CO} – тепловые эффекты реакций горения летучих и угарного газа; q_i^{rad} – компоненты вектора радиационного теплового потока; Θ – интенсивность теплообмена между несущей средой и частицами.

5) Уравнение состояния

$$\rho = \frac{p}{R_0 T \left[\frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{C_{vol}}{M_{vol}} + \frac{C_{CO}}{M_{CO}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right]}, \quad (10)$$

где M_j – молекулярные веса компонентов газовой смеси; R_0 – универсальная газовая постоянная, p – давление.

Задание граничных условий для системы уравнений (1–10) определяется типом границы. На входе используются известные однородные распределения для всех характеристик. В качестве граничных условий на стенках топочного объема используются условия прилипания для скорости, граничные условия первого рода для температуры газа, равенство нулю производной по нормали концентраций компонент газа.

Поведение топливных и золовых частиц в топочном объеме описывается в рамках Лагранжева подхода. При этом интенсивность их тепло-массообмена с окружающей топочной средой определяется одной из следующих стадий:

б) Нагрев и сушка частицы. Если температура частицы T_p ниже температуры кипения воды, то в этом случае изменение ее массы и температуры описывается по следующим балансовым соотношениям:

$$\frac{dm_p}{dt} = h_c A_p \left[(\rho C_{H_2O})_s - (\rho C_{H_2O})_\infty \right], \quad (11)$$

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) + L_{vap} \frac{dm_p}{dt}, \quad (12)$$

где m_p – текущая масса частицы, T_p – текущая температура частицы, c_p – теплоемкость, A_p – площадь поверхности частицы, h_c и h – коэффициенты массо- и теплообмена, $(C_{H_2O})_s$ и $(C_{H_2O})_\infty$ – концентрация водяных паров у поверхности частиц и в газе, ε_p – степень черноты частицы, σ – постоянная Стефана-Больцмана, θ_R – температура излучения, L_{vap} – теплота парообразования, T_∞ – локальная температура сплошной среды.

7) Когда температура частицы достигает значения, соответствующего температуре кипения, предполагается, что в этом случае все потери, связанные с быстрым испарением влаги, компенсируются приходящими конвективно-радиационными потоками тепла. Поэтому до выполнения условия $m_p = (1 - W_t^r / 100) m_p^0$ (W_t^r - влажность угольной пыли после размола в %, m_p^0 - начальная масса частицы) температура частицы не меняется, а масса частицы предсказывается по закону (11).

8) Выход летучих. После сушки частицы и достижения температуры начала выхода летучих T_{vap} начинается процесс термической деструкции частицы, в результате которого в окружающую сплошную среду поступают горючие (углеводороды) и инертные летучие продукты. Математическое моделирование выхода летучих осуществляется аналогично пп. 6 и 7.

9) Догорание коксового остатка. Когда заканчивается выход летучих из частиц, при определенном уровне локальных температур происходит воспламенение и догорание коксового остатка. В этом случае уравнения теплового баланса и изменения массы запишутся следующим образом:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - Q \frac{dm_p}{dt} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4), \quad (13)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -h_D A_p (\rho C_{O_2})_\infty, \quad (14)$$

где Q - тепловой эффект от горения кокса, $(C_{O_2})_\infty$ - локальная концентрация молекулярного кислорода, h_D - скорость горения коксового остатка с учетом диффузии кислорода к поверхности частицы.

Численная реализация выбранной математической модели аэродинамики, теплообмена и горения аэросмеси в объеме топки осуществлялась с использованием специализированного пакета прикладных программ FIRE 3D, разработанного на кафедре парогенераторостроения и парогенераторных установок теплоэнергетического факультета ТПУ. Для учета влияния выхода влаги из топливных частиц в процессе их перемещения по топочному объему в соответствии с описанной выше математической моделью в пакет FIRE 3D был добавлен модуль, рассчитывающий скорость выхода влаги и концентрацию водяных паров в камере сгорания котлоагрегата. Необходимость модификации пакета FIRE 3D обусловлена тем, что один из претендентов на замещение проектного топлива – иршабординский бурый уголь – имеет высокую влажность и не может быть подвергнут интенсивной сушке горячим воздухом в пылесистеме.

В третьей главе проведено тестирование математической модели и дана оценка ее адекватности результатам численного исследования.

В качестве объектов исследования выбраны два котельных агрегата ПК-39 и БКЗ-210-140 - абсолютно разных в конструктивном исполнении, по условиям подачи топливно-воздушной смеси и сжигаемому твердому топливу.

Данные парогенераторы выбраны не случайно, а с целью определения достоверности в численном расчете физических процессов пакета прикладных программ FIRE 3D при различных схемах сжигания. Кроме того, уголь, сжигаемый в топке котла ПК-39, аналогичен проектному углю исследуемого котла БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-4, а уголь, сжигаемый в натуральных исследованиях в топочной камере котла БКЗ-210-140, относится к бурым высокозольным и влажным углям Канско-Ачинского бассейна, как и предложенный в качестве замещающего угля - ирша-бородинский.

Учитывая большие габариты топочной камеры котла ПК-39, для экспериментального исследования* развития физических процессов была рассмотрена часть объема топки, включающая область работы одной горелки нижнего яруса. Измерения проводились на горизонтальном участке оси нижнего яруса горелок на расстоянии 0,225 м, 0,64 м, 1,28 м, 1,99 м от устья горелки, что составляло соответственно 0,165; 0,47; 0,94; 1,471 d_a (d_a - диаметр амбразуры горелки).

На рисунке 1 представлены результаты натуральных экспериментов и математического моделирования в графическом виде.

Из графиков видно, что результаты численного расчета дают подобные профили зависимых переменных в сравнении с данными измерений, проведенных в топке котла. Причем большинство экспериментальных точек совпадают, либо находятся в непосредственной близости к значениям численного расчета.

На рисунке 2 представлены результаты изменения максимальных и средних в горизонтальных сечениях значений температуры, а так же средней в горизонтальных сечениях концентрации кислорода в зависимости от вертикальной координаты, полученных на основе математического моделирования и экспериментальных данных. Также представлено значение температуры на выходе из топки, рассчитанное по нормативному методу.

Из графиков видно, что результаты исследований имеют достаточно близкие значения и качественно незначительно отличаются друг от друга.

Если провести сравнение результата численного моделирования и результата полученного по нормативному расчету, то разница между

*Серант Ф.А., Остапенко В.Е., Волобуев А.Н. Исследование топочного процесса на котле ПК-39 блока 300 МВт Ермаковской ГРЭС при сжигании экибастузских углей по схеме прямого вдувания: технический отчет. – ОРГРЭС Сибирское отделение. – Новосибирск. – 1975. – 264 с.

значениями температур составляет 50 °С. Но нормативный метод не учитывает влияния пространственного характера процесса горения и аэродинамики топки.

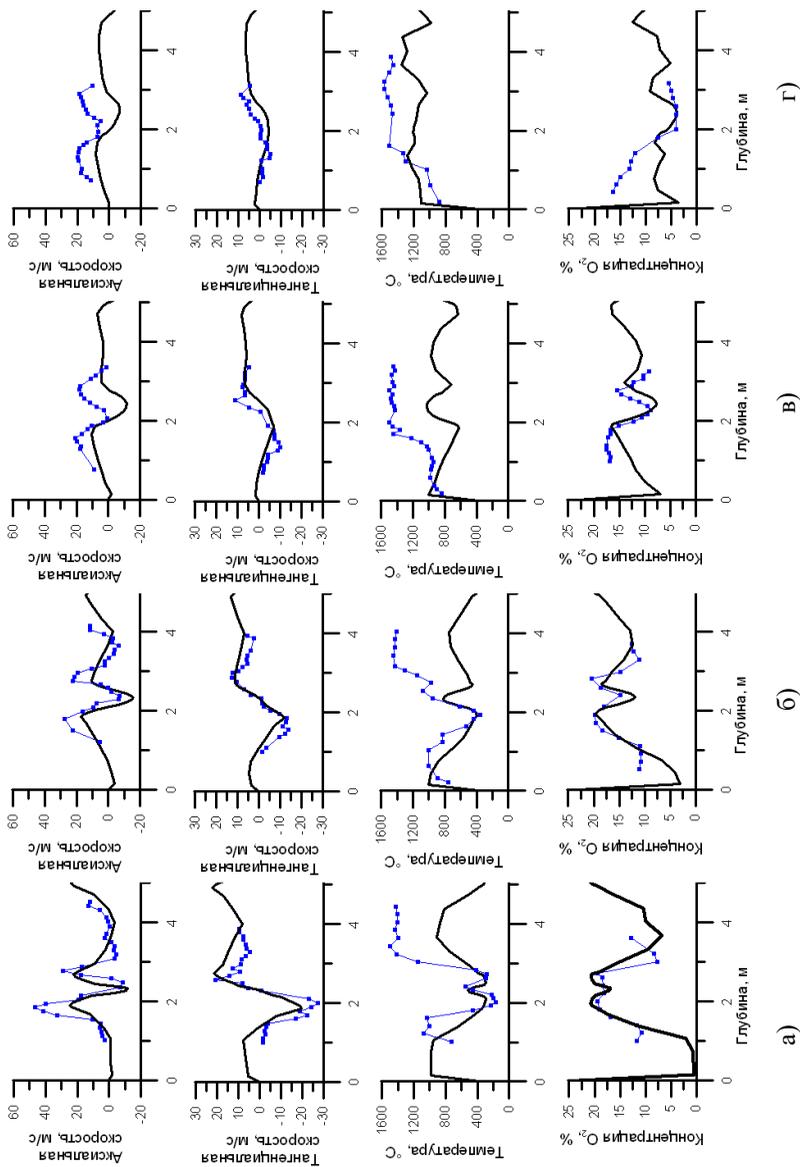


Рис. 1 Изменение параметров в горизонтальной плоскости на расстояниях: а) 0,225 м; б) 0,64 м; в) 1,28 м; г) 1,99 м от устья исследуемой горелки: — результаты математического моделирования; —■— результаты экспериментов

математической модели и метода расчета в представлении исследуемых процессов.

Влияние учета влажности топлива представлено на рисунке 4, где в графическом виде дан сравнительный анализ значений температур и кислорода по высоте топки. Из представленных результатов отчетливо видно, что без учета влажности процесс воспламенения и выгорания пылеугольной смеси проходит гораздо интенсивнее на уровне горелочного пояса, что приводит к повышению температурного уровня и теплового напряжения в данной области топки и к снижению аналогичных параметров выше области расположения горелок.

Рис. 3 Изменение температуры и концентрации O_2 по высоте топки котла БКЗ-210-140: — — —, ———, —●— результаты исследования; ✕ - значение нормативного расчета

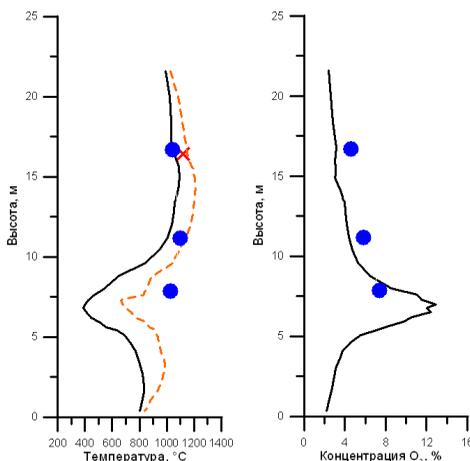
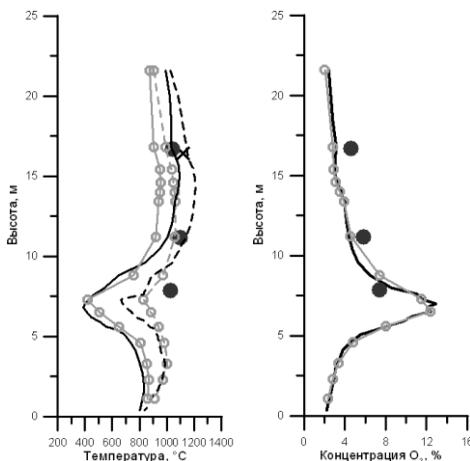


Рис. 4 Изменение температуры и концентрации O_2 по высоте топки котла БКЗ-210-140: — — —, ———, —●— результаты исследования; ✕ - значение нормативного расчета



На основе полученных результатов сравнительного анализа можно сделать заключение, что используемые подходы к решению задач численного моделирования протекания топочных процессов, реализованные в модернизированном пакете прикладных программ FIRE 3D с учетом выхода влажности, имеют высокую достоверность при предсказании моделируемых физических процессов в пылеугольных топках.

В четвертой главе приведен анализ результатов численных исследований топочных процессов при сжигании экибастузского угля (проектное топливо), кузнецкого Д и ирша-бородинского (замещающие угли).

Исследования физических процессов в топке котла БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-4 при использовании экибастузского угля не сопровождались какими-либо конструктивными изменениями в схеме сжигания (рис. 5, а).

Так как задача замещения проектного топлива сопровождалась требованиями минимальных конструктивных изменений в схеме сжигания, то было принято решение о проведении исследования сжигания кузнецкого угля при аналогичной компоновке горелок (рис. 5, а). А также рассмотрена аэродинамическая схема организации факела за счет взаимодействия прямоточных струй в топочном объеме, характерная для сжигания высокорекреационных углей, причем принята схема, при которой достигаются наименьшие конструктивные изменения топки (рис. 5, б).

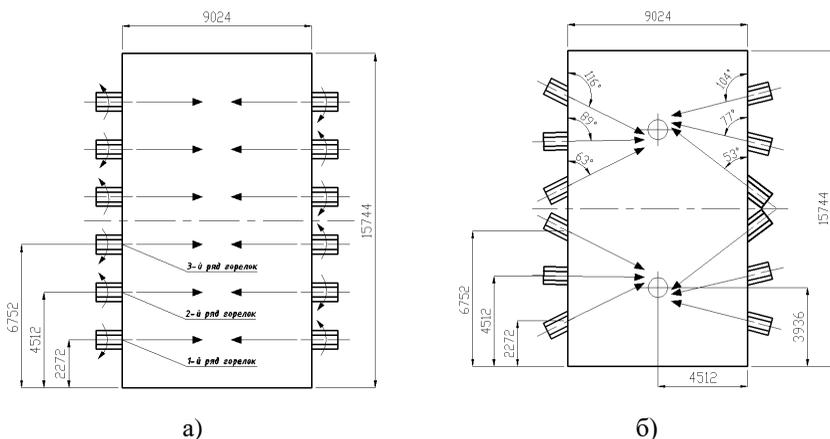


Рис. 5 Схема размещения горелок (в плане) и направления результирующих векторов горелочных струй в топке котла БКЗ-420-140: а) базовая схема сжигания; б) тангенциальная схема сжигания

На рисунках 6 и 7 представлены результаты численного моделирования изменения средней в горизонтальных сечениях температуры, концентрации O_2 , частиц и CO по высоте топочной камеры при протекании сложных аэродинамических процессов, переноса тепла излучением, в поглощающей и рассеивающей двухфазной топочной среде, с учетом гетерогенных реакций выхода летучих компонентов угля и догорания коксового остатка, а также гомогенных реакций в газовой фазе, происходящих при горении реагирующих летучих и дожигания монооксида углерода.

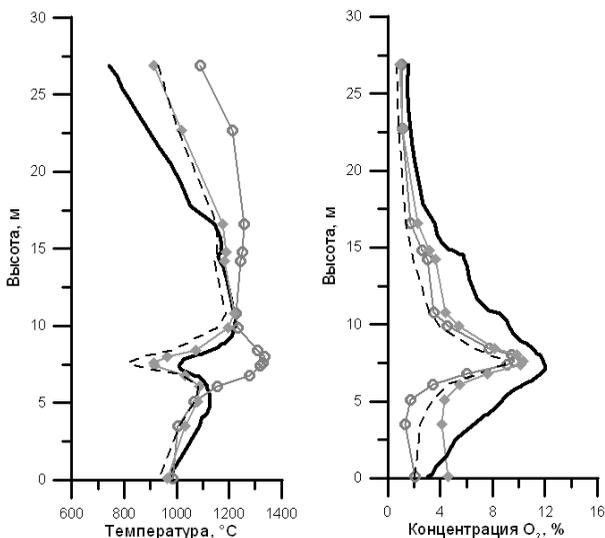


Рис. 6 Изменение средней интегральной в горизонтальных сечениях температуры и концентрации O_2 по высоте топки при сжигании углей: — экибастузского; —○— кузнецкого в базовой компоновке; —◆— кузнецкого при тангенциальной компоновке горелок; - - - ирша-бородинского при тангенциальной компоновке горелок

Оценивая наиболее перспективную схему сжигания для замещающих углей из рассмотренных в проведенном исследовании, качественно выделяется схема с тангенциальной компоновкой прямооточных горелочных устройств, поскольку процесс воспламенения и выгорания топливно-воздушной смеси протекает наиболее эффективно, равномерно и с минимальными потерями.

Так при базовой компоновке горелочных устройств и при сжигании кузнецкого угля процесс воспламенения и выгорания нестабилен на уровне горелочных устройств, что приводит к увеличению времени прогрева частиц, а следовательно, и реакции с окислителем. Процесс горения затягивается по высоте топки, что способствует перераспределению угольных частиц в топочном объеме, повышению концентрации кислорода и температуры на выходе из топки. Это крайне негативно отразится на надежной работе конвективных и полурadiационных поверхностей нагрева, возрастает нагрузка на впрыскивающие пароохладители, увеличивается вероятность образования большого количества оксидов азота. Избежать данного негативного последствия можно путем изменения параметра крутки и температуры подачи аэросмеси и вторичного воздуха, что потребует дополнительных исследований.

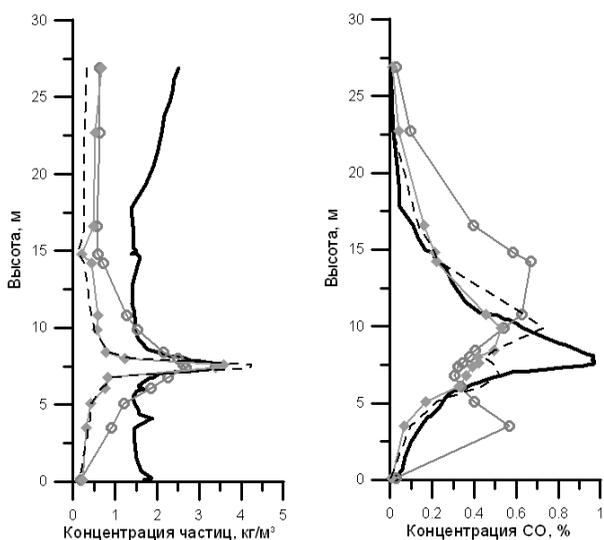


Рис. 7 Изменение средней интегральной концентрации частиц и концентрации СО в горизонтальных сечениях по высоте топки при сжигании углей: —●— экибастузского; —◆— кузнецкого в базовой компоновке; —◆— кузнецкого при тангенциальной компоновке горелок; —◆— ирша-бородинского при тангенциальной компоновке горелок

Из рассматриваемых замещающих углей при сжигании в топке котла БКЗ-420-140 наиболее высокие показатели надежной, эффективной и экологически чистой работы имеет ирша-бородинский уголь. При сжигании ирша-бородинского угля температурный уровень в топке наиболее

равномерный и не превышает значений температуры начала плавления золы t_a в пристенном слое, а также на выходе из топки соответствует рекомендованным нормативным значениям. Кроме того, в данном случае имеются минимальные значения потерь с химическим и механическим недожогом топлива.

Анализируя алгоритм проведенного исследования можно установить четкий план действий для решения задач по переводу котельных агрегатов на непроектные угли. Поскольку выполнение исследований с использованием методологии математического моделирования предполагает взаимодействие триады «модель – алгоритм - программа», то технология проведения предпроектной проработки конструкторских решений по модернизации котельного оборудования на основе специализированного программного обеспечения может быть описана следующим образом:

1. *Физическая постановка проблемы проведения модернизации теплоэнергетического оборудования.* Дается краткое описание объекта исследования – котельного агрегата и топочной камеры, приводится их графическое изображение, геометрические размеры и особенности функционирования, определяются цели и задачи модернизации котельного оборудования. Формулируются упрощающие предположения для математической модели.
2. *Математическое моделирование аэродинамики и горения пылеугольного топлива в топке котлоагрегата.* В соответствии с принятыми допущениями приводятся система законов сохранения массы, импульса и энергии в дифференциальной форме и граничные условия, а также замыкающие соотношения для коэффициентов теплопереноса, скоростей выхода влаги и летучих и догорания коксового остатка.
3. *Подготовка исходных данных для расчета топочных процессов по специализированному программному обеспечению.* Готовится для пакета прикладных программ информация о геометрических характеристиках топочной камеры котлоагрегата, условиях подачи топливовоздушной смеси, дисперсионном составе угольной пыли и ее кинетических параметрах, эффективности теплообменных поверхностей топочной камеры.
4. *Отладка специализированного программного обеспечения для выбранного набора данных.* Производится исправление ошибок, связанных с вводом исходной информации, и тестирование пакета на задачах с подобными условиями сжигания пылеугольного топлива.
5. *Счет по программе с верифицированными исходными данными и анализ результатов расчета топочных процессов.* Осуществляются расчеты на ЭВМ. Полученные с помощью численного счета результаты моделирования аэродинамики, теплообмена и горения представляются в

графическом и табличном виде, анализируются и сравниваются с экспериментальными данными и расчетами по другим методикам. Оформляется соответствующая научно-техническая документация, в которой приводится подробное описание степени выполнения задач, поставленных в конструкторской предпроектной проработке.

6. *Внедрение полученных результатов на объектах с модернизируемым котельным оборудованием.*

ВЫВОДЫ

1. Использование методов численного моделирования позволило провести полномасштабное исследование сложных физических процессов, детально изучить такие топочные процессы, как распространение пылевоздушной смеси в топочном объеме с учетом гомогенных и гетерогенных реакций горения, тепломассообмена с учетом взаимодействия частиц, радиационного излучения и т.п. При таком способе анализа теплофизических процессов сокращается трудоемкость, материальные и временные затраты, что позволяет в кратчайшие сроки проводить сложные полномасштабные варианты исследования.
2. Выполнена модернизация оригинального пакета прикладных программ FIRE 3D, разработанного в ТПУ на кафедре ПГС и ПГУ теплоэнергетического факультета, за счет введения дополнительного расчетного модуля, учитывающего процесс выхода влаги из топливных частиц в объеме топки и разработанного с целью повышения достоверности численных расчетов, что особенно актуально для высоковлажных топлив. На основе сравнительного анализа установлено, что погрешность в расчетах, проведенных без учета выхода влаги в топке, может достигать 20 %.
3. Выполненные тестовые расчеты сжигания углей с существенно отличающимся рабочим составом и влажностью в пылеугольных топках с различной организацией топочного процесса показали хорошую сходимость с экспериментальными данными и результатами, полученными с использованием нормативного метода теплового расчета котельных агрегатов. В частности, вычисленная в результате математического моделирования температура на выходе из топки различается с экспериментальными и «нормативными» значениями не более чем на 50 °С.
4. Используя метод численного расчета, выявлено, что при сжигании проектного топлива в топке котла БКЗ-420-140 аэродинамическая схема сжигания хорошо согласуется с условиями эффективного воспламенения и выгорания топливно-воздушной смеси. Но концентрация летучей золы на выходе из топки превышает значение 2,5 кг/м³, что в 8 раз больше,

чем при сжигании ирша-бородинского и в 5 раз больше, чем при сжигании кузнецкого угля.

5. На основе проведенного вариантного анализа с использованием модернизированного пакета Fire 3D установлено, что в качестве наиболее перспективного замещающего топлива из исследованных в данной работе углей для сжигания в топке котла БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-4 при минимальных конструктивных изменениях является бурый ирша-бородинский уголь.
6. Результаты диссертационного исследования внедрены на Омской ТЭЦ-4 применительно к базовому варианту и к вариантам, отвечающим условию минимального объема реконструктивных изменений в топке котла БКЗ-420-140 при сжигании замещающих углей, а также используются в учебном процессе по специальности 140502 «котло- и реакторостроение» в Томском политехническом университете (включены в лекционный курс и лабораторный практикум по дисциплине «Методы защиты окружающей среды», в тематику выпускных квалификационных работ и учебно-исследовательской работы студентов).

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях

1. Гиль А.В., Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В., Обухов С.В. Исследование аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива. - Известия Томского политехнического университета. Том 310, №1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. С.175-181.
2. Аношин Р.Г., Гиль А.В., Григорьев К.А., Заворин А.С., Красильников С.В., Лебедев Б.В., Парамонов А.П., Рундыгин Ю.А., Скудицкий В.Е., Старченко А.В. Математическое моделирование топочных процессов при сжигании грубоизмельченного топлива. - Горение и плазмохимия, 2006. - Т.4 - № 4. - С. 255-259.
3. Гиль А.В., Старченко А.В., Обухов С.В., Красильников С.В. Компьютерное тестирование аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-4. - Материалы докладов VI Всероссийского совещания «Энергоэффективность, энергосбережение и энергетическая безопасность регионов России». - Томск: Изд-во ЦНТИ, 2005. - С. 81-85.
4. Гиль А.В., Красильников С.В., Старченко А.В. Исследование и анализ топочных процессов в топке котла БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-4 при помощи математического моделирования. - Материалы 3-й Всероссийской конференции молодых ученых «Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии». - Томск: Изд-во Института оптики и атмосферы СО РАН, 2006. - С. 699-702.

5. Гиль А.В., Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В. Численное моделирование топочных процессов в топке котла Е-160-10 при сжигании угля Таловского месторождения. - Материалы докладов XII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». - Томск: Изд-во ТПУ, 2006. - С. 145-147.
6. Гиль А.В., Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В. Применение пакета прикладных программ FIRE 3D для исследования вариантов перевода котлов на непроектное топливо. - Сб. докладов VI Всероссийская конференция «Горение твердого топлива», - Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. - Ч. 1. - С. 214-220.
7. Гиль А.В., Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В., Обухов С.В. Исследование распределения частиц в топке котла БКЗ-420-140 на основе численного моделирования сжигания углей. - Сборник докладов IV научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов». - Челябинск, 2007. - Том II. - С. 42-49.
8. Гиль А.В., Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В., Обухов С.В. Анализ аэродинамики и теплообмена в топке котла БКЗ-420-140 на основе математической модели при переводе на технологию низкотемпературного вихревого сжигания непроектного угля. - Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». - Иркутск, 2008. - С. 116-117.
9. Гиль А.В., Красильников С.В., Старченко А.В. Применение пакета прикладных программ FIRE-3D при реконструкции котельных агрегатов. - Сборник тезисов «VIII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям», Новосибирск, 2007. - С. 40-41.
10. Гиль А.В., Тайлашева Т.С., Лебедев Б.В. Математическое моделирование аэродинамики и горения природного газа в котле типа ДКВР. - Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». - Иркутск, 2008. - С. 97-101.
11. Гиль А.В., Старченко А.В., Обухов С.В. Численный анализ топочных процессов в топке котла БКЗ-420-140 при переходе на технологию низкотемпературного вихревого сжигания твердого топлива. - Сборник трудов «XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»» в 3-х томах. Т. 3. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - 621 с.

Подписано к печати 12.11.2008. Формат 60 x 84 / 16 .
Гарнитура Times. Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ.л.1,4. Тираж 100 экз. Заказ № 129

Отпечатано в типографии ООО «Аграф-пресс»
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, стр. 4, к. 109.